

Comissão Técnica: Fotogrametria
O USO DE SENSOR LASER AEROTRANSPORTADO EM ÁREAS
URBANAS: OS RESULTADOS OBTIDOS EM SÃO PAULO.

Márcio Miguel Tavares

Silas Sallem Filho

Elizabeth Bugalski de Andrade Peixoto

Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S.A.

Rua Dr. Reynaldo Machado, 1151.
Prado Velho, Curitiba, Paraná, Brasil.
CEP 80.215 – 010
info@esteio.com.br

RESUMO

O uso de sensores laser aerotransportados, para levantamentos de dados altimétricos voltado para as mais diversas aplicações, já está consolidado em todo o mundo. A evolução dos equipamentos tem sido significativa, com maior capacidade de captação de dados, potencialidades operacionais e diferentes modelos.

Os resultados obtidos com o uso do sensor laser, tanto em relação à precisão dos dados como na quantidade de pontos para a definição da superfície terrestre, tem sido difundido junto à comunidade cartográfica de forma ampla, no sentido de validar este uso. Contudo, ainda havia questões sobre sua aplicabilidade, principalmente no que se refere à captação de dados com determinadas características de ocupação, como áreas com cobertura vegetal e densamente urbanizadas.

Algumas destas questões foram discutidas durante o mapeamento digital do município de São Paulo, antes do uso do sensor laser para o levantamento altimétrico de uma parte do município, devido as suas características de relevo e ocupação. Naquele momento, já existiam dados altimétricos e estudos em áreas semelhantes, que balizaram as discussões, bem como o planejamento para a realização do levantamento no município de São Paulo.

O levantamento com o sensor laser no município de São Paulo foi realizado em uma pequena parcela da zona central, bem como em toda a zona sul do município. Nestas áreas mapeadas, foram observadas regiões com densa urbanização vertical e horizontal, áreas de ocupação irregular, as quais também foram objeto de restituição altimétrica por fotogrametria digital.

Complementando os dados que permitiram a verificação da qualidade altimétrica do sensor laser e da altimetria da fotogrametria digital, além de uma rede de marcos densamente implantada ao longo do município, foi determinado em campo um conjunto de pontos de controle para a validação do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) e pontos de verificação (check-point), utilizados para verificação dos dados captados pelo sensor laser.

Este conjunto de informações permitiu avaliar as taxas de penetração dos pulsos laser em regiões densamente urbanizadas, com o objetivo de gerar modelos digitais do terreno e curvas de nível, avaliar os processos de captação de dados altimétricos com o sensor laser e com a fotogrametria digital, bem como verificar a precisão do mapeamento, a partir da verificação com os pontos de controle medidos em campo.

Os resultados obtidos validaram o planejamento apoiado nos dados anteriormente captados de áreas semelhantes, bem como o uso do sensor laser em regiões com características únicas como essas do município de São de Paulo, densamente urbanizadas.

PALAVRA-CHAVE: Laser, Áreas Urbanas, MDT.

ABSTRACT

The use of Airborne Laser Scanning (ALS) for vertical data surveys in most common mapping products is already consolidated all over the world. The equipment's evolution has playing a important role with larger data capture capacity, operational potentialities and different features.

The results obtained with the use of laser sensor in matter of data accuracy and points density for surface definition has been spread out in cartographic community with the purpose of validating this technology. However, there were still issues on applicability, mainly in what refers to data capture with certain land use characteristics, as areas with vegetation and urban features.

Some of these subjects were discussed during Sao Paulo municipality digital mapping activities, before ALS vertical data survey from in a partial area, due their terrain characteristics and land use. On that moment, there was existent vertical data and mapping in similar areas that reference discussions, as well as the planning for the accomplishment of Sao Paulo's survey.

The data collect was accomplished in a small part of municipality central area, as well as in whole south area. In these mapped areas, it was observed a dense vertical and horizontal urbanization, irregular land use areas, which were also object for digital photogrammetric plotting.

A specific ground control formed by a landmark network distributed in the municipality area was used to complement the data quality assurance of ALS survey and Photogrammetric data. Besides that additional ground point were used to validate a national standard specification known as PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) according Brazilian Official Mapping Standards.

This data set evaluated the penetration of laser beam in dense urban areas with the aim of deriving digital terrain models and contours lines, to evaluate the vertical data collect procedures with ALS and Digital Photogrammetry, as well as to check out mapping accuracy using ground control points surveyed.

The final results validated the collected data of similar areas planned previously as well as the use of ALS in urban areas as those of Sao Paulo's municipality.

KEYWORDS: Laser, Urban areas, Digital Terrain Model.

INTRODUÇÃO

O uso de sensores laser aerotransportados, nos levantamentos de dados altimétricos, já está consolidado para as mais diversas aplicações. Sua evolução, em equipamentos e programas tem sido significativa, com inúmeras funcionalidades e potencialidades.

Os resultados obtidos com o uso do sensor laser, tanto em relação à precisão dos dados como na quantidade de pontos para a definição da superfície terrestre, em comparação com outros métodos, tem se apresentado vantajoso.

Este trabalho tem o objetivo de apresentar os resultados obtidos pelo sensor laser no mapeamento digital de São Paulo, considerando as várias características de ocupação do espaço urbano existentes.

1. USO DO SENSOR LASER: ALTERNATIVA NO MAPEAMENTO DIGITAL EM SÃO PAULO

O mapeamento digital de São Paulo abrangeu todo o território do município, aproximadamente 1.500 km², sendo 1.100 km² mapeados na escala 1:1.000 com curvas de nível com equidistância de 1m, e, 400 km² na escala 1:5.000 com curvas de nível com equidistância de 5m.

Além da cartografia tradicional, foram gerados vários produtos originados da cobertura aerofotogramétrica, como: ortofotocartas digitais, modelos digitais do terreno, além da atualização da base cadastral e o geoprocessamento dos dados do mapeamento.

O método fotogramétrico para a geração das curvas de nível era o previsto nas especificações técnicas. Contudo, em função do curto prazo e a disponibilidade do sensor laser ALTM 20/25, foi apresentada a alternativa de captação dos dados altimétricos a partir do perfilamento a laser para a geração das informações altimétricas.

Esta alternativa foi avaliada a partir da realização de um projeto piloto, mapeando uma área central de São Paulo, pois havia questionamentos quanto aos resultados do sensor laser em áreas densamente urbanizadas.

Apesar dos bons resultados alcançados em outros países, no Brasil, naquele momento, havia poucos mapeamentos em áreas urbanas com o sensor laser.

Os questionamentos apontavam para a eficiência em mapear com sensor laser as áreas densamente urbanizadas horizontalmente, verticalmente, além das áreas urbanizadas irregularmente, no que se refere à precisão prevista no contrato (PEC – Padrão de Exatidão Cartográfico - Classe A), bem como em relação à taxa de penetração dos pulsos laser, formadores do modelo digital do terreno e base de dados para as curvas de nível.

1.1 CARACTERÍSTICAS DAS ÁREAS AVALIADAS

O município de São Paulo apresenta uma ocupação urbana densa, com diferentes formas de urbanização. Estas diferentes formas possuem características e dificuldades distintas para a realização de um levantamento com sensor laser.

Nas áreas urbanizadas verticalmente, com predominância de edifícios muito altos, muito próximos entre si e com a existência de variação de nível na superfície pela existência de garagens e outros elementos construtivos, a dificuldade principal é a penetração dos pontos nos espaços vazios. (Ver Figura 01)



Figura 01 – Exemplo de área urbanizada vertical

Nas áreas urbanizadas horizontalmente, com predominância de residências e ocupação regular, a dificuldade principal é a penetração dos pontos entre as residências e a existência de vegetação. (ver Figura 02).



Figura 02 – Exemplo de área urbanizada horizontal

Completando as áreas existentes no município de São Paulo, ainda há áreas suburbanizadas, formadas por pequenas propriedades e vazios urbanos, onde a principal dificuldade é a penetração dos pontos na vegetação densa ainda existente. (Ver Figura 04).

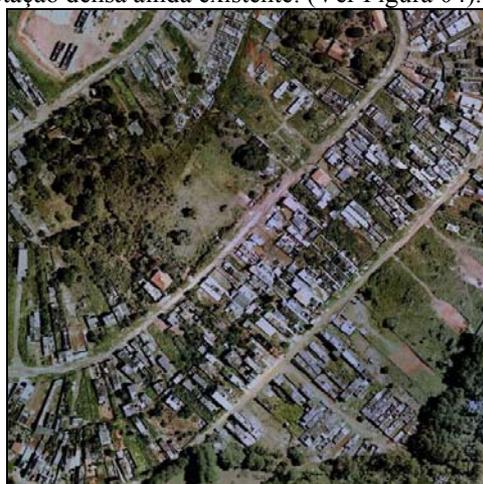


Figura 04 – Exemplo de área suburbanizada

Nas áreas urbanizadas irregularmente, com predominância de moradias com cobertura reflexiva, além da ocupação desordenada, a principal dificuldade é a penetração dos pontos nos espaços vazios. (Ver Figura 03)



Figura 03 – Exemplo de área urbanizada irregular

1.2 A EXPERIÊNCIA DO LASER EM ÁREAS URBANAS

Com o objetivo de esclarecer os usuários da Prefeitura do Município de São Paulo, quanto às dúvidas sobre o uso do sensor laser, foi apresentado os resultados da área de calibração do sensor, bem como os resultados de um mapeamento em uma área urbana no município de Curitiba como referência.

1.2.1 Resultados na Área de Calibração

Em uma área urbana para calibração do sistema laser, com boa densidade de pontos de comparação obtidos com GPS, os resultados encontrados estão além das expectativas apresentadas pelos fabricantes.

Os quadros abaixo demonstram resultados obtidos nestas condições:

HORIZONTAL

| Dados | Pulso | Média (m) | Desvio Padrão (m) | Amostra (# de Pontos) | EMQ (m) | Altura de voo (m) |
|-----------|--------------|-----------|-------------------|-----------------------|---------|-------------------|
| Dia 31401 | <i>First</i> | -0,123 | 0,513 | 4 | 0,527 | 1150 |
| | <i>Last</i> | -0,075 | 0,296 | 4 | 0,305 | |
| | <i>First</i> | 0,113 | 0,238 | 245 | 0,263 | |
| | <i>Last</i> | 0,205 | 0,322 | 239 | 0,381 | |
| Dia 31701 | <i>First</i> | 0,060 | 0,348 | 6 | 0,354 | 1150 |

Quadro 01 – Resultados da precisão horizontal.

Os resultados HORIZONTAIS do quadro 01 foram tomados em épocas GPS diferentes. *First/Last* significam o primeiro e último retorno do pulso.

A amostra menor de pontos (4 e 6 pontos) corresponde a pontos de verificação determinados por GPS em elementos naturais e bem definidos na região. As amostras maiores correspondem a elementos

artificiais definidos como alvos desenhados no solo para aferição do equipamento.

O Erro Médio Quadrático (EMQ) da planimetria está na faixa de 0,35 a 0,50 cm, ou seja, abaixo da tolerância admitida pelo fabricante para a altura de vôo.

| Dados | Pulso | Média (m) | Desvio Padrão (m) | Amostra (# de Pontos) | EMQ (m) | Altura de vôo (m) |
|-----------|-------------------|-----------|-------------------|-----------------------|---------|-------------------|
| Dia 31401 | <i>First</i> | 0,030 | 0,057 | 62 | 0,064 | 1175 |
| | <i>Last</i> | 0,007 | 0,073 | 66 | 0,073 | |
| | <i>First/Last</i> | 0,026 | 0,053 | 239 | 0,059 | |
| Dia 31701 | <i>First</i> | -0,022 | 0,068 | 41 | 0,072 | 1175 |
| | <i>Last</i> | -0,019 | 0,045 | 42 | 0,049 | |
| Dia 31401 | <i>Last</i> | -0,043 | 0,054 | 46 | 0,070 | 1175 |

Quadro 02 – Resultados da precisão vertical.

Os resultados VERTICAIS do quadro 02 foram tomados em épocas GPS diferentes. *First/Last* significam o primeiro e último retorno do pulso. As amostras correspondem a elementos artificiais definidos como alvos desenhados no solo para aferição do equipamento.

O Erro Médio Quadrático (EMQ) obtido está na faixa de 0,05 a 0,075 cm, ou seja, metade da tolerância admitida pelo fabricante e ainda, para uma altura de vôo de aproximadamente 1.200 m (20% superior ao estabelecido para o valor de tolerância do fabricante).

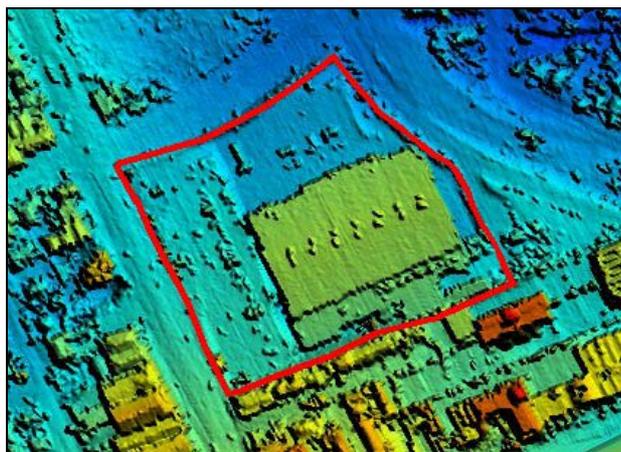


Figura 05 - Área de calibração

1.2.2 Resultados na Área Urbana de Curitiba

Na cidade de Curitiba, mais especificamente no bairro da Água Verde, foram realizadas coberturas aéreas com distância focal 153 mm e 300 mm coloridas, datadas de 2000 e 2002 e nas escalas 1:8.000

e 1:4.000 respectivamente. No ano de 2003, foi realizado um perfilamento a laser com altura de vôo de 1.000 m sobre a mesma região.

Com base nestes vôos, foram tomadas informações altimétricas provenientes do apoio GPS realizado e dos pontos ajustados pela aerotriangulação para comparação com os pontos laser das proximidades.

1.2.2.1 Comparação com Pontos de Apoio GPS

Usando os pontos do apoio GPS na mesma região onde foi realizado o levantamento laser, comparou-se a cota dos pontos GPS com a cota de pontos laser nas proximidades.

A partir destas observações, foram elaborados quadros de valores onde se observam os resultados estatísticos obtidos. As medidas comparativas foram obtidas do levantamento laser e do levantamento GPS.

| Quadro 03 | |
|-----------------------------------|--------------|
| Região 1 - Praça do Japão | |
| Média (m) – 9 pontos de controle: | 0,03 |
| Desvio Padrão (m): | 0,21 |
| Diferença máxima (m): | 0,31 |
| Diferença mínima (m): | -0,24 |

Quadro 04**Região 2 - Cemitério da Água Verde - Praça frontal**

| | |
|------------------------------------|--------------|
| Média (m) – 12 pontos de controle: | 0,01 |
| Desvio Padrão (m): | 0,09 |
| Diferença máxima (m): | 0,14 |
| Diferença mínima (m): | -0,12 |

Quadro 05**Região 3 - Av. Getúlio Vargas**

| | |
|------------------------------------|--------------|
| Média (m) – 10 pontos de controle: | -0,05 |
| Desvio Padrão (m): | 0,12 |
| Diferença máxima (m): | 0,16 |
| Diferença mínima (m): | -0,20 |

Quadro 06**Região 4 - Cruzamento Bairro**

| | |
|------------------------------------|--------------|
| Média (m) – 12 pontos de controle: | 0,03 |
| Desvio Padrão (m): | 0,17 |
| Diferença máxima (m): | 0,23 |
| Diferença mínima (m): | -0,20 |

1.2.2.2 Comparação de Modelos Digitais gerados pela Captação Fotogramétrica e pelo Perfilamento a Laser

Na comparação de modelos digitais de terreno, foram criadas duas superfícies de terreno. Uma delas com base na altimetria extraída das curvas de nível captadas pela fotogrametria e outra derivada da "nuvem" de pontos laser. Com a aplicação do programa TerraModeler, que opera no ambiente MicroStation, foi feita a subtração destas superfícies.

Foram contabilizados 9.676 pontos de subtração entre os modelos digitais. A média encontrada foi de 0,026 m para um desvio padrão de 0,316 m. Os valores máximo e mínimo para as diferenças foram 1,750 m e -1,920 m respectivamente. O EMQ (Erro Médio Quadrático) encontrado foi 0,355 m. (Ver quadro 07)

O quadro 08 apresenta as frequências para as diferenças computadas que é a seguinte:

| | |
|---------------------------------------|--------------|
| Número de Pontos da Comparação | 9.676 |
| Média das Diferenças (m) | 0,026 |
| Desvio Padrão (m) | 0,316 |
| EMQ (m) | 0,355 |

Quadro 07 – Comparação entre Captação Fotogramétrica x Laser.

| Intervalo | Número de Pontos | Percentual | Perc Acumulado |
|-----------------------|-------------------------|-------------------|-----------------------|
| > 1,5 m | 13 (*) | 0,1 % | 100 % |
| 1,25 m < dif < 1,49 m | 22 (*) | 0,2 % | 99,9 % |
| 1,00 m < dif < 1,24 m | 59 (**) | 0,6 % | 99,7 % |
| 0,75 m < dif < 0,99 m | 294(**) | 3,0 % | 99,1 % |
| 0,50 m < dif < 0,74 m | 637 (**) | 6,6 % | 96,1 % |
| 0,25 m < dif < 0,49 m | 1860 | 19,2 % | 89,5 % |
| 0,10 m < dif < 0,24 m | 2899 | 30,0 % | 70,3 % |
| < 0,09 m | 3892 | 40,3 % | 40,3 % |

Quadro 08 – Frequência para diferenças computadas na avaliação.

(*) locais com movimentação de terra. (**) pontos laser sobre veículos e outros pequenos elementos urbanos.

Tomando como base comparativa o perfilamento a laser em área urbana realizado em Curitiba, podemos verificar que:

- Cerca de 90% dos pontos estão abaixo de 0,50 m de diferença que corresponde à meia-equidistância das curvas de nível de um mapeamento derivado de uma cobertura aérea 1:5.000 ou 1:8.000;

- Cerca de 60% dos pontos estão abaixo de 0,15 m que corresponde à precisão informada pelo fabricante.
Atendendo para as devidas tolerâncias de cada método.

1.3 A EXPERIÊNCIA DO LASER EM SÃO PAULO

A experiência do uso do sensor laser no mapeamento digital de São Paulo teve como início o

mapeamento de uma área experimental, considerada de alta complexidade pelos técnicos da prefeitura, localizada no centro do município e abrangendo os distritos de Consolação, República, Sé, Bela Vista, Jardim Paulista e Liberdade.

Esta área experimental é formada por uma urbanização densa e principalmente vertical, além de uma urbanização horizontal significativa e elementos do sistema viário como: viadutos, passarelas, túneis e canais. Tais características se configuraram como possíveis dificuldades ao uso do sensor laser.

Considerando as experiências realizadas em Curitiba, o levantamento desta área experimental foi realizado com os seguintes parâmetros:

- Sensor ALTM 2025 da Optech;
- Ângulo de varredura: 9°
- Abertura Total: 18°
- Frequência do Scanner: 38 Hz
- Repetição do Laser: 25.000 KHz
- Máxima Frequência (580): 342
- Tamanho do ponto: 0,270 m
- Altura média de vôo: 1.000 m.

Com estes parâmetros, o levantamento com o sensor laser seria realizado com um espaçamento no eixo x de 0,975 m e no eixo y de 0,963 m e uma expectativa de mais de 1 ponto/m². Ainda foi considerado um recobrimento lateral de 25% da largura da faixa de 317 m, num total de 25 faixas de vôo.

Os resultados alcançaram as expectativas apresentadas no levantamento em Curitiba, tanto em precisão dos pontos como em relação a taxa de penetração dos pontos para a geração do modelo digital do terreno.

Tais resultados validaram o uso do sensor laser em parte da área do Mapeamento Digital de São Paulo, com alguns ajustes no planejamento da área experimental, em virtude alguns fatores:

- tipo de relevo alterou a altura média de vôo;
- maior ângulo de abertura e maior frequência, para maior largura de faixa e vôo mais baixo;
- menor tamanho do ponto laser, para garantir a taxa de penetração esperada;
- maior recobrimento lateral, devido às condições meteorológicas da região, com o intuito de evitar vazios no levantamento.

Considerando estes fatores, o planejamento do vôo com sensor laser na área de trabalho teve os seguintes parâmetros:

- Sensor ALTM 2025 da Optech;
- Ângulo de varredura: 12°
- Abertura Total: 24°
- Frequência do Scanner: 35 Hz
- Repetição do Laser: 25.000 KHz
- Máxima Frequência (580): 420
- Tamanho do ponto: 0,243 m
- Altura média de vôo: 900 m.

Com estes parâmetros, o levantamento com o sensor laser seria realizado com um espaçamento no eixo x de 1,059 m e no eixo y de 1,071 m e uma expectativa de 1 ponto/m². Ainda foi considerado um

recobrimento lateral de 30% da largura da faixa de 383 m, num total de 35 faixas de vôo.

2. O COMPORTAMENTO DA PERFILAGEM A LASER: AVALIAÇÕES E RESULTADOS.

Com o objetivo de avaliar o comportamento da perfilagem a laser em São Paulo, foram analisados três aspectos:

- precisão dos pontos laser;
- taxa de penetração do laser;
- comparação entre as curvas de nível geradas pelo MDT do laser e pelo processo fotogramétrico.

Estas avaliações serão descritas a seguir, considerando amostras do território do município, de acordo com as características em questão, ou seja, áreas urbanizadas verticais, horizontais, de ocupação irregular e suburbanizadas.

2.1 PRECISÃO DOS PONTOS LASER

A precisão dos pontos captados pelo sensor laser foi avaliada a partir da comparação de um conjunto de pontos medidos em campo. Para isso, foram utilizados os resultados dos pontos que formaram a rede de marcos geodésicos, os pontos de apoio fotogramétrico e os pontos da verificação do PEC do levantamento fotogramétrico.

2.1.1 Precisão nas Áreas Urbanizadas Verticais

A amostra analisada está localizada no distrito Jardim Paulista, na região da Avenida Paulista. Foi utilizado para a verificação da precisão um conjunto de 4 pontos, formados por pontos fotogramétricos.

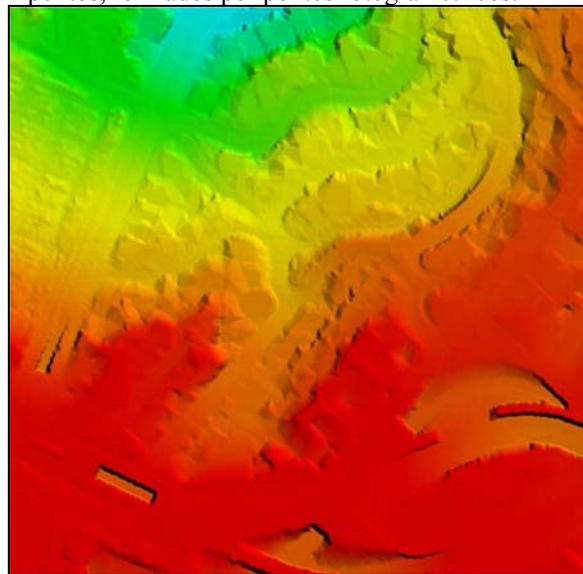


Figura 06 – MDT do Laser em áreas urbanizadas verticais

| | |
|----------------------|---------------|
| Média (m) | 0,162 |
| Desvio Padrão (m) | 0,105 |
| Diferença máxima (m) | -0,032 |
| Diferença mínima (m) | -0,256 |
| EMQ (m) | 0,186 |

Quadro 09 – Resultados Obtidos nas Áreas Urbanizadas Verticais

2.1.2 Precisão nas Áreas Urbanizadas Horizontais

A amostra analisada está localizada no distrito de Socorro, próximo a represa de Guarapiranga. Foi utilizado para a verificação da precisão um conjunto de 22 pontos, utilizados para a validação do PEC do mapeamento digital.

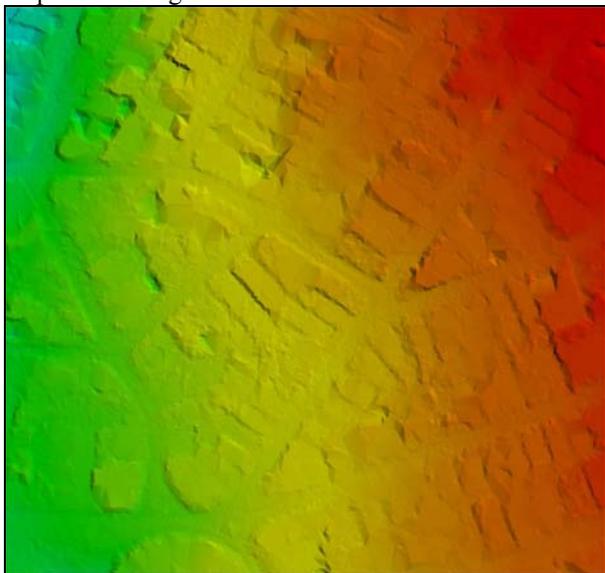


Figura 07 – MDT do Laser em áreas urbanizadas horizontais

| | |
|----------------------|---------------|
| Média (m) | 0,057 |
| Desvio Padrão (m) | 0,066 |
| Diferença máxima (m) | 0,153 |
| Diferença mínima (m) | -0,086 |
| EMQ (m) | 0,069 |

Quadro 10 – Resultados Obtidos nas Áreas Urbanizadas Horizontais

2.1.3 Precisão nas Áreas Urbanizadas Irregulares

A amostra analisada está localizada no distrito do Grajaú, identificada como Parque Planalto. Foi utilizado para a verificação um conjunto de 22 pontos, formado por pontos utilizados para validação do PEC do mapeamento digital e marcos geodésicos da rede municipal.

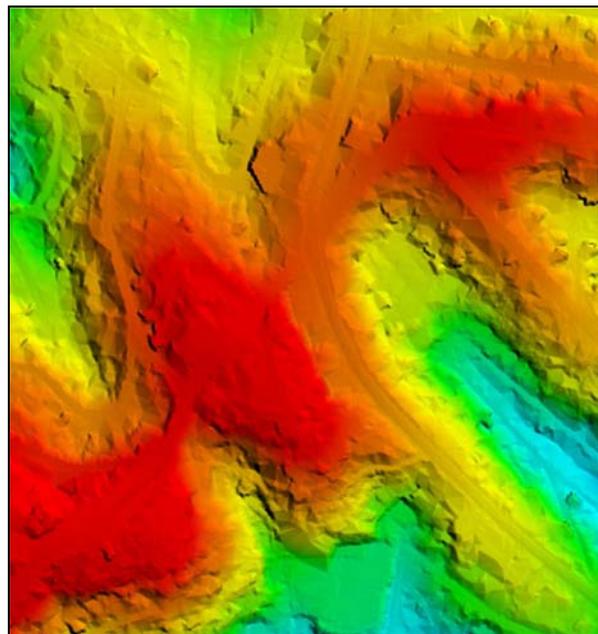


Figura 08 – MDT do Laser em áreas urbanizadas irregular

| | |
|----------------------|---------------|
| Média (m) | 0,080 |
| Desvio Padrão (m) | 0,045 |
| Diferença máxima (m) | -0,021 |
| Diferença mínima (m) | -0,174 |
| EMQ (m) | 0,091 |

Quadro 11 – Resultados Obtidos nas Áreas Urbanizadas Irregulares

2.1.4 Precisão nas Áreas Suburbanizadas

A amostra analisada está localizada no distrito de Jardim Ângela, próxima a represa de Guarapiranga. Foi utilizado para a verificação um conjunto de 4 pontos, formado por pontos fotogramétricos.

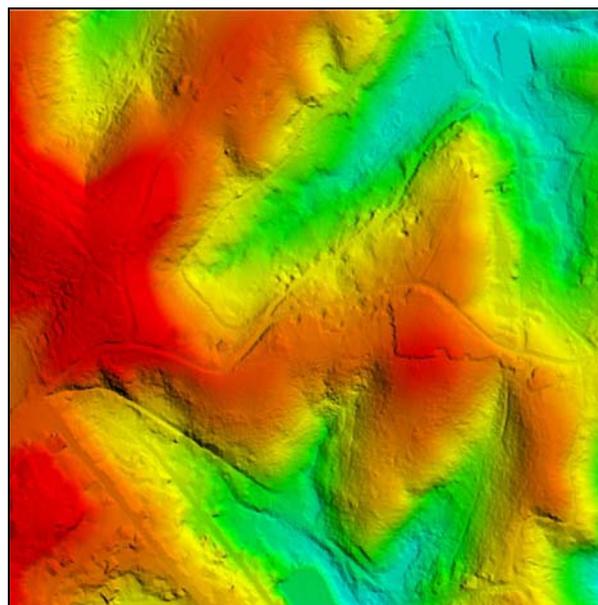


Figura 09 – MDT do Laser em áreas suburbanizadas

| | |
|----------------------|---------------|
| Média (m) | 0,068 |
| Desvio Padrão (m) | 0,098 |
| Diferença máxima (m) | 0,077 |
| Diferença mínima (m) | -0,116 |
| EMQ (m) | 0,081 |

Quadro 12 – Resultados Obtidos nas Áreas Suburbanizadas

2.2 AVALIAÇÃO DA TAXA DE PENETRAÇÃO

Considerando que o modelo digital do terreno é formado por pontos medidos na superfície, no caso do uso do sensor laser, estes pontos são representados pelos pulsos que tocaram o terreno e retornaram ao sensor.

A avaliação da taxa de penetração dos pulsos laser tem por objetivo apresentar a eficácia do método na geração de modelos digitais de terreno nas condições analisadas.

Para se chegar ao modelo digital do terreno, é necessário realizar a classificação de todos os pulsos que retornaram, separando os pontos que tocaram o terreno dos pontos que tocaram outros elementos como vegetação, feições urbanas, entre outros.

2.2.1 Taxa de Penetração nas Áreas Urbanizadas Verticais

Na amostra de áreas urbanizadas verticais, o resultado obtido pelo sensor laser, considerando todos os pulsos que retornaram ao sensor (*all points*) foram de 2,175 pontos/m² (incluindo as áreas de superposição entre faixas).

Após a classificação dos pulsos, a taxa de retorno de pulsos que tocaram o terreno foi de 0,465 pontos/m² no terreno. Se considerarmos o planejamento de 1 ponto/m², temos uma taxa de aproveitamento de aproximadamente 46% dos pontos no terreno.

2.2.2 Taxa de Penetração nas Áreas Urbanizadas Horizontais

Na amostra de áreas urbanizadas horizontais, o resultado obtido pelo sensor laser, considerando todos os pulsos que retornaram ao sensor (*all points*) foram de 2,899 pontos/m² (incluindo as áreas de superposição entre faixas).

Após a classificação dos pulsos, a taxa de

retorno de pulsos que tocaram o terreno foi de 0,436 pontos/m² no terreno. Se considerarmos o planejamento de 1 ponto/m², temos uma taxa de aproveitamento de aproximadamente 44% dos pontos no terreno.

2.2.3 Taxa de Penetração nas Áreas Urbanizadas Irregulares

Na amostra de áreas urbanizadas verticais, o resultado obtido pelo sensor laser, considerando todos os pulsos que retornaram ao sensor (*all points*) foram de 2,388 pontos/m² (incluindo as áreas de superposição entre faixas).

Após a classificação dos pulsos, a taxa de retorno de pulsos que tocaram o terreno foi de 0,413 pontos/m² no terreno. Se considerarmos o planejamento de 1 ponto/m², temos uma taxa de aproveitamento de aproximadamente 41% dos pontos no terreno.

2.2.4 Taxa de Penetração nas Áreas Suburbanizadas

Na amostra de áreas urbanizadas verticais, o resultado obtido pelo sensor laser, considerando todos os pulsos que retornaram ao sensor (*all points*) foram de 2,033 pontos/m² (incluindo as áreas de superposição entre faixas).

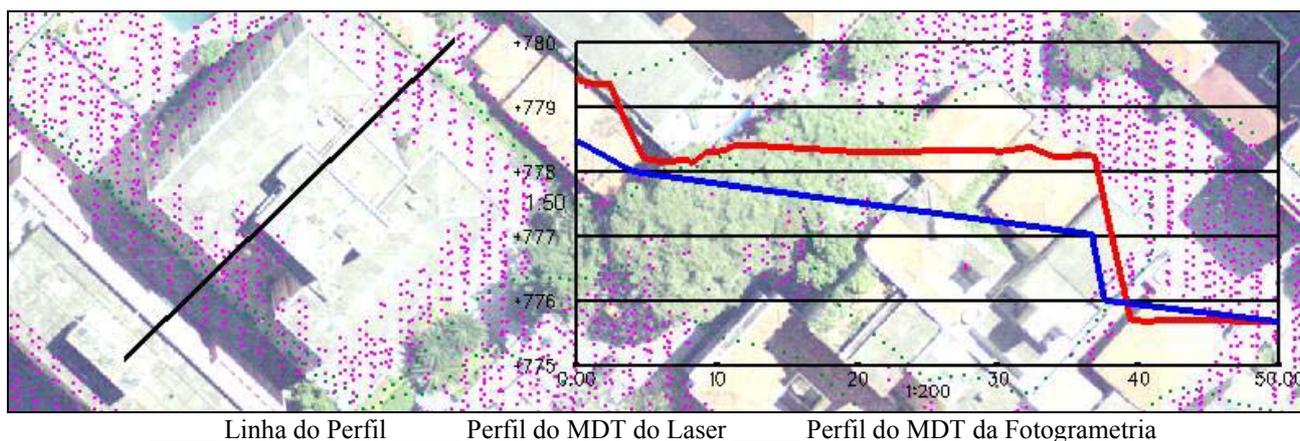
Após a classificação dos pulsos, a taxa de retorno de pulsos que tocaram o terreno foi de 0,518 pontos/m² no terreno. Se considerarmos o planejamento de 1 ponto/m², temos uma taxa de aproveitamento de aproximadamente 52% dos pontos no terreno.

2.3 AVALIAÇÃO COMPARATIVA: MDT LASER x MDT FOTOGAMÉTRICO

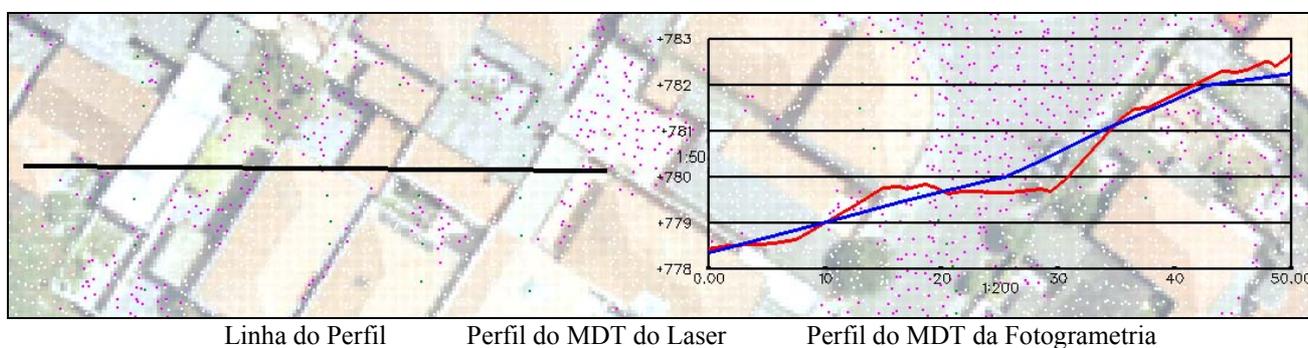
Esta avaliação é qualitativa e tem por objetivo apenas ilustrar o detalhamento possível da altimetria de regiões urbanizadas a partir dos métodos fotogramétrico e por perfilamento a laser.

Para isso, serão apresentados perfis gerados a partir de modelos digitais do terreno, formados por dados obtidos pelos dois métodos. Não deixando de levar em consideração as devidas tolerâncias e especificidades de cada método.

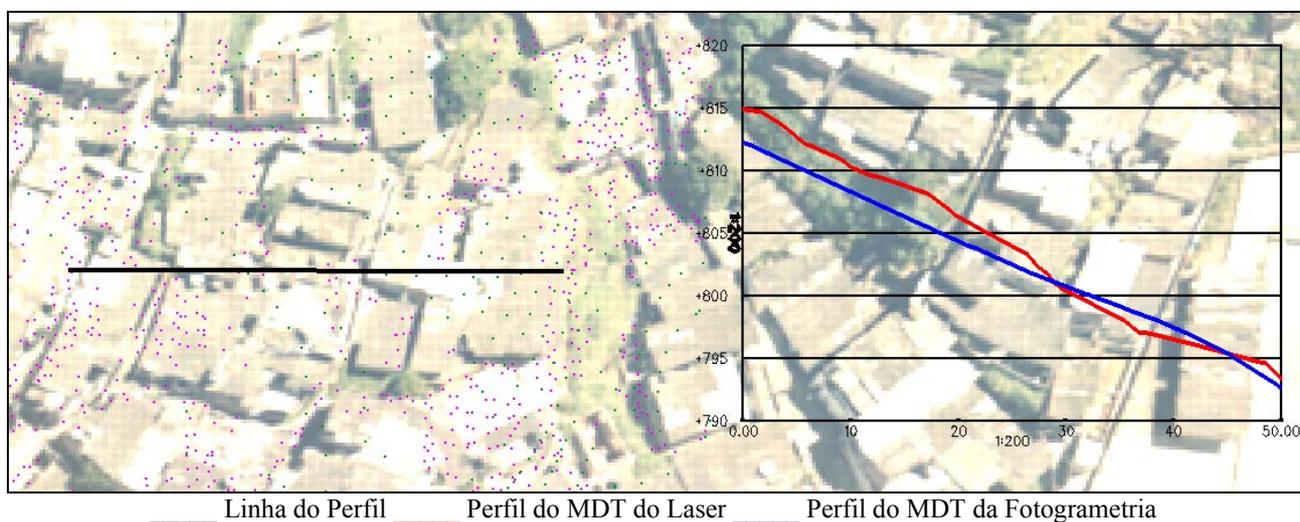
2.3.1 Comparativo Altimétrico em Áreas Urbanizadas Verticais



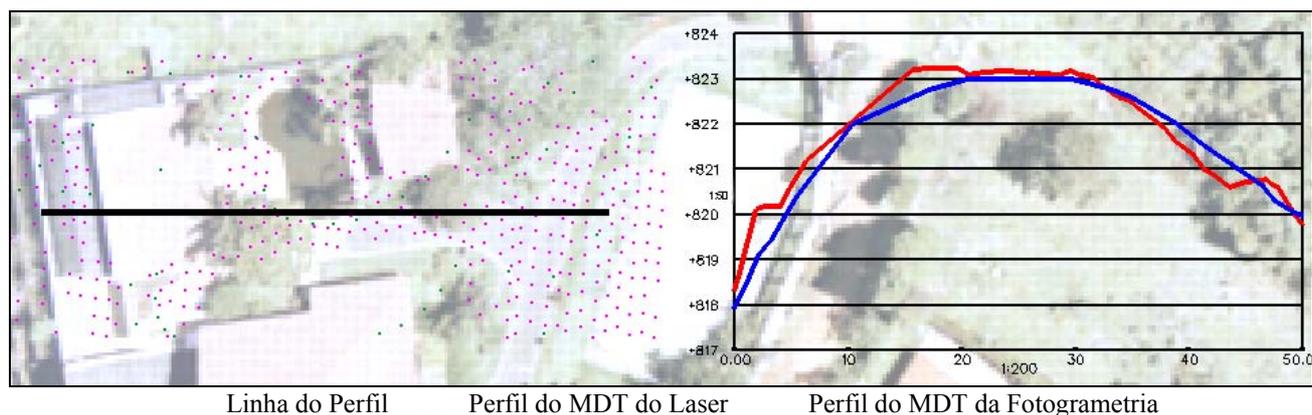
2.3.2 Comparativo Altimétrico em Áreas Urbanizadas Horizontais



2.3.3 Comparativo Altimétrico em Áreas Urbanizadas Irregulares



2.3.2 Comparativo Altimétrico em Áreas Suburbanizadas



3. CONCLUSÕES

Ao se buscar o uso do sensor laser no mapeamento digital de São Paulo, várias questões tiveram que ser discutidas, devido ao pouco tempo de inserção da tecnologia no mercado brasileiro, a falta de levantamento com sensor laser em áreas urbanas, bem como às características particulares de ocupação do espaço urbano em São Paulo.

Apesar do pouco tempo de inserção da tecnologia no mercado brasileiro naquele momento (2003), os resultados obtidos em todos os levantamentos realizados em outros países, como os realizados no Brasil já apresentavam resultados significativos e confiáveis para o levantamento de dados altimétricos, como foi apresentado na experiência realizada em Curitiba e igualmente em outras áreas mapeadas.

Com relação ao mapeamento em São Paulo, a precisão dos pontos medidos se mostrou confiável e compatível com o especificado, que era atingir o PEC Classe A.

Com relação às características distintas da ocupação do espaço urbano de São Paulo, os resultados apresentados demonstraram a eficiência do método, o qual mesmo em regiões densamente urbanizadas, permitiu um melhor detalhamento do modelo digital do terreno, pela eficácia da penetração dos pulsos laser.

Considerando a evolução dos sistemas de perfilamento a laser, principalmente com relação à frequência, que permitirá uma maior quantidade de pulsos e conseqüentemente pontos no terreno, combinados com avanços nos algoritmos de classificação automática, utilizados em conjunto com a fotogrametria, os sistemas laser trarão maior confiabilidade aos dados para os modelos digitais do terreno, mesmo em regiões com obstáculos, como áreas de vegetação ou áreas densamente urbanizadas.

4. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BRANDALIZE, A. A. Perfilamento a LASER: 10 anos de evolução.... Apresentação, Geobrasil 2006, São Paulo, julho, 2006.

ROTH, R., LIDAR state of the art and ALS50-II brief impressions, Discussion: LIDAR Digital Elevation Data Acquisition/Processing Flow: A User's Perspective, ASPRS, May, 2006.

ROTH, R. Airborne LIDAR for Digital Surface Generation overview and highlights of ALS50-II, Workshop 3, Performance, Accuracy, and Cost-effectiveness of Advanced Imaging Sensing Systems for Digital Surface Generation, ASPRS, May, 2006.

WEVER, C., LINDEMBERGER, J., Experience of 10 years of LASER Scanning, Schriftenreihe de Institute für Photogrammetrie der Universität Stuttgart, pp. 125-132, 1999.