

Perfilamento a LASER : Comparação com Métodos Fotogramétricos

Comissão Técnica : Fotogrametria

Amauri Alfredo Brandalize

ESTEIO Engenharia e Aerolevantamentos S.A.

Rua Reinaldo Machado, 1151

80215-010 Curitiba – Paraná – Brasil

fone +55 332-4299 – fax +55 332-3273

<http://www.esteio.com.br> – e-mail : info@esteio.com.br

RESUMO

Uma das atividades que mais consomem tempo na Fotogrametria é a obtenção de Modelos Digitais de Elevação ou do Terreno (MDE ou MDT). Este subproduto cartográfico normalmente é utilizado para a retificação diferencial de ortofotos ou para obtenção automática de curvas de nível. O Perfilamento a LASER é uma tecnologia que está revolucionando esta metodologia, permitindo a obtenção do MDE de maneira mais direta, evitando processos fotogramétricos ou levantamentos com outras técnicas como o GPS. Este trabalho apresenta uma comparação de resultados na obtenção de MDT derivados de Correlação de Imagem, Curvas de Nível e Perfilamento a LASER. Também são enfocados os aspectos de remoção automática de camada vegetal no MDT, uma das características principais deste sistema.

ABSTRACT

One of the most consuming-time activities in Photogrammetry is to get a Digital Elevation Model (DEM) or Digital Terrain Model (DTM). This cartographic derived product is commonly used for differential rectification of orthophotos or to obtain contour lines. LASER profiling is a technology that is revolutionizing this methodology, allowing the obtaining of MDE in a more direct way, avoiding photogrammetric process or another kind of survey like GPS. This work presents a comparison of results in the obtaining of a MDT derived from image correlation, contour lines and LASER profiling. The aspects of automatic removal of vegetation layer are also focused in a MDT, one of the main characteristics of this system.

1 UMA NOVA TECNOLOGIA ?

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, mas de forma muito mais eficaz, pois 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.

O Perfilamento a LASER desenvolveu-se a partir da necessidade de usuários de modelos digitais de elevação (*DEM - Digital Elevation Model*) em casos onde os métodos tradicionais não eram suficientes. As experiências iniciais com esta metodologia datam de 1993, realizadas por um grupo de pesquisa alemão da *Deutsche Forschungsgemeinschaft* que mais tarde, levaram à criação da *TopScan GmbH*. Em conjunto com a empresa canadense *Optech Inc.*, a *TopScan GmbH* desenvolveu um método de Perfilamento a LASER considerado como o primeiro projeto demonstrativo da técnica. (WEVER *et al.*, 1999)

Até a metade dos anos 90, havia apenas uma empresa comercializando sistemas de Perfilagem a LASER e as empresas especializadas nesta tecnologia eram poucas. Em um dos últimos levantamentos de mercado realizados no ano 2000, constatou-se mais de 5 fabricantes de sistemas de Perfilamento a LASER que produzem sistemas completos ou os componentes principais deste conjunto.

Neste mesmo levantamento de mercado, foram enumeradas mais de 25 empresas que adquiriram tais sistemas e 10 empresas trabalhando em regime de locação, além dos 5 sistemas de testes e demonstração das empresas fabricantes. Assim, são cerca de 40 os sistemas de Perfilamento a LASER, concentrados principalmente na Europa, Estados Unidos, Canadá, Japão, Austrália, África do Sul (BALTSAVIAS, 1999a) e mais recentemente, no Brasil.

2 COMPONENTES DO SISTEMA

INTRODUÇÃO

Os Sistemas de Perfilamento a LASER comercializados atualmente são produtos resultantes da integração de componentes essenciais para o seu funcionamento. O grande desafio destes integradores é a

funcionalidade do sistema de modo que estes componentes, oriundos de diversos fabricantes, operem em harmonia permitindo a aquisição dos dados necessários e relacionados ao fim a que se destinam.

Os equipamentos e programas que formam um Sistema de Perfilamento a LASER são distintos em componentes que estão a bordo de uma aeronave e aqueles que estão no terreno em tempo real de execução do levantamento ou para pós-processamento.

Os componentes principais que se encontram a bordo de uma aeronave, preparada para este tipo de serviço, são os seguintes :

- Sensor LASER (*LRF-LASER Range Finder*) composto pelo gerador do pulso LASER, ótica de transmissão e recepção do raio, detetor de sinal, amplificador e outros componentes eletrônicos;
- Sistema de Medição Inercial (SMI);
- Receptor GPS e seus respectivos componentes;
- Computador de bordo e respectivos programas para controlar a aquisição dos dados;
- Unidades de armazenamento dos dados brutos do LASER, do GPS e da Navegação Inercial;
- Receptor GPS para navegação da aeronave.

No solo e em tempo real, o componente principal é o receptor GPS de base cujo rastreo será usado na correção diferencial dos pontos medidos pelo LASER. De acordo com as características de extensão e forma da superfície que está sendo trabalhada, é necessário mais de uma estação GPS de base.

Completando o sistema estão os programas para descarga dos dados brutos do LASER, do GPS e da Medição Inercial e os programas de pós-processamento destes dados para obtenção de produtos derivados do levantamento como, por exemplo, MDE, MDT ou curvas de nível.

Muitas das características operacionais descritas e parâmetros apresentados neste trabalho são específicos do sistema ALTM 2025 da empresa Optech Inc., Ontario-Canadá. Esta empresa possui mais de 25 anos de experiência com Perfilamento LASER e seus sistemas (quase 40 unidades comercializadas até 2001) vêm sendo utilizados em mais de 20 tipos de aeronaves. No entanto, os conceitos gerais de funcionamento e operação de um Sistema de Perfilamento LASER podem ser aplicados à maioria dos modelos comerciais existentes.

3 SENSOR LASER

O sensor LASER é formado principalmente pelo gerador do pulso LASER, ótica de transmissão e recepção do raio e outros componentes eletrônicos (fig. 01).

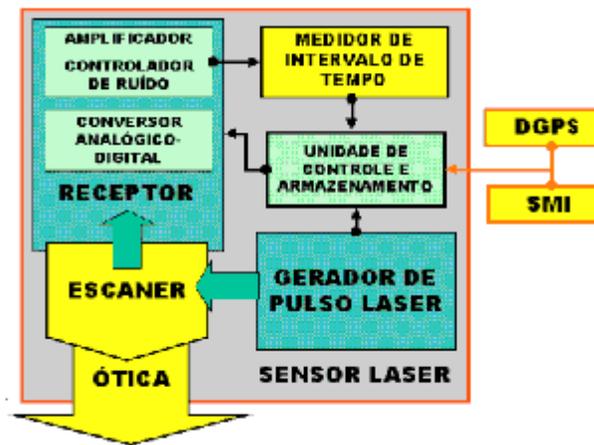


FIG. 01 - DIAGRAMA DO SENSOR LASER

No ALTM 2025, o gerador do pulso LASER é um cristal sintético (Nd:YAG - *Neodimium: Yttrium Aluminum Garnet*) excitado por um diodo semiconductor que provê a energia necessária para a emissão de um raio LASER de alta energia (50 a 250µJ). Apesar do pulso ser de alta energia, ele não excede os limites impostos para a operação segura com LASER (FLOOD, 2001).

FREQÜÊNCIA DE OPERAÇÃO E DIVERGÊNCIA

A freqüência de repetição deste pulso (PRF *Pulse Repetition Frequency*) ou freqüência de operação f_{oper} varia de 10 a 33 kHz, sendo que alguns sistemas operam a 83 kHz.

A divergência do raio constitui uma característica física do pulso LASER de divergir a medida que se propaga. Tal divergência é relativamente baixa, resultando em um ponto projetado de tamanho pequeno em relação às altitudes de operação (fig. 02).

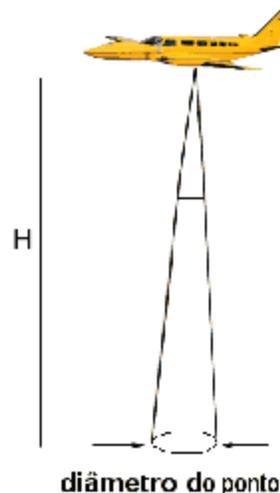


FIG. 02 - DIÂMETRO DO PONTO PROJETADO NO SOLO EM FUNÇÃO DA ALTURA DE VÔO

O ângulo de divergência pode ser ajustado por meio de elementos óticos apropriados do transmissor para um ponto projetado de dimensões controladas, de acordo com a superfície levantada. Uma divergência menor é necessária para levantamentos de detecção de cabos de linhas de transmissão e para melhor penetração na vegetação.

Um pulso LASER com média a alta divergência possui um ângulo α da ordem de 1,0 mrad. Já um pulso LASER com baixa divergência possui um ângulo α da ordem de 0,2 mrad. Os sistemas LASER atualmente comercializados possuem variação de Divergência de 0,2 mrad a 5 mrad.

O diâmetro do ponto projetado no solo (eq. 01) é função da altura de vôo (H em m) e da divergência do raio LASER (α em radianos) :

$$D = \alpha \times H \quad (01)$$

Para uma altura de vôo de 1.200 m, o diâmetro do ponto projetado para um pulso de alta divergência seria de 1,20 m e para um pulso de baixa divergência seria de apenas 0,24 m.

SEGURANÇA OPERACIONAL DO LASER

O sensor LASER emite luz que corresponde à porção infra-vermelha do espectro e que é invisível para o olho humano, mas quando direcionada direta ou indiretamente para os olhos, pode causar danos irreversíveis.

A divergência do pulso LASER, a sua intensidade, a frequência de operação e a velocidade da aeronave são valores relacionados diretamente com a operação segura do sistema de Perfilamento a LASER.

Para garantir esta operação segura, o sistema de Perfilamento a LASER é programado para interromper o seu funcionamento abaixo de uma certa altura de vôo, que depende dos fatores enumerados acima.

A tabela 01 apresenta alguns valores de altura mínima de operação, assumindo-se que a energia do pulso é de 120 μ J (1.064 η m) e a frequência de operação é de 25 kHz.

TABELA 01 - ALTURA MÍNIMA PARA OPERAÇÃO SEGURA

Velocidade	Alta Divergência	Baixa Divergência
	1,4 mrad	0,5 mrad
100 km/h	125 m	350 m
200 km/h	100 m	300 m

CONJUNTO ÓTICO, EMISSOR E RECEPTOR

Neste sistema, um conjunto ótico (lentes e espelhos) orienta o pulso LASER emitido pelo gerador de pulso e devolve a reflexão deste LASER ao receptor.

Do gerador de pulso LASER, o raio é dirigido para a chamada cavidade ótica até um espelho móvel na parte final do sensor. O sinal de retorno é dirigido à parte eletrônica de recepção do sensor que transforma o sinal analógico em sinal digital.

A radiação refletida é tratada primeiramente em um filtro de interferência (Controlador de Ruído) onde somente um comprimento de onda específico (1.064 η m) atinge o receptor. O receptor gera, então, um pulso de corrente proporcional à intensidade da radiação incidente.

MEDIDOR DE INTERVALO DE TEMPO (TIM)

O Medidor de Intervalo de Tempo (*Time Interval Meter* - TIM) é o módulo responsável pela medida do tempo transcorrido entre a emissão do pulso LASER e o seu retorno ao sistema (fig. 03). Essencialmente, ele é um contador que inicia quando o pulso LASER é disparado e pára quando o último pulso correspondente retorna.

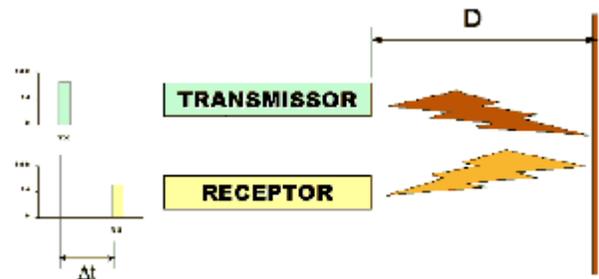


FIG. 03 - INTERVALO DE TEMPO ENTRE TRANSMISSÃO E RECEPÇÃO DE UM PULSO LASER

A reflexão dos pulsos LASER é detectada pela ótica do sistema e registrada pelo TIM. Conhecendo-se as condições atmosféricas e a velocidade de propagação do pulso LASER, a distância entre o sistema e o ponto de reflexão pode ser calculada. O tempo transcorrido entre a emissão e a recepção do pulso LASER é dado pela eq. 02, onde H é a altura de vôo, ou seja, a distância entre o conjunto emissor-receptor e a superfície de reflexão e c é a velocidade da luz.

$$\Delta t = 2 \times \frac{H}{c} \quad (02)$$

Uma das características principais do módulo TIM é o registro de diferentes reflexões de um mesmo pulso e que caracterizam a penetração em objetos, sendo esta

condição, extremamente útil para a identificação de cobertura vegetal e de cabos em Linhas de Transmissão.

Todo o processo é controlado por uma Unidade Central de Controle (UCC) que também gerencia os dispositivos externos de Navegação Inercial, de GPS e de armazenamento dos dados coletados. Maiores detalhes sobre a teoria de propagação de pulsos LASER e sobre a medição baseada em reflexão podem ser encontrados em WEHR, 1999.

4 SISTEMA DE MEDIÇÃO INERCIAL (IMU - INERTIAL MEASUREMENT SYSTEM)

O objetivo do SMI (Sistema de Medição Inercial) é obter a posição e atitude do sensor LASER em relação a um sistema de referência de alta precisão e a taxas de transferência também altas sem a necessidade de uso de uma base terrestre (fig. 04).



FIG. 04 - SISTEMA DE MEDIÇÃO INERCIAL E SEUS COMPONENTES

O SMI é basicamente composto de uma unidade de medição inercial propriamente dita, um receptor GPS de dupla frequência, um computador e um programa para pós-processamento.

UNIDADE DE MEDIÇÃO INERCIAL

A Unidade de Medição Inercial é formada por um conjunto de giroscópios, acelerômetros e uma unidade de controle responsável pelas condições dos sinais emitidos por estes componentes. Geralmente, esta unidade é leve, compacta e instalada o mais próximo possível do ponto de referência do sensor garantindo a maior precisão possível.

Os requisitos básicos para o bom funcionamento dos giroscópios no sistema são as suas dimensões e sua sensibilidade ao movimento e "ruído" (interferências no sinal).

Os dados dos giroscópios e dos acelerômetros (velocidade incremental e movimentos angulares) são enviados ao computador com taxas de 200 a 1.000 Hz (5 ms a 1 ms).

RECEPTOR GPS DO SMI E ARMAZENADOR DE MASSA

O receptor GPS do SMI é um receptor de dupla frequência interno de baixo "ruído", que permite o rastreamento do tipo RTK (*Real Time Kinematic*), necessário para a definição do posicionamento.

O computador do SMI possui um sistema de armazenamento de massa (*Flash Card*) para o registro das medidas de posição e desvios em torno dos eixos posicionais (*roll, pitch e heading*) de um sensor aerotransportado. Além disso, o computador integra o GPS com a tecnologia inercial para fornecer solução em tempo real para o posicionamento, usada em sistemas de navegação aérea ou em plataformas giro-estabilizadas como as utilizadas pelas modernas câmaras aéreas.

Os dados de saída de um SMI são geralmente data/hora, latitude & longitude, velocidade, valores das componentes posicionais e outras informações do sistema. Para informações mais detalhadas sobre o funcionamento de um SMI, ver MOSTAFA *et al*, 2001.

5 PRINCÍPIO DE FUNCIONAMENTO

INTRODUÇÃO

O princípio básico de funcionamento deste sistema é a obtenção de registros contínuos de coordenadas espaciais, as quais constituem os elementos primários para modelagem do terreno e geração de um mapa topográfico derivado destas informações.

O pulso LASER de alta precisão é direcionado para o solo por uma abertura no bojo de uma aeronave ou por um conjunto de sustentação aplicado à lateral de um helicóptero. No caso das aeronaves, esta abertura pode ser a mesma utilizada para a operação de câmaras aéreas na execução de coberturas aerofotogramétricas.

Durante o levantamento, o sistema emite pulsos LASER em determinada frequência que são dirigidos para o solo por meio de um conjunto ótico móvel. O sistema faz uma varredura da superfície do terreno abaixo da aeronave e registra a distância até o solo para cada um dos pulsos emitidos, sendo registrada também a posição inercial do conjunto, de modo a conhecer a inclinação de cada feixe em relação à vertical do lugar.

LARGURA DE FAIXA DE PERFILAMENTO

A varredura é feita no sentido transversal à direção da linha de vô com um ângulo de abertura configurável pelo sistema. Este ângulo de abertura permite a determinação da largura da faixa abrangida pelo Perfilamento a LASER, enquanto o movimento da aeronave permite a cobertura na direção de vô.

A largura da faixa abrangida pela varredura pode ser determinada pela eq. 03:

$$L = 2 \times H \times \tan \beta \quad (03)$$

L representa a largura da faixa varrida pelo LASER, em m e é função da altura de vôo (H em m) e do ângulo de abertura β (fig. 05).

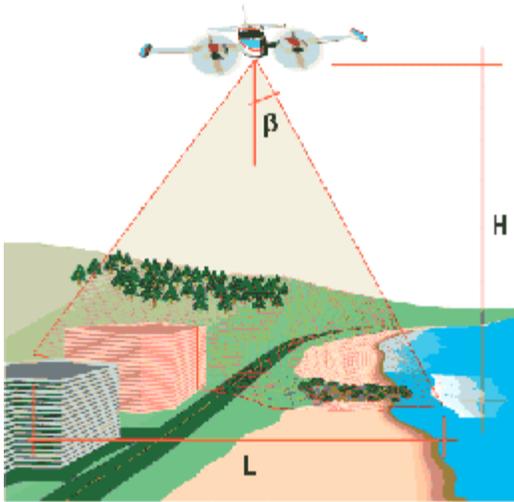


FIG. 05 - LARGURA DA FAIXA

Por exemplo, para um ângulo de abertura β de 20° e para uma altura de vôo de 1.200m, a largura da faixa seria :

$$L = 2 \times 1200 \times \tan 20^\circ = 873,50m$$

Sem a atuação do conjunto ótico móvel, o pulso LASER é dirigido em uma linha reta perpendicular à linha de vôo em direção ao solo (Nadir). Com o movimento da aeronave, este modo de operação permite a obtenção de um perfil da superfície levantada.

FREQÜÊNCIA DE PERFILAMENTO

Quando o conjunto ótico móvel é programado para executar movimentos laterais combinado com o deslocamento da aeronave, o mesmo produz um feixe de pulsos perpendicular à direção de vôo. A oscilação do conjunto ótico em torno do eixo (freqüência de perfilamento) em combinação com o movimento da aeronave, cria um padrão de varredura do tipo "dente de serra" (fig. 06).

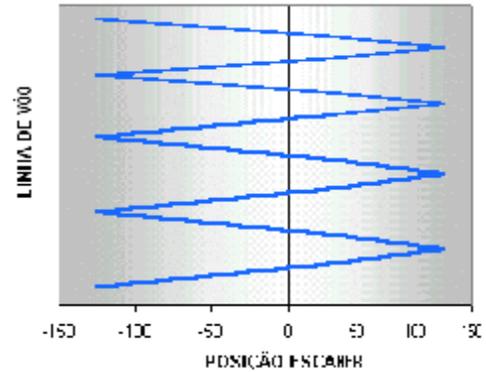


FIG. 06 - PADRÃO DO ESCANER

O ângulo de abertura β e a freqüência de perfilamento f_{perfil} , combinados com a altura de vôo H e com a velocidade da aeronave, determinam a densidade e distribuição dos pontos LASER na superfície do terreno.

Com freqüências de perfilamento baixas são obtidos perfis transversais à linha de vôo muito densos. Supondo que a freqüência de perfilamento seja de 1 Hz (2 perfis transversais), seriam obtidos cerca de 12.500 pulsos LASER em cada um dos perfis a uma freqüência de operação do sistema de 25 kHz (f_{oper}). Para uma largura de faixa de 800 m (L), correspondente a uma altura de vôo de 1.100 m, o espaçamento entre os pontos LASER (E_{perfil}) ao longo dos perfis seria de 6,5 cm (eq. 04).

$$E_{\text{perfil}} = \frac{2 \times f_{\text{perfil}} \times L}{f_{\text{oper}}} \quad (04)$$

Nestas condições, o diâmetro do ponto projetado D (eq. 01) seria de 30 cm, ou seja, cinco vezes superior ao espaçamento em questão. Isto demonstra a redundância de observação e fica clara a necessidade de aumentar a freqüência do perfilamento para uma melhor distribuição dos pulsos LASER.

Supondo que a aeronave esteja a uma velocidade de 200 km/h (55 m/s), tem-se um padrão "dente de serra" com alta densidade de pontos no sentido transversal e grande espaçamento no sentido da linha de vôo - $X_{\text{esp}} = 27,5m$ (fig. 07).

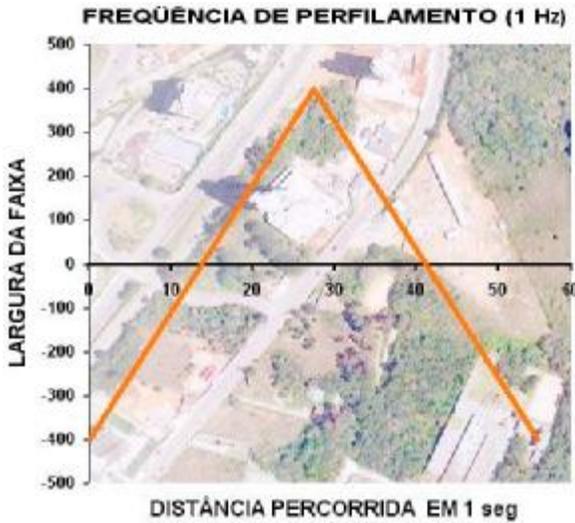


FIG. 07 - FREQUÊNCIA DE PERFILAMENTO BAIXA

Para uma frequência de perfilamento f_{perfil} de 30 kHz, o espaçamento entre os pontos LASER (E_{perfil}) ao longo dos perfis seria de 1,90m. Cada perfil transversal estaria espaçado de 0,92 m ao longo da linha de vôo (fig. 08).

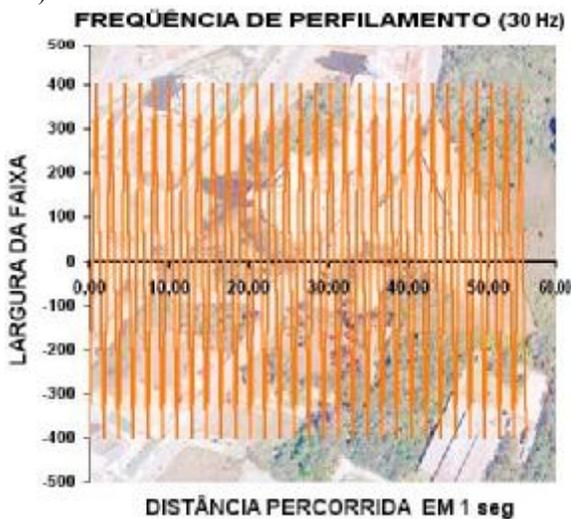


FIG. 08 - FREQUÊNCIA DE PERFILAMENTO ALTA

A tabela 02 ilustra uma combinação de frequências de perfilamento f_{perfil} com algumas alturas de vôo, tendo como resultante a densidade de pontos por m^2 . Para composição da tabela, estabeleceu-se a velocidade da aeronave em 230 km/h, equipamento com frequência operacional f_{oper} de 33 kHz e ângulo de abertura de 40° ($\pm 20^\circ$).

TABELA 02 - PARÂMETROS DEPENDENTES DA ALTURA DE VÔO

Altura	500 m	1.000 m	2.000 m
Frequência Perfilamento	29 Hz	27 Hz	19 Hz
Largura de faixa	360 m	720 m	1440 m

de Perfilamento			
Espaçamento dos Pontos - eixo X	1,11 m	1,19 m	1,69 m
Espaçamento dos Pontos - eixo Y	0,63 m	1,18 m	1,66 m
Pontos / m ²	1,40	0,70	0,40

Os sistemas podem operar de 500 m a 3.000 m acima do nível do solo (com dispositivos opcionais, a altura pode chegar a 6.000 m) para sistemas compatíveis com aeronaves. Para helicópteros, os valores típicos da altura de vôo variam de 150 a 300 m.

REFLEXÃO

As pulsações ópticas refletidas no solo são coletadas pelo receptor e são convertidas de sinal óptico para eletrônico. O tempo gasto para o feixe sair do receptor e refletir no solo é medido e, baseado na velocidade conhecida da luz, pode ser determinada a distância do sensor até o solo.

Os sistemas de Perfilamento a LASER dependem basicamente da detecção de luz refletida em uma superfície natural ou artificial. Esta detecção é feita por um componente do receptor chamado de Fotodiodo ou APD (*Avalanche Photo Diode*). A sensibilidade deste Fotodiodo é de relativa importância para a capacidade de captação do sinal refletido. Assim, esta reflexão depende basicamente da sensibilidade a determinados comprimentos de onda do Fotodiodo (800nm a 1.600nm) e das características desta superfície.

Outro fator determinante é o desvio dos pulsos LASER emitidos. Este desvio é da ordem de 10 a 20% em terrenos arenosos, de 30 a 50% em vegetação e de 50% a 80% em coberturas metálicas de edifícios. Em resumo, quanto mais reflexiva for a superfície, maior será o desvio dos pulsos emitidos e menor será o retorno dos pulsos ao sistema. (WEVER *et al.*, 1999)

A tabela 03 apresenta percentuais de reflexão para um comprimento de onda de 900nm. Nesta tabela, quanto maior o percentual, melhor a capacidade de retorno do pulso ao sistema (WEHR, 1999).

TABELA 03 - REFLEXÃO EM MATERIAIS DIFUSOS

Material	Reflexão (%)
Madeira clara, seca e limpa	94
Neve	80-90
Pedras claras	85
Calcário, Argila	Até 75
Vegetação mista	Média 60
Coníferas	Média 50
Areia seca	57

Areia molhada	41
Areia de praia	Média 50
Madeira bruta (rugosa)	25
Concreto	24
Asfalto	17
Borracha sintética	5

PRIMEIRO E ÚLTIMO PULSO LASER

Outra característica marcante dos sistemas de Perfilagem a LASER é a medição da primeira e da última reflexão de cada pulso LASER (fig. 09), além da detecção de reflexões múltiplas oriundas de objetos pequenos como fios e cabos suspensos acima do solo.

Esta capacidade de distinção de várias reflexões de um pulso LASER permite a identificação de objetos que projetam-se acima do solo como, por exemplo, a vegetação (fig. 10). Com a correta interpretação dos pontos processados é possível a operação chamada de Remoção Virtual da Camada de Vegetação.

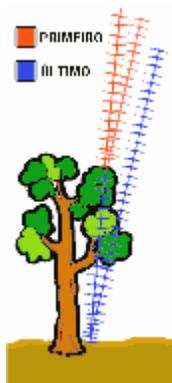


FIG. 09 - PRIMEIRO E ÚLTIMA REFLEXÃO DO PULSO LASER

A relação entre o número de pulsos refletidos pelo solo e o número total de pulsos emitidos pelo sistema é chamada de Taxa de Penetração. Alguns estudos empíricos demonstram que este valor é de 30% para vegetação do tipo Conífera e de 65% para vegetação mista.

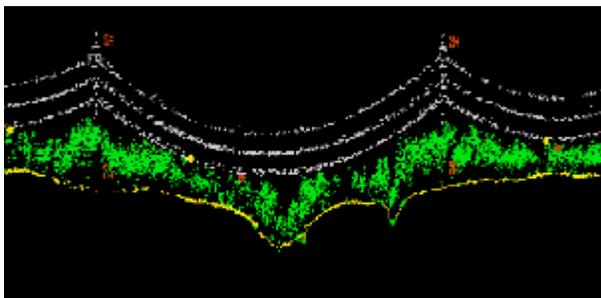


FIG. 10 - DETECÇÃO DE CABOS E VEGETAÇÃO
(imagem de propriedade da OPTEN Ltd.)

GPS - CORREÇÃO DIFERENCIAL

A posição da aeronave em relação a um sistema inercial é registrada por meio de sistema de referência inercial (IMU - *Inertial Measurement Unit*) durante o levantamento. Estes dados são utilizados no pós-processamento para determinar com precisão as coordenadas dos pontos LASER medidos.

Além da posição e dos movimentos instantâneos registrados pelo SMI, um receptor GPS baseado no solo provê o rastreo simultâneo, possibilitando a correção diferencial, o que resultará em maior precisão na determinação da posição dos pontos LASER.

HORÁRIO DE OPERAÇÃO

Praticamente, os sistemas de Perfilamento a LASER operam em qualquer horário, diurno ou noturno. As únicas obstruções para o levantamento são físicas, como chuva ou nuvens muito densas entre o local perfilado e a aeronave.

Os fabricantes argumentam que os mesmos impedimentos para a luz visível são os mesmos para o Perfilamento a LASER, uma vez que se trata de uma luz próxima à faixa visível do espectro (LIDAR - *Light Detection and Ranging*).

6 ESTAÇÕES DE BASE GPS

Em um Perfilamento a LASER, um receptor GPS localizado no SMI registra a posição da aeronave a intervalos fixos. Outro receptor baseado no solo provê a correção diferencial para uma determinação de posição mais precisa. O DGPS (GPS Diferencial) é um método de refinamento dos dados posicionais derivados do rastreo GPS por meio da correção de erros inerentes ao processo.

Refere-se como linha base, o uso de dois aparelhos GPS que coletam informações da constelação GPS ao mesmo tempo. Neste contexto, a linha base é a distância entre o aparelho localizado no solo e o aparelho aerotransportado.

Recomenda-se que a distância entre os aparelhos não seja superior a 50 km. Por conseguinte, as bases de solo também devem estar espaçadas de no máximo 50 km para garantia da precisão planimétrica dos pontos LASER, conforme indicado pelo fabricante do sistema. Sempre que tal condição não puder ser estabelecida, o uso de um conjunto de bases terrestres é requerido.

Além da necessidade de bases terrestres corretamente espaçadas, existem outros fatores que contribuem para a deterioração da qualidade do sinal GPS. Muitos são fatores externos que independem da ação do operador, como anomalias eletromagnéticas

(tempestades elétricas) e condições atmosféricas adversas (nuvens densas, chuva ...). No entanto, a perda do sinal GPS no aparelho aerotransportado, ocasionado pela execução de manobras bruscas da aeronave, é um fator que deve ser considerado.

7 PÓS-PROCESSAMENTO

DADOS E EQUIPAMENTO PARA O PROCESSAMENTO

O pós-processamento é realizado por um conjunto de programas e equipamentos necessários para processar os dados coletados durante o Perfilamento a LASER.

Os dados coletados, chamados Dados Brutos (*Raw Data*), são as medidas LASER com seus respectivos atributos, dados do GPS aerotransportado e dados da navegação inercial. Além dos dados do levantamento propriamente dito, no instante do processamento, são incorporados os dados de calibração do sistema e parâmetros como :

- Excentricidade da antena GPS em relação ao sensor LASER;
- Ângulos de montagem da plataforma do sensor LASER quando a aeronave está nivelada no solo;
- Posição do sensor LASER em relação ao SMI.

Os equipamentos utilizados no pós-processamento consistem de computadores do tipo PC com boa capacidade de processamento. São requisitos importantes e que têm influência no processo, a velocidade do processador (recomenda-se o uso de duplo processador), a quantidade de memória e a interface de disco rígido do tipo SCSI. Como os dados brutos são armazenados em fitas 8 mm do tipo *Exabyte*, uma unidade de leitura e gravação é necessária.

ETAPAS

Nas etapas do pós-processamento (fig. 11) utilizam-se programas específicos que podem ser categorizados da seguinte forma:

- Extração dos Dados Brutos gravados durante o levantamento;
- Separação dos Dados Brutos em dados GPS, Dados POS (inerciais) e Dados LASER;
- Refinamento dos Dados separados;
- Integração dos Dados separados com os Dados GPS das bases terrestres;
- Processamento Final com uso de polígono de corte;
- Processamento Específico para Remoção de Camada Vegetal ou Mapeamento de Cabos.

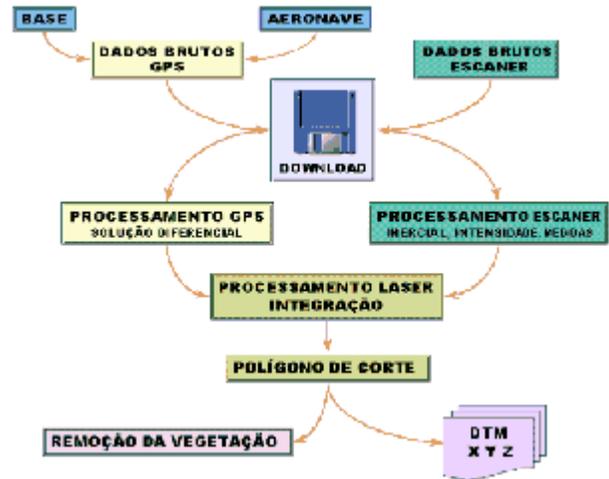


FIG. 11 - FLUXOGRAMA DE PROCESSAMENTO

TAMANHO DOS ARQUIVOS

O volume de dados é dependente da duração do vôo e do tempo em que o sensor LASER está ligado e coletando informações.

Em geral, são necessários 300 MBytes para cada hora de Dados Brutos coletados, relativamente a um aparelho com frequência de operação de 25 kHz, e 2,5 GBytes por hora de vôo após o refinamento e preparação dos dados, relativamente a processamentos específicos como a remoção de vegetação.

Os arquivos de dados GPS normalmente não representam problema de armazenamento, pois cada hora de rastreamento equivale a cerca de 10 MBytes a uma taxa de 1 segundo.

RESULTADOS FINAIS

Com os dados referentes à Calibração e à montagem do sistema, ao posicionamento inercial e à medição propriamente dita, é possível o cálculo de um conjunto de pontos perfilados referenciados ao sistema WGS-84.

O conjunto de pontos pode ser transformado para o sistema de coordenadas local utilizando as fórmulas de transformação de *Datum* usualmente empregadas (por exemplo, fórmulas de *Molodensky*).

Normalmente, o conjunto de pontos apresenta-se como uma "nuvem" cuja distribuição depende do padrão de varredura utilizado. Estes pontos podem ser classificados de acordo com a elevação, com identificação de pontos sobre o terreno e pontos sobre vegetação ou edificações. Nesta etapa, utilizam-se algoritmos de filtragem, que se encontram em contínuo desenvolvimento.

Estes algoritmos podem ser aplicados tanto à "nuvem" de pontos quanto a um conjunto de pontos espaçados regularmente. No segundo caso, existe a possibilidade da influência da interpolação necessária para estabelecer a regularidade do espaçamento no resultado final. Alguns algoritmos para tratamento dos dados em base regular foram desenvolvidos porque em muitos casos de distribuição irregular, os pontos estão concentrados ou dispersos (áreas com vegetação densa) de maneira que o processo de filtragem fica comprometido.

Uma vez que a quantidade de pontos resultante do processamento é muito grande, geralmente este número é reduzido para atender a capacidade de processamento das aplicações comerciais. Neste tipo de aplicação é feita a visualização dos dados e a edição manual, se necessária.

8 CALIBRAÇÃO E ERROS POSICIONAIS

Como em outras metodologias, os erros encontrados em um sistema de Perfilamento a LASER são derivados dos erros de seus componentes, como o próprio emissor do feixe de LASER, a solução GPS e a orientação do SMI (BALTSAVIAS, 1999b).

OBJETIVO

O objetivo da Calibração é confirmar que o sistema está operando de acordo com as suas especificações e tolerâncias de precisão, além de permitir a obtenção de parâmetros de correção de possíveis desvios. Os parâmetros chamados estáticos, que correspondem à Calibração de Laboratório, não serão discutidos neste trabalho. Somente serão tratados os procedimentos de Calibração Dinâmicos, que reproduzem características de operação normal do sistema.

ALVO

O primeiro passo para a Calibração é a escolha e determinação de um alvo terrestre. Este alvo normalmente é um edifício retangular de grande dimensão com teto plano e não reflexivo. Caso o teto do edifício não seja apropriado, um estacionamento ou pátio pode substituir a condição da superfície plana do teto (fig. 12).

Este alvo deve estar bem posicionado espacialmente, permitindo a sua medição por meio de processos convencionais como GPS ou estação total.



FIG. 12 - EXEMPLO DE ALVO DE CALIBRAÇÃO

ERROS POSICIONAIS

O alvo escolhido para Calibração é perfilado em várias direções controladas, com altura de voo constante e parâmetros de perfilagem conhecidos.

Anulando os prováveis erros do GPS (perfilamento em direção oposta), os erros posicionais podem ser atribuídos principalmente aos efeitos de *roll*, *pitch* e *heading*. Os vários padrões de vãos de Calibração permitem conhecer e isolar estes erros.

PITCH E ROLL

Os erros de *roll* & *pitch* são função da sensibilidade dos acelerômetros e causam uma aparente aceleração horizontal que provoca erros de posição. No entanto, este erro dos acelerômetros possui uma espécie de comportamento ("assinatura") que pode ser cancelado com o uso de filtros de processamento (*Kalman filter*).

Os efeitos de *roll*, *pitch* e *heading*, representados por Δr , Δp e Δh nos pontos LASER perfilados, são dados pela eq. 05, onde x' , y' e z' são os pontos LASER transladados das suas posições originais x , y e z .

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \\ z' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\Delta h & \Delta p \\ \Delta h & 1 & -\Delta r \\ -\Delta p & \Delta r & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ y \\ z \end{bmatrix} \quad (05)$$

Assim, convencionando que x é a direção da linha de voo, y é a transversal à linha de voo ou a direção do perfilamento e z é a vertical com sentido positivo em direção ao solo, temos :

$$x' = x - y.\Delta h + z.\Delta p \quad (06)$$

$$y' = y + x.\Delta h - z.\Delta r \quad (07)$$

$$z' = z - x.\Delta p + y.\Delta r \quad (08)$$

Para determinar o erro de *pitch*, o sistema é configurado para um ângulo de abertura igual a zero, ou seja, para o modo perfilamento. Dessa maneira, com $y=0$ na eq. 06, temos o efeito de *pitch* calculado por :

$$x' = x + z.\Delta p \therefore \Delta p = \frac{(x - x')}{z} \quad (09)$$

O erro posicional de *roll* é determinado por meio de um perfilamento onde o pulso mais vertical corresponda a uma das paredes laterais do alvo (preferencialmente a mais extensa). Dessa maneira, o erro do escaner é minimizado uma vez que o eixo de rotação em y é paralelo à linha de vôo. Com $x=0$ na eq. 07, temos o efeito de *roll* calculado por :

$$y' = y - z.\Delta r \therefore \Delta r = \frac{(y - y')}{z} \quad (10)$$

Os erros posicionais de *pitch* e *roll* devem ser avaliados e introduzidos como parâmetros de correção do sistema antes da determinação do erro de *heading*.

HEADING

O valor do *heading* normalmente não é alterado pelos procedimentos da Calibração. Quando um erro de *heading* ocorre, objetos com forma e dimensões conhecidas (por exemplo, edifícios), parecerão estar girados.

O erro de *heading* é observado primeiramente devido à aceleração. Durante um vôo linear e estável de uma aeronave com pouca ou nenhuma aceleração, o erro de *heading* cresce de um determinado valor que depende do "ruído" e sensibilidade do giroscópio. Atingindo um determinado valor, o *heading* é corrigido (fig.13).

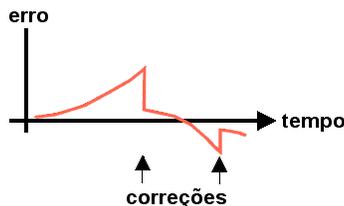


FIG. 13 - ERRO DE HEADING COM CORREÇÕES DE AUTO-ALINHAMENTO

Durante o pós-processamento é usada uma função computacional que reprocessa os dados coletados de *heading*, de maneira a suavizar os erros encontrados relativamente aos auto-alinhamentos realizados durante o vôo pelo próprio equipamento (*Fine Heading Alignment*) (fig. 14).

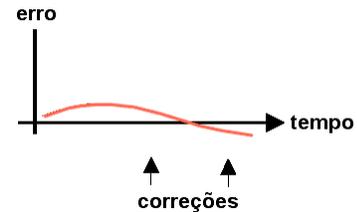


FIG. 14 - ERRO DE HEADING APÓS FUNÇÃO DE SUAVIZAÇÃO

O erro de *heading* é avaliado com a verificação do comportamento dos pulsos finais da linha de perfilamento em combinação com o alinhamento das paredes laterais do alvo utilizado.

Assim, da eq. 06 temos :

$$\Delta h = \frac{(x - x') + z.\Delta p}{y} \quad (11)$$

DETERMINAÇÃO PRÁTICA

O erro de *pitch* é avaliado por meio de vôos sobre o alvo na direção de sua maior extensão e usando o ângulo de abertura igual a 0° permitindo que o sistema opere em modo de perfilamento. Na fig. 15 está representada a determinação do erro de *pitch*.

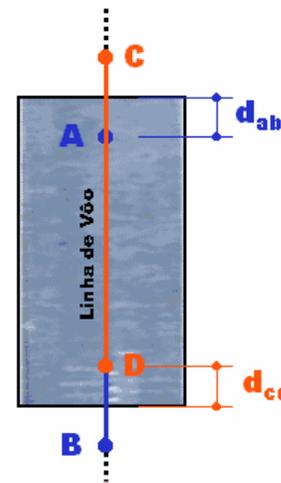


FIG. 15 - ERRO DE *PITCH*

Sendo os segmentos \overline{AB} e \overline{CD} representativos das dimensões do alvo no sentido longitudinal e em direções opostas com relação à linha de vôo, pode-se computar as diferenças em relação à dimensão real do alvo (d_{ab} e d_{cd}).

Usando a eq. 09 e valores de $d_{ab}=0,50m$, $d_{cd}=0,51m$ e altura de vôo $H= 1200m$, o erro posicional de *pitch* pode ser obtido por :

$$\Delta p = \frac{(d_{ab} + d_{cd})}{2.H} = \frac{(0,50 + 0,51)}{2 \times 1200} = \pm 0,4 \text{ mrad}$$

O erro de *roll* é avaliado considerando vôos de perfilamento coincidindo a linha de vôo com o alinhamento lateral do alvo. Neste caso, o ângulo de abertura deve ser diferente de 0°. Na fig. 16, encontra-se representada a determinação do erro de *roll*.

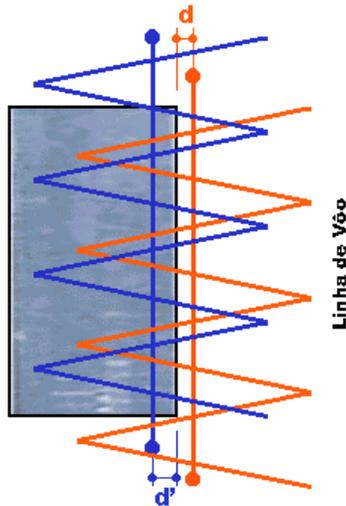


FIG. 16 - ERRO DE *ROLL*

Com os segmentos representativos do alinhamento lateral do alvo no sentido longitudinal e em direções opostas à linha de vôo, pode-se computar as diferenças em relação à dimensão real do alvo (*d* e *d'*).

Usando a eq. 10 e valores de *d*=1,20m, *d'*=1,35m e altura de vôo *H*= 1200m, o erro posicional de *roll* pode ser obtido por :

$$\Delta r = \frac{(d + d')}{2.H} = \frac{(1,20 + 1,35)}{2 \times 1200} = \pm 1,06 \text{ mrad}$$

O valor de *heading* é melhor obtido levando em conta a situação dos pulsos LASER na extremidade da linha perfilada, uma vez que seu efeito é mais evidente à medida que se afasta do centro da linha de perfilamento. A distância do centro da linha perfilada (Nadir) até o último pulso representativo do limite do alvo constitui o valor de *y* (fig. 17).

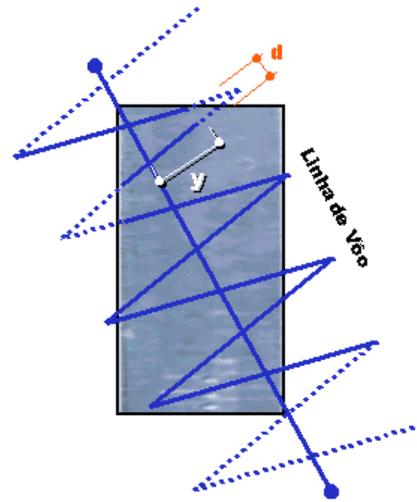


FIG. 17 - ERRO DE *HEADING*

A distância do limite lateral real do alvo até o pulso LASER na extremidade da linha perfilada representa o valor de *d*. Para uma melhor avaliação do valor de *heading* são feitas várias leituras ao longo da linha de vôo e tomada a média destas avaliações.

Usando a eq. 11 e valor de *d*=0,40 m e altura de vôo *H*=1200 m, considerando o erro posicional de *pitch* igual a zero, o erro de *heading* pode ser obtido por :

$$\Delta h = \frac{d}{y} = \frac{0,40}{55} = \pm 7,3 \text{ mrad}$$

CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

Após o processamento dos dados coletados durante os vôos de Calibração, os pontos são importados para um programa de visualização e confrontados com a posição do alvo obtida por meio de medição GPS, sendo determinadas as diferenças para cada componente.

O sistema LASER é calibrado em laboratório para conhecimento dos valores primários de desalinhamento de *roll*, *pitch* e *heading*. Os valores de correção obtidos são reaplicados ao processamento para confirmar o processo corretivo. Constatada a validade dos parâmetros obtidos, estes serão aplicados automaticamente pelo programa de processamento aos levantamentos subsequentes.

Quando o sistema está operando normalmente, os valores de compensação derivados da Calibração no laboratório são aplicados a cada pulso LASER a fim de permitir valores já corrigidos em tempo real. No entanto, para maior precisão, é possível utilizar compensações em modo pós-processado, combinado com a solução diferencial do GPS.

A Calibração de Campo é realizada para comprovar a validade e confiabilidade da Calibração de

laboratório. Frequentemente, os valores de compensação precisam ser ajustados para refletir a realidade da instalação do sistema na aeronave. Com procedimentos pré-determinados para a Calibração de Campo, os valores de compensação são obtidos e comparados aos valores de laboratório. Caso haja necessidade, os valores pré-definidos em laboratório são alterados de acordo com os novos valores obtidos pela Calibração em campo. Os valores de correção somente serão aplicados aos dados obtidos para novos levantamentos se ultrapassarem as tolerâncias estabelecidas pelo fabricante.

Os erros de compensação são interpretados como se a aeronave tivesse movimentos de giro em torno dos eixos posicionais. No entanto, o que de fato está sendo corrigido para fins de orientação, são os possíveis desalinhamentos do SMI em relação ao conjunto ótico.

9 OUTRAS FONTES DE ERRO

ERROS DO PULSO LASER

Em condições normais de operação, o máximo erro esperado em um emissor LASER devidamente calibrado é da ordem de 5 a 7 cm, independentemente da altura de vôo.

As condições atmosféricas afetam o pulso LASER e são significativas à medida que a altura de vôo aumenta. O efeito atmosférico no pulso LASER é condicional ao comprimento de onda usado pelo sistema. A correção para a refração e velocidade do pulso LASER na atmosfera é aplicada com conhecimento da temperatura, da pressão e da umidade no emissor LASER e na região perfilada. Este efeito é minimizado (não eliminado) incorporando um modelo atmosférico aos dados pós-processados.

ERROS INERENTES AO SMI

O conhecimento da correta posição do sensor no espaço é condição necessária mas não suficiente para o cálculo das posições dos pontos LASER. A correta medida dos ângulos posicionais de *roll*, *pitch* e *heading* executada pelo SMI é requerida para determinar a direção de cada pulso LASER em relação à superfície perfilada.

As diferenças resultantes do SMI dependem do fabricante, mas geralmente se encontram na ordem de 1/100°, que a 1.000 m de altura (0,005° para *pitch* e *roll* e 0,008° para *heading*) correspondem a uma qualidade decimétrica semelhante à do GPS.

No pós-processamento diferencial da solução GPS, a precisão de posição de um SMI varia de 5 cm a 30 cm (EMQ - Erro Médio Quadrático)..

A tabela 04 apresenta valores de precisão de um SMI, levando-se em conta condições normais de um levantamento. (MOSTAFA *et al.*, 2001)

TABELA 04 - PRECISÃO DO SMI

	GPS com C/A	DGPS	Pós-processado
Posição (m)	< 10	0,5 – 2,0	0,05 - 0,30
<i>Roll & pitch</i> (°)	0,03	0,03	0,013
<i>Heading</i> (°)	0,10	0,08	0,035

ERROS DE POSICIONAMENTO GPS

O GPS é um componente importante em um sistema LASER, estando diretamente relacionado com a precisão. O GPS está presente na parte aerotransportada levantando a trajetória do sensor e na parte terrestre promovendo a correção diferencial do levantamento (SATALICH, 2001).

Os possíveis erros de posicionamento devido ao GPS podem ser divididos em três categorias :

- **Intrínsecos** - relacionados às frequências L1 & L2, à geometria dos satélites (PDOP - *Positional Dilution of Precision*), ao número de satélites, aos deslocamentos orbitais, ao multicaminhamento, aos erros de propagação do sinal na atmosfera e às interferências eletromagnéticas;
- **Externos** - relativos aos pontos de controle e à modelagem do geóide;
- **Operacionais** - devido à falta de carga nas baterias, à cabos mal conectados, à entrada de parâmetros incorretos e às manobras bruscas da aeronave, que podem interromper o recebimento do sinal GPS no aparelho aerotransportado.

Levando-se em conta que todas as medidas para detectar, eliminar ou reduzir os erros relacionados ao GPS sejam estabelecidas, ainda são necessários para obtenção da precisão requerida:

- um plano de vôo apropriado com bom planejamento de faixas sobre a área de interesse;
- operações de vôo dentro de limites apropriados para evitar perda de sinal dos satélites GPS (mínimo de 5 na janela de trabalho);
- distribuição adequada das estações base no solo com distâncias variando entre 10 e 50 km até o receptor na aeronave.

A maior parte deste erro é devida aos resíduos de atraso da propagação do sinal GPS na Ionosfera que são de baixa frequência e não podem ser removidos por atenuação quando conjugados com os dados inerciais.

ERROS ORIUNDOS DA DIVERGÊNCIA

A característica de reconhecimento dos dados do primeiro e último retorno do pulso LASER pode resultar em pequenas diferenças na interpretação de resultados, especialmente quando a condição de utilização de pulsos com grande divergência ocorrer.

Por exemplo, um pulso com divergência de 0,5 mrad a uma altura de voo de 1.000 m representa um círculo projetado do pulso LASER com diâmetro de 0,5 m. Obviamente, o centro verdadeiro deste pulso LASER estará contido neste círculo projetado.

Na borda de uma edificação, um pulso LASER projetado com esta condição de divergência pode interceptar parcialmente esta borda e parcialmente o solo, permitindo duas informações de retorno para o pulso. O primeiro retorno indicará o ponto sobre a lateral da edificação e o segundo retorno indicará que o pulso atingiu o solo. Consequentemente, se as análises de Calibração forem feitas levando-se em conta um ou outro retorno do pulso ou a própria interpretação de dados definitivos de perfilamento, os resultados podem ficar comprometidos.

Outro fator relacionado com a divergência do pulso LASER é a complexa interação entre a transmissão e a reflexão no objeto perfilado. O sinal retornado será função da dispersão da energia do pulso LASER dentro da área formada pela projeção do ponto no alvo.

Se o alvo perfilado não for ortogonal em relação ao pulso LASER, a mesma situação acima poderá ocorrer, ou seja, apenas parte do pulso LASER atingirá o alvo em questão. Assim, alvos não uniformes com diferenças de reflexão e inclinação significativa em relação à linha perpendicular ao pulso LASER permitem incertezas em relação à posição planimétrica que, por conseguinte, traduzem-se em incertezas posicionais para a altimetria.

ERROS SISTEMÁTICOS OU CASUAIS

Os erros angulares (*pitch* e *roll*) causam erros posicionais que são proporcionais à altura de voo. No entanto, se um determinado erro permanece constante com a variação da altura de voo, uma das causas pode ser a avaliação da excentricidade da antena GPS em relação ao sensor LASER. Esta referência errada pode incutir um erro sistemático ao resultado.

Um erro oriundo do conjunto ótico pode transparecer como um erro posicional de *roll*. Este erro pode ter origem num deslocamento físico do conjunto ótico no interior do sensor LASER, fisicamente originado por uma queda ou batida brusca do equipamento ou pela má avaliação do fator de escala do conjunto ótico.

Se após um processo de Calibração de *roll*, o alvo (ou um elemento de proporções conhecidas) aparenta estar mais largo ou estreito do que a realidade, ao

observar-se o resultado de um perfilamento pode-se considerar que o fator de escala corrompido é o provável motivo desta diferença.

ERROS DESPREZÍVEIS

Outras fontes de erro que contribuem de maneira desprezível perante as outras já descritas, porém existentes, são a imprecisão do tempo de resposta do receptor (Latência); a diferença angular entre o transmissor e o receptor do pulso LASER; e a imprecisão da determinação do ângulo real de cada pulso LASER transmitido e recebido.

10 EXEMPLOS DE APLICAÇÕES

O primeiro objetivo para o uso do Perfilamento a LASER foi o mapeamento de áreas de vegetação. Uma segunda aplicação proposta para este sistema foi o mapeamento de áreas onde a Fotogrametria não era apropriada por não oferecer o contraste e textura necessárias, como por exemplo, em regiões costeiras contendo largas faixas de areia.

No entanto, com a difusão desta nova tecnologia em vários países, seu potencial de aplicação foi comprovado nas mais diversas áreas, tais como:

- **Telecomunicações** - para obtenção de modelos de elevação que permitam estudos de propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras e transmissoras (fig. 18);

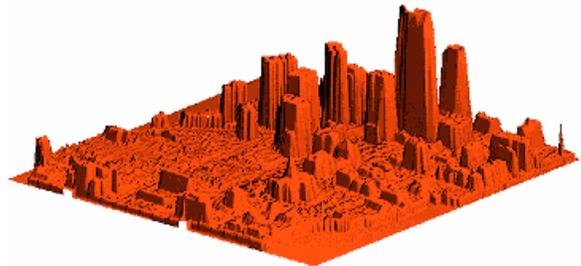
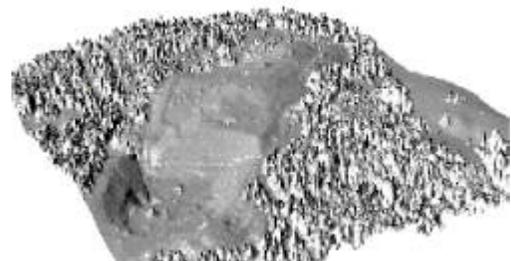


FIG. 18 - APLICAÇÃO EM TELECOMUNICAÇÕES

- **Engenharia Florestal** - para determinação de volumes e alturas da vegetação, estimativa de biomassa, além da remoção virtual de cobertura vegetal (fig. 19);



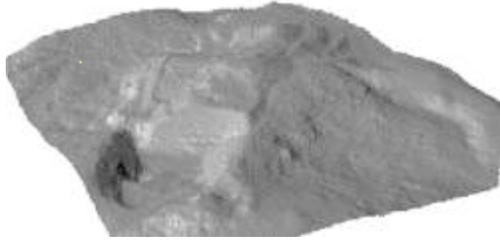


FIG. 19 - APLICAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

- **Modelos 3D Urbanos** - para cálculo de volumes de feições artificiais, corredores urbanos formados por edifícios em vias preferenciais, estudos de micro-clima, propagação de ruídos e poluentes (fig. 20);

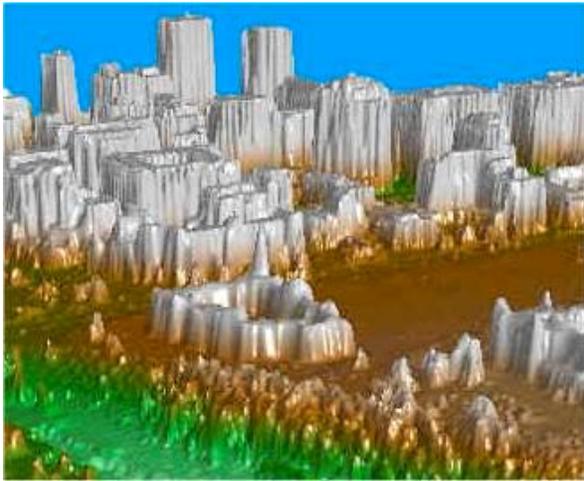


FIG. 20 - APLICAÇÃO PARA MODELAGEM URBANA

- **Mapeamento** - para superfícies com textura homogênea e de pouca definição como areia, banhados ou áreas muito planas e desérticas;
- **Modelos 3D Diversos** - para cálculo de carga hidráulica de barragens em épocas de cheia ou baixa dos reservatórios;
- **Criação de MDT (Modelo Digital de Terreno) ou MDE (Modelos Digitais de Elevação)** - MDTs e MDEs são usados para a retificação diferencial (correção dos deslocamentos de imagem devido ao relevo) na obtenção de ortofotos (fig. 21);

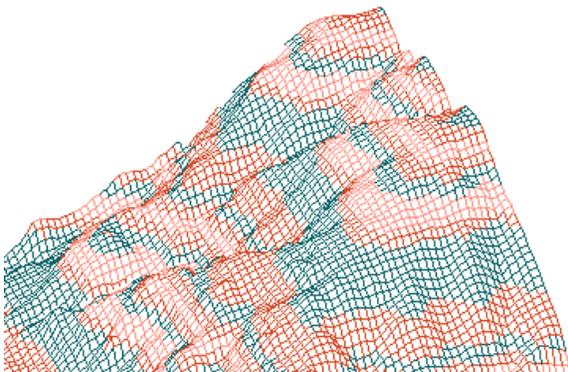


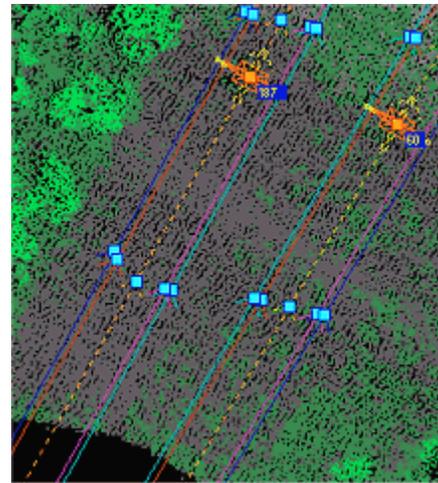
FIG. 21 - APLICAÇÃO PARA OBTENÇÃO de MDT

- **Obras viárias (rodovias e ferrovias)** - para projeto ou para detecção rápida de interferências na faixa de domínio, cálculo de volumes de corte e aterro (fig. 22);



FIG. 22 - APLICAÇÃO EM OBRAS VIÁRIAS

- **Linhas de Transmissão** - para localização da interferência de árvores e outras estruturas na faixa de domínio, posicionamento de torres e modelagem da catenária dos cabos (talvez a mais distinta aplicação, pois a identificação de pequenos objetos como cabos é muito mais difícil na fotografia aérea) (fig. 23);



pontos LASER



imagem

FIG. 23 - APLICAÇÃO EM LINHAS DE TRANSMISSÃO

- **Estudos específicos de corredores** - como o Perfilamento a LASER pode ter sua largura de varredura ajustada, o sistema é mais eficiente na captura e modelagem de faixas estreitas como dutos, estradas de ferro e linhas de transmissão, possibilitando a obtenção de perfis com boa qualidade (fig. 24).

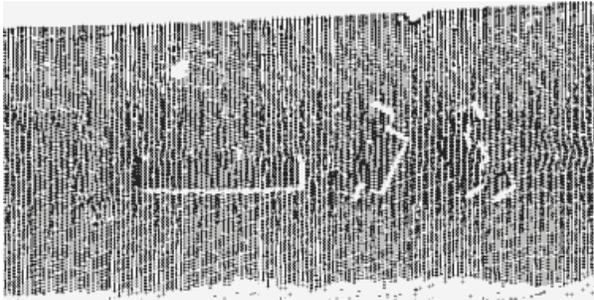


FIG. 24 - APLICAÇÃO EM CORREDORES

11 FOTOGRAMETRIA E LASER

LASER

Desde os primeiros estudos em 1983, um dos objetivos do Perfilamento a LASER vem sendo a obtenção de um conjunto de pontos que representem a forma do terreno perfilado. Durante os últimos cinco anos, aumentou o interesse da comunidade cartográfica em relação ao conhecimento e ao uso mais intenso desta funcionalidade.

O processamento dos dados brutos com algoritmos e procedimentos próprios de cada fabricante, especialmente para o processo que envolve a filtragem e classificação dos pontos LASER, envolve uma tecnologia relativamente nova com influências óbvias nos custos, integração de sistemas e maturidade de métodos.

FOTOGRAMETRIA

A Fotogrametria concentra-se fundamentalmente em processar imagens, sejam em forma digital ou analógica, para obter produtos derivados como Modelos Digitais de Terreno (MDT), imagens retificadas, modelagem 3D para animação ou visualização, além da interpretação de feições naturais e artificiais para aplicações espaciais ou temáticas.

Este processamento de imagens analógicas normalmente é feito por aparelhos restituidores analíticos, em uso há mais de 20 anos, enquanto as imagens digitais são tratadas em Estações Fotogramétricas Digitais (DPW - *Digital*

Photogrammetric Workstation), em uso há menos de 8 anos.

Com o advento da era digital, o embasamento teórico da Fotogrametria, que mantinha conceitos estabelecidos desde sua introdução como ciência, vem passando por uma grande modificação com a extração de informação de imagens digitais baseado em métodos automáticos, como por exemplo, a Correlação de Imagem.

ASPECTOS COMUNS E DIFERENÇAS

As diferenças principais entre Fotogrametria e Perfilamento a LASER estão expressas na tabela 05 (BALTSAVIAS, 1999).

TABELA 05 - DIFERENÇAS ENTRE A FOTOGRAMETRIA E LASER

Fotogrametria	LASER
Sistema Passivo	Sistema Ativo
Sensor linear ou com quadro negativo fixo com geometria de perspectiva	Sensor pontual com geometria polar
Cobertura em área	Informação pontual
Aquisição de informação de forma indireta	Aquisição direta de coordenadas X, Y e Z
Imagens de qualidade geométrica e radiométrica alta	Nenhuma imagem ou de qualidade inferior
Objetos pequenos são de difícil interpretação conforme escala do vôo, não existe imagem abaixo da vegetação ...	Habilidade de posicionamento de objetos de pequenas dimensões, penetração na vegetação ...

Outras diferenças são conseqüência do mencionado na tabela 05 ou dizem respeito à maturidade da tecnologia e ao potencial para desenvolvimento adicional. Do ponto de vista do produto, o Perfilamento a LASER está disponível atualmente somente pelos provedores de serviço devido ao alto investimento no equipamento, enquanto usuários finais vêm utilizando sistemas fotogramétricos, inclusive em computadores pessoais.

Alguns aspectos operacionais são comuns entre a Fotogrametria e o Perfilamento a LASER, tais como:

- **Uso de GPS e SMI** - Para a Fotogrametria, o conjunto GPS e SMI está presente nas coberturas aéreas com determinação do Centro Perspectivo e com Plataformas Inerciais de Correção dos Movimentos da Aeronave. No Perfilamento a LASER, este conjunto é essencial para a

determinação das coordenadas dos pontos resultantes dos pulsos LASER;

- Métodos para processamento dos pontos de um MDT como filtragem de erros grosseiros, remoção de objetos não pertinentes ao conjunto como edifícios, compressão de dados e uso/detecção de linhas estruturais (*breaklines*).

Assim, a integração do sensor e imagem ou do processo digital e análise, são tópicos importantes que unificam as duas tecnologias.

A aplicação principal, comum à Fotogrametria e ao Perfilamento a LASER, é a medida de superfícies 3D e de objetos isolados. No entanto, a ausência de imagem no resultado do Perfilamento a LASER leva à conclusão que a classificação e identificação de objetos sem o uso de um sensor óptico adicional é muito difícil, para não dizer impossível.

Considerando que os dados LASER são compostos somente de coordenadas, é clara a necessidade de imagens que sejam espacialmente e temporalmente referenciadas às medidas LASER como complemento necessário para interpretação dos objetos.

OBTENÇÃO DE UM MDT

A obtenção de um MDT na Fotogrametria pode ser feita por dois processos distintos. O processo chamado Manual consiste na coleta de pontos com uso da Estereoscopia em Aparelhos Restituidores ou Estações Digitais de maneira direta ou indireta.

A maneira direta seria uma leitura de coordenadas de pontos em perfis consecutivos, executada sobre o modelo estereoscópico, a intervalos regulares ou não entre os pontos medidos, estabelecendo assim, um reticulado de pontos.

A maneira indireta seria a obtenção de uma grade regular de pontos extraída de um conjunto de pontos formado pelas curvas de nível, pontos cotados e linhas estruturais (*breaklines*), obtidas por Captação Fotogramétrica.

Devido às características da captação, o processo Manual pode ser seletivo, permitindo o adensamento de pontos em determinadas áreas de interesse e mais espaçamento em outras. O processo Manual também permite uma modelagem explícita de feições lineares como rios, estradas e outros elementos caracterizados como estruturais.

O processo Automático para obtenção de um MDT utiliza os fundamentos da Correlação de Imagem. A Correlação de Imagem é um procedimento de definição de um padrão de imagem em uma imagem digital e a conseqüente identificação de seu correlato na imagem subseqüente, formadoras de um modelo estereoscópico.

É um procedimento altamente redundante processando uma quantidade muito grande de pontos. A exceção é para as áreas com textura de imagem muito homogêneas, onde a identificação dos padrões necessários para a correlação fica comprometida.

O processo Automático só identifica as linhas estruturais de maneira precária e, mesmo assim, sem usar um procedimento seletivo. Normalmente, este método automático tem sua qualidade melhorada com a utilização de linhas estruturais extraídas manualmente das imagens.

O Perfilamento a LASER é considerado um método Automático de obtenção de um MDT, pois guarda características destes procedimentos, como a redundância. A redundância alta de pontos pode ser bastante útil para a melhor modelagem de um objeto, porém, sempre será necessária uma redução no número de pontos.

Caso contrário, o esforço computacional transcende os limites dos equipamentos e programas comerciais existentes. Bons programas comerciais para tratamento de pontos e obtenção de MDT trabalham com uma capacidade de processamento de 40 milhões de pontos para cada 1 GBytes de memória principal. Um sistema de Perfilamento a LASER, com taxa de 25 kHz, produz esta quantidade de pontos em 27 min de operação. Se a aeronave percorre 200 km/h, isto equívale a cerca de 100 km lineares de perfilamento.

MDE E INTERFERÊNCIAS EM UM MDT

Os métodos automáticos como a Correlação de Imagem na Fotogrametria e o Perfilamento a LASER extraem um Modelo Digital de Elevação (MDE) que corresponde ao conjunto de pontos extraídos de um terreno sem levar em conta a extinção de elementos não formadores desta superfície. Já, o Modelo Digital do Terreno corresponde a um conjunto de pontos que representam somente a superfície desejada sem as interferências naturais ou artificiais existentes em uma determinada área.

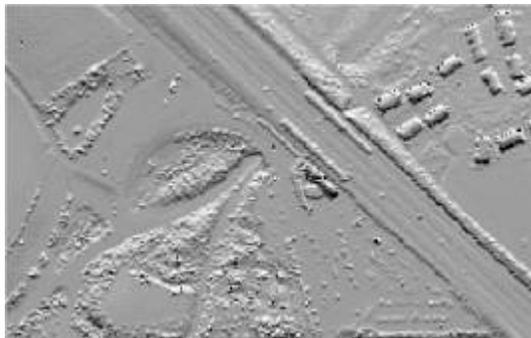
Alguns programas computacionais oferecem a possibilidade de filtrar objetos naturais ou artificiais que não são formadores de um MDT, como edifícios e árvores. O termo filtrar pode ter vários significados. Por um lado pode significar a filtragem (suavização) de erros aleatórios, e por outro, pode representar a filtragem (eliminação) de erros grosseiros, que também é considerada uma classificação (PFEIFER et al, 2001).

A maioria dos processos de filtragem é baseada somente em critérios geométricos, como por exemplo, "erupções" 3D no MDE que tem uma certa área, altura ou inclinação são excluídas. Porém, este procedimento resulta satisfatório somente com elementos isolados ou

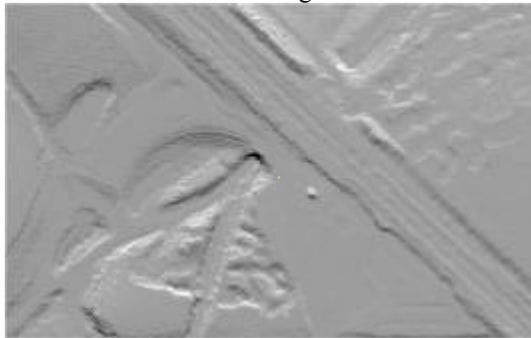
se estes forem a minoria dentro da região processada e estiverem localizados em terreno relativamente plano.

Em terreno acidentado, as particularidades físicas de um terreno como cumes de locais elevados são eliminadas também. Na situação contrária, quando os pontos de solo são a minoria, como por exemplo, em clareiras na vegetação ou vias estreitas em áreas densamente construídas, estes pontos são eliminados em vez das "erupções" não desejadas.

Algumas pesquisas no desenvolvimento de algoritmos inteligentes estão sendo conduzidas, mas uma pesquisa em especial, desenvolvida pelo *Institute of Photogrammetry and Remote Sensing of the Vienna - University of Technology* (I.P.F.), vem apresentando resultados (fig. 25) bem alinhados com a necessidade de automatização deste processo (PFEIFER et al, 2001).



sem filtragem



com filtragem

FIG. 25 - AÇÃO DE ALGORITMO DE FILTRAGEM (PFEIFER et al, 2001)

Outra maneira de identificar a presença de elementos estranhos à composição de um MDT seria o uso de outros atributos de identificação, além da geometria, para conduzir a uma subtração mais completa e precisa destes objetos. Tais atributos incluem a resposta multiespectral, contraste, informação radiométrica das bordas do elemento, textura, sombra, alinhamento, comprimento e orientação.

A extração destes atributos diretamente do resultado do Perfilamento a LASER não é possível, pois tais atributos não são coletados pelo sistema. Esta capacidade de interpretação adicional só é conseguida com o uso de imagens digitais. Mesmo assim, o

processo de identificação e exclusão de elementos que não formam um MDT é muito difícil de automatizar completamente, pois os mesmos critérios de identificação automática devem ser empregados nas imagens que são muito mais complexas em termos radiométricos e geométricos que os dados LASER.

DENSIDADE DE PONTOS NO MDT

A densidade de pontos é um fator importante no que diz respeito à qualidade de um MDT. No processo fotogramétrico, seja Manual ou Automático, este espaçamento pode ser teoricamente tão denso quanto se queira. É óbvio que o custo operacional relacionado à qualidade desejada é fator determinante para um espaçamento ótimo.

No caso da Correlação de Imagem, um espaçamento muito reduzido entre os pontos não faz sentido em função do uso da amostragem de pixels por vizinhança. Assim, o menor espaçamento entre pontos correlacionados na imagem é função do tamanho do padrão de amostragem para a Correlação.

Assumindo como padrão de amostragem um quadrado com 5 x 5 pixels, tendo cada pixel tem 13 μ m (2.032 dpi), teremos um círculo inscrito no padrão com diâmetro de 65 μ m. Assumindo o uso de uma câmara aérea com distância focal 150 mm, o GSD (*Ground Sample Distance* - tamanho dos pixels no terreno) para este padrão, resulta em um espaçamento entre pontos (*esp* em metros) com *H* sendo a altura de voo (eq. 12).

$$esp = \frac{pad}{f} \times H \therefore \frac{0,000065}{0,15} \times H \therefore \frac{H}{2300} \quad (12)$$

No Perfilamento a LASER, o menor espaçamento entre os pontos seria a metade da projeção do pulso no terreno. Adotando a divergência média como 1 mrad, o espaçamento em função da altura de voo (*H*) é de (eq. 13):

$$esp = \alpha \times H \therefore 0,00005 \times H \therefore \frac{H}{2000} \quad (13)$$

Em resumo, as duas tecnologias são equivalentes em termos de densidade possível de pontos para um MDT. Na prática, nem a Captação Manual ou a Correlação de Imagem da Fotogrametria, nem o Perfilamento a LASER, precisam ter um espaçamento tão denso para obtenção de um MDT utilizável (BALTSAVIAS, 1999).

QUALIDADE DOS PONTOS

Os sistemas de Perfilamento a LASER, em geral, apresentam uma precisão altimétrica de 2 a 4 vezes melhor que a planimétrica. Esta relação é válida para

terrenos com inclinação menor que 30%. Algumas pesquisas independentes dos fabricantes mostraram que conforme a inclinação do terreno e o tipo de cobertura (que prejudica a reflexão do pulso), esta relação pode ainda ser muito menor, principalmente pela deterioração altimétrica.

No Perfilamento a LASER em terrenos com inclinação superior a 30% e camada vegetal heterogênea e densa, a componente altimétrica deteriora de 0,5 a 1 m para 1.000 m de altura de vôo (KRAUS et al, 1998).

Por sua vez, a Fotogrametria não permite a definição do terreno em áreas com cobertura vegetal densa, fixando assim uma tolerância de qualidade que equivale à metade da altura média da vegetação existente. Isto pode levar a situações de comprometimento da componente altimétrica, principalmente em áreas florestadas de talwegues acentuados.

Assim, mesmo com a deterioração do Perfilamento a LASER em regiões adversas, estes sistemas são mais confiáveis para obtenção de pontos para um MDT que os processos Manual e Automático da Fotogrametria.

Na Correlação de Imagem, é fácil perceber que os pontos derivados do processo são representativos da vegetação que submeterá os padrões de amostragem. A Correlação em imagens de áreas florestadas é dificultada pela homogeneidade da textura da vegetação. Estes locais de textura homogênea que comprometem o processo normalmente sofrem intervenção manual.

No Perfilamento a LASER, ignorando o efeito da inclinação do terreno e da reflexão do pulso LASER, a qualidade altimétrica esperada apresenta deterioração de valores que varia de 0,5 a 2 cm para cada 100 m de altura de vôo, considerando alturas de vôo típicas (até 1.200 m) e um ângulo de abertura de 30°. Conforme visto anteriormente, este erro não é linear e sim exponencial, aumentando rapidamente com o incremento da altura de vôo.

Na Fotogrametria, os valores tolerados como limites para a precisão de coordenadas de Pontos de Controle Terrestres individuais, em um ajuste de Aerotriangulação, são da ordem de 3 cm ($50 \mu\text{m}/f \times H$) para a planimetria e 2 cm ($30 \mu\text{m}/f \times H$) para a altimetria, a cada 100 m da altura de vôo, assumindo uma distância focal (f) da câmara aérea de 150 mm. O Erro médio Quadrático (EMQ) tolerado para o processo de Aerotriangulação na Fotogrametria é de 15 μm , que corresponde a 1 cm para cada 100 m na altura de vôo.

Os valores para a Fotogrametria e o Perfilamento a LASER assemelham-se, mas diferem no fato de que, na Fotogrametria a qualidade é uniforme sobre a superfície

trabalhada, não variando de maneira diferente nas extremidades desta área.

A comparação anterior refere-se às medidas diretas por processos fotogramétricos manuais (leitura instrumental). A Correlação de Imagem proporciona resultados tão bons quanto os processos manuais. A duplicação do padrão de amostragem não causa deterioração superior a 20% na qualidade final de um MDT, na maioria das superfícies trabalhadas. Normalmente, os erros na Correlação de Imagem são localizados e causados por descontinuidades bruscas na superfície trabalhada.

A preparação de um conjunto de dados com incorporação de linhas estruturais (*breaklines*) e exclusão de áreas problemáticas que podem comprometer o conjunto, são procedimentos comuns que melhoram o resultado final. Com estes cuidados, os resultados incluem erros localizados que requerem pouco tratamento manual. Estes erros localizados são oriundos de imagens com textura homogênea, sombras, diferenças geométricas e radiométricas entre as imagens entre outros. Tais situações não são encontradas no Perfilamento a LASER.

MORFOLOGIA

Mesmo que a qualidade geométrica e a densidade dos pontos de um Perfilamento a LASER sejam altas, a qualidade morfológica do MDT derivado destes pontos nem sempre é satisfatória. Sem levar em conta a não existência de linhas estruturais, a razão principal da filtragem dos dados brutos é reduzir erros provenientes de elementos estranhos a um MDT (edificações, árvores...).

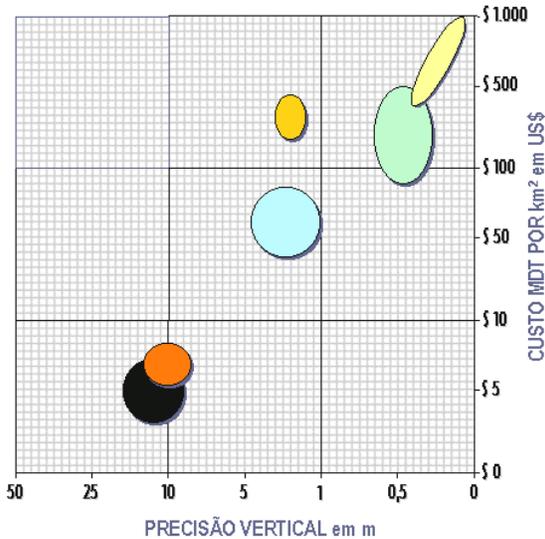
Geralmente, os algoritmos de filtragem aplicados não podem distinguir entre uma reflexão válida ou não. Assim, o uso de imagens aéreas pode ser de grande valia para a interpretação de elementos válidos ou não para a construção de um MDT.

Outra alternativa é o uso do parâmetro Intensidade da Reflexão, disponível em alguns sistemas de Perfilamento a LASER. A intensidade apresenta valores bem distintos para elementos perfilados com características de vegetação e outras feições como rochas, edificações, etc. (KRAUS et al, 1999). Contudo, a obtenção de medidas fotogramétricas manuais ainda é o melhor método para obter alta qualidade de um MDT na questão morfológica, pois a interpretação de feições é direta e em tempo real.

CUSTO X TEMPO

O Perfilamento a LASER, devido a sua aquisição digital de dados e medida direta, propicia a obtenção de um MDT de maneira mais rápida que a Fotogrametria.

Por conseguinte, espera-se que os custos de aquisição sejam inferiores à Fotogrametria (fig. 26).



FONTE	Precisão Vertical	\$ MDT / km ²
Foto Aérea Urbana	0,1 - 0,4 m	US\$ 500 - 1.000
Foto Aérea Rural	1,5 - 2,5 m	US\$ 250 - 450
LASER	0,3 - 0,6 m	US\$ 90 - 500
SAR Aeronave	1 - 4 m	US\$ 40 - 80
SAR Satélite	9 - 13 m	US\$ 3 - 7
SPOT	8 - 12 m	US\$ 5 - 8

SAR - Synthetic Aperture RADAR

FIG. 26 - CUSTOS DE AQUISIÇÃO DE UM MDT POR FOTOGAMETRIA, LASER E OUTROS

Os custos da Fotogrametria são bem conhecidos e, no caso de obtenção de um MDT, são dependentes diretamente da forma do terreno. Assumindo que fotos aéreas teriam uso único e exclusivo para obtenção de um MDT, o custo da Fotogrametria por km² é no mínimo o dobro do Perfilamento LASER.

No caso do Perfilamento a LASER, por tratar-se de uma tecnologia recente e por não possuir um mercado estabilizado, existem muitas interpretações para os preços. Cada provedor de serviço tem meios diferentes de calcular os custos e os preços internacionais variam de US\$ 90 a 500 / km², em função da dimensão da área, densidade de pontos, tipo de pós-processamento, custos extras para mobilização, plataforma, etc. (HAALA, 1999)

12 RESULTADOS

NORMAS INTERNACIONAIS

Os sistemas de Perfilagem a LASER estão sendo continuamente estudados por sub-comitês da ASPRS (*American Society of Photogrammetry & Remote*

Sensing) para definição de normas específicas para Calibração e tolerâncias de resultados encontrados por estes sistemas, visando contribuir para findar as diferentes interpretações existentes em termos de padrões para sistemas LIDAR (*Light Detecting & Ranging*).

Mesmo com o conhecimento da maioria dos fatores intrínsecos aos componentes que afetam a precisão de uma sistema de Perfilamento LASER, a precisão operacional final é geralmente superior às especificadas pelos fabricantes e muito mais difícil de ser definida.

Com relação à precisão, alguns pontos devem ser bem estabelecidos :

- As especificações dos fabricantes são derivadas de análises estatísticas e os valores encontrados são válidos para aproximadamente 68% dos dados (1σ) em uma distribuição normal. Os valores para 90% ($1,6\sigma$) dos pontos ou para 95% (2σ) dos pontos normalmente não são mencionados;
- As especificações de precisão são definidas para toda a largura do perfilamento apesar do fato que a precisão diminui do centro para a borda da largura de perfilagem;
- A precisão é avaliada sem levar em conta a modelagem do geóide;
- As análises de precisão são geralmente feitas por comparação com pontos conhecidos no terreno, mas detalhes deste processo geralmente são omitidos;
- As análises de precisão são focadas nos resultados verticais, enquanto detalhes de comprovação da qualidade planimétrica não são detalhados.

Os resultados obtidos pelos sistemas de Perfilamento a LASER são avaliados desde os primeiros testes de operação. A metodologia de avaliação consiste na comparação do modelo de elevação derivado dos pontos medidos pelo sistema com um modelo de elevação obtido por outros métodos tais como GPS, Fotogrametria ou outros pontos de controle. As diferenças encontradas em um processo comparativo com origens sujeitas a erros deve ser interpretada de maneira especial.

Os sistemas de Perfilamento a LASER são uma ferramenta relativamente nova quando comparada com a Fotogrametria, além de representar um novo conceito na obtenção de pontos de elevação. Os padrões de precisão para mapeamento sempre levaram em conta os processos clássicos da Fotogrametria para garantia da qualidade. Certas situações que podem ser toleráveis para as características do perfilamento a LASER podem não ser admitidas para os atuais padrões de tolerância da Fotogrametria.

PADRÕES DA CARTOGRAFIA NACIONAL

Os atuais padrões da Cartografia Nacional para a classificação de cartas quanto a sua exatidão e que fazem parte do decreto 89.817 de 20/06/84 estão resumidos na tabela 06.

TABELA 06 - CLASSE DE CARTAS
Fonte Decreto 89.817 - 20/06/84 - Instruções Reguladoras de Normas Técnicas da Cartografia Nacional

CLASSE	PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
	PEC	EP	PEC	EP
A	0,5 mm x E	0,3 mm x E	3/5 EQ	2/5 EQ
B	0,8 mm x E	0,5 mm x E	3/5 EQ	2/5 EQ
C	1,0 mm x E	0,6 mm x E	3/4 EQ	1/2 EQ

Onde :

PEC = PADRÃO DE EXATIDÃO CARTOGRÁFICA = 1,6449.EP

EP = ERRO PADRÃO (1σ)

E = escala da carta

EQ = equidistância das curvas de nível

ALTIMETRIA E FATOR C

Na Fotogrametria existe um fator empírico chamado *Fator C* (eq. 14) que é usado para determinar a altura de vôo (*H*) adequada quando uma determinada equidistância de curvas de nível (*Equid*) é desejada.

$$FatorC = \frac{H}{Equid} \quad (14)$$

Os fabricantes de equipamentos fotogramétricos normalmente estabelecem os valores do Fator C de acordo com a precisão dos instrumentos. Estes valores variam de 1.300 para um aparelho analógico como o *Wild B-8* até 2.200 para aparelhos analíticos como *Zeiss Planicom* ou *Intergraph IMA*.

Contudo, a qualidade altimétrica não depende somente do aparelho fotogramétrico, mas também da natureza do terreno, da câmara e sua calibração, da qualidade da imagem e do apoio terrestre. Todas estas condições combinadas podem modificar o valor do *Fator C*.

Para as estações fotogramétricas digitais foi estabelecido um *Fator C* expresso em função da resolução do conjunto filme (em linhas por milímetro) e escaner (em micra) (LIGHT, 1999). A tabela 07 apresenta os valores de *Fator C* para as resoluções de conjunto.

TABELA 07 - FATOR C PARA ESTAÇÕES FOTOGAMÉTRICAS DIGITAIS

Filme l/mm	Escaner μm	Resolução Conjunto l/mm	Fator C Digital
40	11	37	1.200
	25	28	914

80	9	65	2.133
	11	60	1.920
	25	36	1.129

Na tabela 08, usando a altura de vôo correspondente às Coberturas Aerofotogramétricas na escala 1:5000 e 1:8000, com distância focal da câmara de 150 mm e com os valores do *Fator C* para os aparelhos fotogramétricos atualmente em uso, sejam analógicos, analíticos ou digitais, pode-se avaliar a equidistância entre curvas de nível mínima admissível, para cada uma das situações, usando a eq. 15.

TABELA 08 - EQUIDISTÂNCIA MÍNIMA PARA CURVAS DE NÍVEL

Altura M	Aparelho	Fator C	Equidistância Calc (arred) m
750	Analógico	1.300	0,57 (1,00)
	Analítico	2.200	0,34 (0,50)
	Digital 1	914	0,82 (1,00)
	Digital 2	2.133	0,35 (0,50)
1.200	Analógico	1.300	0,92 (1,00)
	Analítico	2.200	0,54 (1,00)
	Digital 1	914	1,31 (2,00)
	Digital 2	2.133	0,56 (1,00)

Pelo *Fator C* ser um valor empírico, as equidistâncias mínimas são arredondadas para o valor múltiplo imediatamente superior.

COMPARAÇÃO RESULTADOS X NORMAS

Levando-se em conta somente a tolerância estabelecida pela legislação, num mapeamento, a qualidade altimétrica é dependente da equidistância das curvas de nível. É sabido que vários fatores contribuem para esta qualidade além do *Fator C*. Entre os principais fatores estão um bom apoio de campo, resíduos compatíveis com a tolerância altimétrica em uma Aerotriangulação e, principalmente, o nivelamento de um modelo estereoscópico e a acuidade do operador na captação Fotogramétrica. Para a Fotogrametria Digital, a obtenção da altimetria usando Modelos Digitais de Terreno (MDT) baseados em processos de Correlação de Imagem ou Captação Fotogramétrica são condicionantes para a qualidade altimétrica final.

A qualidade planimétrica na Fotogrametria é dependente de uma gama de fatores que envolvem a escala da cobertura, o Poder Resolutivo do filme aéreo, a geometria do Apoio de Campo, os resíduos da Aerotriangulação e as características da Captação Fotogramétrica tais como resíduos de orientação do modelo estereoscópico e acuidade do operador. No caso

da Fotogrametria Digital, os cuidados necessários na execução de uma Aerotriangulação Digital, o Poder Resolutivo do escaner e o algoritmo de Retificação Diferencial, no caso de obtenção de imagem digital, são fatores a considerar na avaliação da qualidade planimétrica.

A tabela 09 apresenta a tolerância estabelecida pela legislação para um mapeamento na escala 1:1.000 e 1:2.000, correspondentes respectivamente às alturas de voo de 750m e 1.200m e equidistância de curvas de 1 m, .

TABELA 09 - VALORES DE TOLERÂNCIA PLANIMÉTRICA E ALTIMÉTRICA PARA MAPEAMENTO

		PLANIMETRIA		ALTIMETRIA	
ALT m	CLS	PEC	EP	PEC	EP
750	A	0,50 m	0,30 m	0,60 m	0,40 m
	B	0,80 m	0,50 m	0,60 m	0,40 m
	C	1,00 m	0,60 m	0,75 m	0,50 m
1.200	A	1,00 m	0,60 m	0,60 m	0,40 m
	B	1,60 m	1,00 m	0,60 m	0,40 m
	C	2,00 m	1,20 m	0,75 m	0,50 m

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 $1/1.000 \times H$ a $1/2.000 \times H$ onde H é a altura de voo. Assim, a qualidade planimétrica esperada para uma altura de voo de 750 m seria de 0,38 a 0,75 m e para uma altura de voo de 1.200 m, seria de 0,60 a 1,20 m., sendo estes valores válidos para 68% (1σ) dos pontos testados. (BALTSAVIAS, 1999a)

A qualidade vertical é menor que 0,15 m para cerca de 68% destes pontos. Para 90% dos pontos testados, a precisão vertical é menor que 30 cm. Estes valores foram obtidos para uma altura de voo de 1.000 m.

Um estudo sobre as várias fontes de imprecisão e sua influência na qualidade dos pontos LASER, ignora os erros de calibração e de pós-processamento GPS e SMI. Também assume que o terreno perfilado é plano e que os ângulos posicionais são zero. Assim, as únicas variáveis que intervêm na qualidade do perfilamento são a altura de voo e o ângulo de abertura do perfilamento. Na fig. 27 encontra-se a relação entre o sistema de coordenadas do LASER e o espaço objeto no qual baseia-se este estudo. (BALTSAVIAS, 1999b)

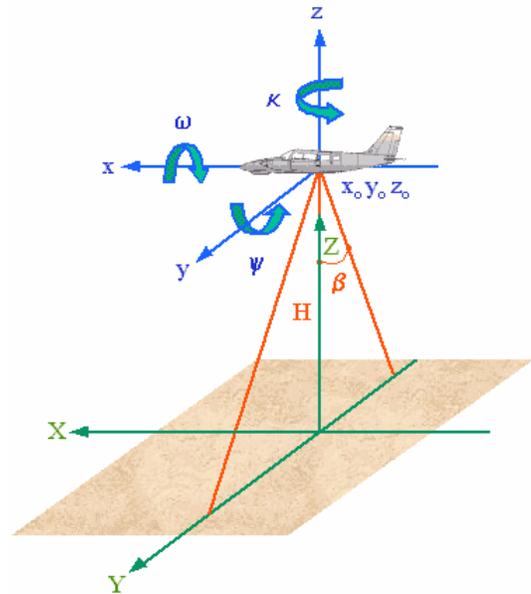


FIG. 27 - RELAÇÃO ENTRE SISTEMA LASER E O ESPAÇO OBJETO

Os movimentos de rotação ao redor dos eixos x , y e z do sistema LASER são dados por $\Delta\omega$, $\Delta\psi$ e $\Delta\kappa$ respectivamente. $\Delta\beta$ é a variação do ângulo de abertura do perfilamento em relação à vertical. ΔR corresponde ao possível erro na medida direta do LASER, que normalmente acontece por problemas inerentes ao sensor. Os valores de Δx_0 , Δy_0 e Δz_0 correspondem aos deslocamentos de origem do pulso LASER.

Na tabela 10, foram usados valores possíveis de serem encontrados nos sistemas LASER para avaliar sua influência nas coordenadas finais de um ponto LASER. Assim, $\Delta\omega = \Delta\psi = 0,03^\circ$, $\Delta\kappa = 0,04^\circ$, $\Delta\beta = 0,02^\circ$, $\Delta R = -5\text{cm}$ e $\Delta x_0 = \Delta y_0 = \Delta z_0 = 8\text{cm}$.

TABELA 10 - INFLUÊNCIA DE VÁRIAS FONTES DE ERRO NAS COORDENADAS X,Y,Z

H = 750 m						
Erro	ΔX (cm)		ΔY (cm)		ΔZ (cm)	
Ângulo	0°	20°	0°	20°	0°	20°
$\Delta\omega$	0	0	39	39	0	-14
$\Delta\psi$	-39	-39	0	0	0	0
$\Delta\kappa$	0	19	0	0	0	0
$\Delta\beta$	0	0	26	26	0	-10
ΔR	0	0	0	2	5	5
Δx_0	8	8	0	0	0	0
Δy_0	0	0	8	8	0	0
Δz_0	0	0	0	0	8	8
EMQ	40	44	48	48	9	20

H = 1.200 m						
Erro	ΔX (cm)		ΔY (cm)		ΔZ (cm)	
Ângulo	0°	20°	0°	20°	0°	20°

$\Delta\omega$	0	0	63	63	0	-23
$\Delta\psi$	-63	-63	0	0	0	0
$\Delta\kappa$	0	31	0	0	0	0
$\Delta\beta$	0	0	42	42	0	-15
ΔR	0	0	0	2	5,0	5
Δx_0	8	8	0	0	0	0
Δy_0	0	0	8	8	0	0
Δz_0	0	0	0	0	8	8
EMQ	63	70	76	76	9	29

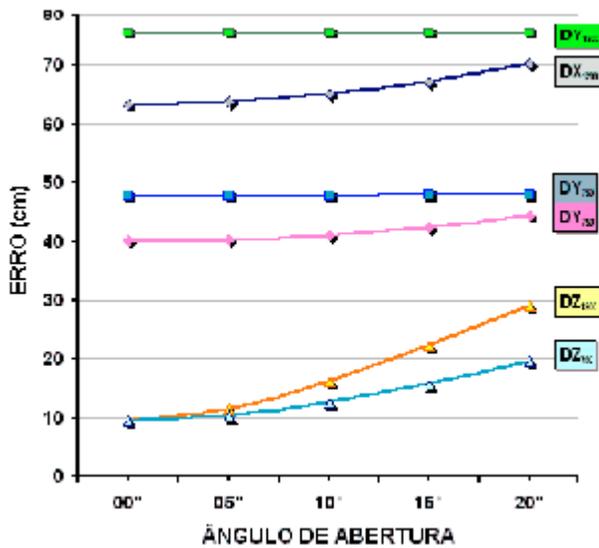


FIG. 28 - GRÁFICO DE ERROS EMQ X ÂNGULO DE ABERTURA X ALTURA DE VÔO

Os valores podem ter variações significativas com relação ao erro esperado para Z (ΔZ) e ao pressuposto que o terreno perfilado é plano. O terreno inclinado causa um aumento significativo no erro esperado em Z devido ao incremento no erro da medida ΔR (BALTSÁVIAS, 1999b). Um ângulo de abertura maior significa maior dificuldade de penetração do pulso LASER na vegetação devido a sua inclinação e reflexões não controladas.

Algumas conclusões podem ser extraídas da tabela 09 e da figura 28:

- Os erros de medida tem pouca influência quando comparados com outras fontes, além de interferir diretamente na qualidade da altimetria (Z);
- ΔZ não aumenta linearmente com a variação da altura de vôo e do ângulo de abertura pequeno porque o erro de medida ΔR e de deslocamento da origem Δz_0 são significativamente mais influentes para o EMQ. ΔZ aumenta substancialmente e deteriora-se mais rapidamente que ΔX e ΔY para ângulos de abertura grandes e maior altura de vôo. Esta particularidade é importante quando se leva em conta uma maior altura de vôo e uma maior abertura para o perfilamento em busca de maior produtividade;

- Independentemente do ângulo de abertura β , ΔX e ΔY crescem proporcionalmente à altura de vôo H ;
- O erro ao longo da perfilagem é pouco superior ao erro ao longo da linha de vôo, especialmente para pequenos ângulos de abertura β e grande altura de vôo H ;
- ΔX e ΔY deterioram-se muito mais que ΔZ quanto menor for o ângulo de abertura β e quanto maior for a altura de vôo H .

ÁREAS FLORESTADAS

A avaliação da precisão altimétrica (σ_z) dos pontos LASER em função da inclinação do terreno em áreas florestadas também foi avaliada por pesquisadores (KRAUS, 1999). Na eq. 15 σ_z é dado em cm e α é a inclinação do terreno em graus.

$$\sigma_z = \pm(10 + 120 \times \tan \alpha) \quad (15)$$

A validação da fórmula acontece desde que haja uma taxa de penetração mínima de 25% dos pulsos LASER e que a distribuição entre pontos LASER oriundos do primeiro pulso e último pulso seja homogênea.

A dependência entre a qualidade altimétrica em áreas florestadas e a inclinação do terreno deve-se a alguns fatores :

- Em áreas mais íngremes, as superfícies topográficas são menos definidas que em áreas planas;
- Também em terrenos íngremes, os erros do conjunto GPS e SMI têm influência significativa na componente altimétrica (BALTSÁVIAS, 1999b).

RESULTADOS PRÁTICOS

CASO 1

No continente australiano (*North Stradbroke Island*), um MDT foi gerado com a finalidade de auxiliar um projeto de irrigação que abrangia uma área com vegetação densa (fig. 29) suficiente para impedir o uso de Fotogrametria ou GPS no seu modo RTK (*Real Time Kinematic*). O uso do Perfilamento a LASER foi recomendado, mas não estava bem claro como os pontos LASER definiriam o terreno abaixo desta vegetação.

Tal comportamento pode ser avaliado pela existência de Cobertura Aérea com posterior determinação de um MDT, realizada logo após um incêndio ocorrido no local e que expôs boa parte terreno abaixo da vegetação.

A precisão do MDT produzido pelo Perfilamento a LASER foi avaliada em 556 pontos fotogramétricos. A taxa de penetração dos pulsos LASER foi da ordem de 20% o que resultou em um espaçamento médio entre os

pontos no terreno de 3,2 m, um pouco além do dobro proposto pelo Sistema de Perfilamento a LASER que era de 1,4 m.



FIG. 29 - DENSIDADE DA VEGETAÇÃO

O erro padrão de 0,30 m encontrado (tab. 11) tem a contribuição de várias fontes diferentes, incluindo:

- Erros do Perfilamento a LASER (nominal 0,15m para 1.000 m de altura de voo);
- Erros do Processo Fotogramétrico;
- Erros de interpolação devido ao maior afastamento entre os pontos em função da penetração;
- Mudanças ocorridas no terreno entre os dois processos devido às operações de combate ao fogo;
- Resíduos de vegetação (troncos e outros elementos de porte).

TABELA 11 - RESULTADOS EMQ DE PERFILAMENTO EM ÁREA FLORESTADA

	Diferenças em m
Mínima	-0,82
Máxima	+0,79
Média	0,01
EMQ	0,28

A comparação mostrou que não havia nenhuma diferença significativa entre as duas superfícies. A forma do terreno era bem parecida nas duas técnicas, com o resultado fotogramétrico oferecendo curvas de nível com desenho mais suave, mas não necessariamente mais preciso.

A precisão dos pontos do Perfilamento a LASER, inclusive com erros associados à interpolação e apesar da densidade de vegetação no local, foi estimado em 0,25 m (eq. 16) e após extração do erro do apoio fotogramétrico estimado em 0,12 m.

$$\sqrt{EP_L^2 - EP_F^2} = \sqrt{0,28^2 - 0,12^2} = 0,25 \quad (16)$$

Ao comparar um perfil longitudinal obtido de cada um dos MDT, constatou-se que os erros de classificação dos objetos pertinentes ao não tratamento de rugosidades provenientes dos resíduos da vegetação representaram a maior contribuição para a precisão alcançada (fig. 30).

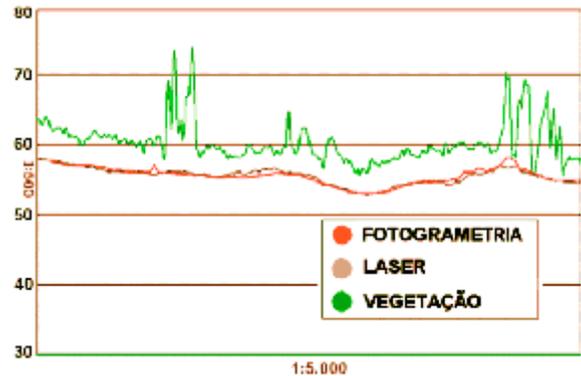


FIG. 30 - EXTRATO DO PERFIL

CASO 2

Outra comparação de resultados de MDT obtido a partir do Perfilamento a LASER foi executada pelo *Institute of Photogrammetry and Remote Sensing - Vienna University of Technology* na cidade de Viena.

O objetivo era utilizar um algoritmo de filtragem desenvolvido por pesquisadores do Instituto nos objetos do tipo vegetação e edificação, determinando a qualidade dos dados. Assim, em 2000, o Departamento Municipal de Viena determinou coordenadas de 816 pontos de verificação na região. A área de teste teve um tamanho de 2,5 km². Os resultados apresentaram-se satisfatórios para a proposição de qualidade do MDT (tab. 12).

TABELA 12 - RESULTADOS EMQ E DESVIO PADRÃO DE MDT DERIVADO DE PERFILAMENTO APÓS USO DE FILTRAGEM (REGIÃO URBANA)

Descrição da região	EMQ cm	DP cm
Geral	± 10,5	± 7,1
Vegetação densa	± 14,5	± 11,1
Vegetação Média	± 11,4	± 7,8
Área aberta	± 8,6	± 4,5
Via com carros estacionados	± 9,2	± 3,7
Via sem obstruções	± 2,4	± 1,0

CASO 3

Uma das maiores usuárias de sistemas de Perfilamento a LASER nos Estados Unidos, a empresa *Airborne 1* (Los Angeles, CA) vem obtendo, em serviços realizados, a precisão vertical em torno de 10

cm para 68% dos pontos testados (tab. 13). Em termos planimétricos, a tolerância de $1/2.000 \times H$ vem sendo encontrada e muitas vezes melhorada.

TABELA 13 - RESULTADOS EMQ DE PERFILAMENTO

SERVIÇOS					
	1	2	3	4	5
Altura Vôo (m)	762	915	610	915	915
Pontos LASER	20M	150M	150M	50M	100M
Área (km ²)	13	103,5	26	13	26
Pontos Controle	400	4.500	90	90	150
Diferenças de h em m					
	1	2	3	4	5
Mínima	-0,18	-0,42	-0,04	-0,26	-0,12
Máxima	+0,12	+0,36	+0,02	+0,16	+0,11
Média	-0,02	0,01	0,00	-0,01	-0,01
EMQ	0,05	0,12	0,01	0,09	0,04

13 CONCLUSÃO

Os sistemas de Perfilamento a LASER tem um alto potencial a ser explorado. É uma nova tecnologia com uma grande margem para futuros desenvolvimentos, especialmente nos algoritmos de geração dos modelos digitais e nos componentes do sistema com maior capacidade de varredura (altura de vôo, taxa de repetição, etc.), permitindo avanços na capacidade de identificação e classificação de objetos.

No campo da utilização, muitos estudiosos estão desenvolvendo pesquisas de extração automática de feições (MURAKAMI et al, 1999 & BRENEER, 1999) usando as características bem marcantes que o Perfilamento a LASER proporciona nos modelos de elevação.

Os sistemas de Perfilamento a LASER atendem as tolerâncias estabelecidas pelo mapeamento convencional quanto à qualidade planimétrica e apresentam melhores resultados que as tolerâncias altimétricas estabelecidas.

Deve-se levar em conta que alguns fabricantes estabelecem que as condições de qualidade nominal para seus produtos são conseguidas em condições normais de operação e para superfícies planas onde a reflexão do pulso LASER não é comprometida.

Alguns fabricantes consideram os sistemas de Perfilamento a LASER instrumentos de medição direta como os distanciômetros. Assim, a precisão de seus aparelhos deve ser avaliada por outros métodos e não por comparação com processos fotogramétricos.

Contudo, pela característica que o produto final decorrente do Perfilamento a LASER apresenta, ou seja, uma malha de pontos no espaço tridimensional, um dos poucos modelos de comparação existentes vem a ser um Modelo Digital de Terreno, que é sobretudo um produto fotogramétrico. Assim, outras análise de qualidade não seriam tão reveladoras.

O Perfilamento a LASER realmente agrega grande valor aos processos fotogramétricos no instante que permite que tarefas mais onerosas e mais demoradas como a modelagem do terreno sejam realizadas com mais eficiência e rapidez. Contudo, o Perfilamento a LASER não é um substituto da Fotogrametria, uma vez que somente resolve parte do problema do mapeamento. A fotografia aérea ainda é um elemento de substancial importância (senão essencial) para o produto fotogramétrico, seja na identificação ou na visualização de elementos e isto, o Perfilamento a LASER ainda não substitui.

Esta dependência que os sistemas de Perfilamento a LASER tem da Fotogrametria é tão marcante que, dos cerca de 40 provedores da tecnologia no ano de 2000, apenas um deles não tinha envolvimento com as áreas de Fotogrametria, Levantamentos ou Mapeamento. Por isso, espera-se que as maiores contribuições para o desenvolvimento e aprimoramento desta tecnologia partam sempre dos Fotogrametristas.

14 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACKERMANN, Friedrich, 1999 - *Airborne LASER Scanning: present status and future expectations* - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 64-67

BALTSAVIAS, Emanuel P., 1999 - *A comparison between Photogrammetry and LASER scanning* - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 83-94

BALTSAVIAS, Emanuel P., 1999a - *Airborne LASER Scanning: existing systems and firms and other resources* - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 164-198

BALTSAVIAS, Emanuel P., 1999b - *Airborne LASER Scanning: basic relations and formulas* - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 199-214

BEHAN, Avril, 2000 - *On the Matching Accuracy of Rasterised Scanning Laser Altimeter Data* - IAPRS Volume XXXIII, Amsterdan

BRENNER, C., 1999 - *Acquisition of 3D City Models* - 47th Photogrammetric Week Tutorial - Algorithms and Automation of Photogrammetric Image Data Processing, Stuttgart

CARTER, W., E. Medvedev, R. Guierrez, 1998 - *Engineering Applications of Airborne Scanning LASERS : Reports from the Field* - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing - Highlights section - April 1998

CUDDY, M., 1999 - *Flying Higher Working Faster* - EOM Magazine July 1999

FLOOD, Martin, 2001 - *Eye Safety Concerns in Airborne Lidar Mapping* - ASPRS 2001 Proceedings, St. Louis-Missouri

FOWLER, R., 2000 - *LIDAR for Flood mapping* - EOM Magazine July 2000

GUTELIUS, B., M. Flood, 1997 - *Commercial Implications of Topographic Terrain Mapping using Scanning Airborne LASER Radar* - Photogrammetric Engineering & Remote Sensing - Highlights section - April 1997

HAALA, N., 1999 - *Surface Reconstruction - Digital Elevation Models* - 47th Photogrammetric Week Tutorial - Algorithms and Automation of Photogrammetric Image Data Processing, Stuttgart

HAALA, N. and Brenner, C., 1999b - *Extraction of Buildings and Trees in Urban Enviroments* - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 130-137

HANSEEN, Jamie, D. Jonas 1998 - *Airborne LASER scanning or Aerial Photogrammetry for Mine Surveyor* - AAM Surveys PTY Ltd., Australia

HUBER, J.K., B.M. Abukhodair, J. Dow, 2000 - *Introduction of Aerial Based and LASER Scan Topographics Survey for Use in Pipeline Route Selection* - 2000 International Pipeline Conference - Vol 1 - ASME 2000 - Calgary, Canada

KIEMA, J. B., H. P. Bähr, 2001 - *Fusion of Colour Infrared Imagery and Arborne Laser Scanning Data in the Automatic Classification of Urban Enviroments* - Revista Brasileira de Cartografia 52, pp 29-36

KRAUS, Karl, N. Pfeiffer, 1998 - *Determination of Terrain Models in Wooded Areas with Airborne Laser Scanner Data* - ISPRS Journnal 53, pp. 193-203

KRAUS, K., W. Wolfgang Rieger, 1999 - *Processing of LASER scanning Data for Wooded Areas* - 47th Photogrammetric Week Proccedings, pp 221, Stuttgart

LIGHT, Donald L., 1999 - *C-Factor for Softcopy Photogrammetry* - Photogrammetry Engineering and Remote Sensing Vol 65 number 6, pp. 667-669

MOSTAFA, Mohamed M.R., J. Hutton, 2001 - *Direct Positioning and Orientation Systems - How do they work ? What is the attainable accuracy ?* - ASPRS 2001Proceedings, St. Louis-Missouri

MURAKAMI, H., K. Nagakawa, H. Hasegawa, T. Shibata, E. Iwanami, 1999 - *Change Detection of Buildings using an Airborne Laser Scanner* - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 148-152

PFEIFER, Norbert, P. Stadler & C. Briese, 2001 - *Derivation of Digital Terrain Models in the SCOP++ Environment* - OEEPE Workshop on Airborne Laser scanning and Interferometric SAR for Digital Elevation Models, Stockholm

SATALICH, Jay, 2001 - *Error Sources in Airborne GPS Positioning Techniques* - ASPRS 2001 Proceedings, St. Louis-Missouri.

SHRESTHA, R., W. Carter, 1998 - *Instant Evaluation of Beach Storm Damage using Airborne Laser Terrain Mapping* - EOM Magazine March 1998.

WEHR, Aloysius, U. Lohr, 1999 - *Airborne Laser Sacnning* - ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing 54, pp. 68-82

WEVER, Christian & J. Lindemberger, 1999 - *Experience of 10 years of LASER Scanning* - Schriftenreihe des Institute für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, pp. 125-132

- ,1998 - *The Fundamentals of Digital Photogrammetry Doc Vr. 2.0/PW* - I.S.M. International Systemap Corp.

- , 2000 - *Laser Cartography - Complex Aerial Survey for Geoinformation Support of Power Lines Designing and Other Topography Works* - Opten Ltd. & Altex Technology S.A., 23 pp

- , 2001 - *LIDAR Accuracy - an Airborne 1 perspective* - Airborne 1 Notes 01.15.01, 24 pp

15 REFERÊNCIAS NA INTERNET

GERAIS

The Laser Adventure - Rami ARIELI

Livro on-line contendo conceitos genéricos sobre LASER e suas aplicações

<http://www.phys.ksu.edu/perg/vqm/laserweb/index.htm>

Industry Directory

Fonte de referência para a tecnologia patrocinada pela empresa Airborne 1

<http://www.airbornelasermapping.com/ALMDirectory.html>

LIDAR (Light Detection And Ranging) Tutorial
Explicação sobre os três tipos básicos de sistemas LIDAR.
http://www.ghcc.msfc.nasa.gov/sparcle/sparcle_tutorial.html

LIDAR.com
Site genérico sobre os conceitos de LIDAR (Light Detection And Ranging).
<http://www.lidar.com/index.htm>

International LIDAR Mapping Forum
Posição atual da indústria de ALS e apresentação das normas e tolerâncias da tecnologia propostas pela ASPRS (*American Society of Photogrammetry & Remote Sensing*).
<http://www.lidarmap.org/index.html>

FABRICANTES

Applanix
Empresa fabricante de Sistemas de Medição Inercial para câmaras aéreas e sistemas de Perfilamento a LASER.
<http://www.applanix.com/>

LaserOptronix
Empresa sueca que produz sistemas LASER de vários tipos inclusive aerotransportados.
<http://www.laseroptronix.com/>

SAAB Survey Systems
A Saab Survey Systems AB é uma companhia sueca que produz o sistema Saab TopEye
<http://www.combitech.se/survey/>
<http://www.topeye.com/>

Optech Inc.
Empresa líder na fabricação e comercialização de Sistema de Perfilamento a LASER do tipo ALTM e SHOALS (Perfilagem de terreno e Batimetria).
<http://www.optech.on.ca/>

Toposys
Empresa fabricante de Sistema de Perfilamento a LASER do mesmo nome.
<http://www.toposys.com/>

Azimuth
Empresa fabricante de Sistema de Perfilamento a LASER AeroScan.
<http://www.azimuthcorp.com/>

PESQUISA

Delft University of Technology - Airborne Laserscanning Research Projects
Pesquisas da Seção de Fotogrametria e Sensoriamento Remoto da Faculdade de Engenharia Civil e Geociências da Delft University of Technology

<http://www.geo.tudelft.nl/frs/laserscan/index.html>

Mississippi State University - Aplicações LIDAR na área florestal
Pesquisas na aquisição de dados florestais com combinação de métodos.
<http://www.cfr.msstate.edu/forestry/SITL/lidar.htm>

LIDAR Remote Sensing of Land and Sea
Página de grupo de interesse que se propõe a ser a plataforma para troca de informação entre pessoas interessadas em mapeamento da superfície terrestre, Oceanografia, Sensoriamento Remoto e outras disciplinas..
<http://las.physik.uni-oldenburg.de/projekte/earsel/>