

UTILIZAÇÃO DE DADOS DO VARREDOR LASER NA CARTOGRAFIA URBANA

Using laserscanning data in urban cartography

ITALO CAVASSIM JUNIOR

JORGE ANTONIO SILVA CENTENO

EDSON APARECIDO MITISHITA

Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas

Universidade Federal do Paraná

Caixa Postal 515 – Centro Politécnico – Jardim das Américas

CEP 12201-970 – Curitiba – PR – Brasil

italocjr@yahoo.com; centeno@ufpr.br; mitishit@ufpr.br

RESUMO

Uma das grandes restrições do uso da monorrestituição digital é a disponibilidade de um Modelo Digital de Superfície (MDS) com qualidade e resolução espacial adequada. Recentemente surgiu uma alternativa para este problema, a tecnologia da varredura a laser que possibilita a geração de MDS. Neste artigo são apresentados os resultados de um estudo cujo objetivo é avaliar a obtenção de cartas planimétricas combinando fotografias aéreas de grande escala (1:6000) com dados do varredor laser. Duas opções são avaliadas, a vetorização usando a monorrestituição digital e a vetorização sobre imagens geradas dos dados do varredor laser. Os produtos gerados foram avaliados em relação a uma carta obtida por estereorestituição convencional na escala 1:2000. O PEC (Padrão de Exatidão Cartográfica) foi utilizado como avaliador de qualidade dos produtos obtidos.

ABSTRACT

One of the main problems of the use of monocular restitution is the need of a detailed and precise digital elevation model. Recently a new technology has been introduced. Such technology allows obtaining a detailed digital elevation model by using the airborne laser scanner. Laser scanner opened to new perspectives in the digital mapping field. In this article, the results of a study aimed at the production of planimetric charts using laser scanner data and 1:6000 aerial photographs are presented. Two options are introduced and discussed: monocular restitution of the photographs using the elevation

model derived from laser scanner data and the digitalization on images derived from laser scanner data. The results are evaluated by using maps that were produced using conventional stereo restitution as reference and by taking the Brasilian PEC as a quality standard. The results shows that it is possible to digitilize using both methods, and that the results strongly depend on the quality of the altimetric grid. The results also allow one to conclude that when the features are visible on both data sets, class A charts at 1:2000 scale can be obtained.

1. INTRODUÇÃO

As opções tradicionais para a obtenção de mapas planimétricos da superfície da terra, baseadas em levantamentos aéreos, são a restituição em aparelhos de visão estereoscópica e a monorestituição. A monorestituição é uma opção mais simples, que tem se tornado atrativa para uma série de aplicações (SOUZA, 2001). Uma de suas grandes restrições é a disponibilidade de um Modelo Digital da Superficie (MDS) com qualidade e resolução espacial adequada para compensar a falta de visão estereoscópica. Entre as opções disponíveis até recentemente estavam o uso de MDS derivados de mapas topográficos, geralmente em escalas menores, e o uso de MDS obtidos com ajuda da restituição estereoscópica.

Com o aparecimento de uma nova tecnologia, o Sistema de Varredura a Laser, tem-se uma alternativa para obtenção de Modelos Digitais de Superficie para a monorestituição. Este sistema consiste, basicamente, na determinação da elevação de uma densa malha de pontos no terreno utilizando um medidor de feixe laser instalado em uma aeronave. Esta tecnologia teve seus primeiros resultados no final da década de setenta (ACKERMANN, 1999) e representa uma nova opção altamente automatizada na geração de Modelos Digitais da Superficie.

Atualmente seu potencial de aplicação está sendo estendido às mais diversas áreas. Por exemplo, na engenharia de telecomunicações, para a obtenção de modelos de elevação que permitem estudos de propagação de ondas e posicionamento de antenas receptoras e transmissoras, ou na Engenharia Florestal, para a determinação de volume e altura de vegetação, estimativa de biomassa além de remoção de cobertura vegetal. Na Cartografia, em particular, o Sistema de Varredura a Laser aponta para um grande desenvolvimento de técnicas automáticas de extração de feições, facilidades operacionais e aumento da precisão nos processos produtivos de mapas, por exemplo, as ortofotos. A possibilidade da vetorização de feições diretamente neste conjunto de dados, sob forma de imagens, é uma alternativa interessante, porém, por sua baixa resolução espectral, algumas feições não são bem definidas.

Dentro deste contexto, a utilização da monorrestituição de fotografias aéreas e do MDS derivado do varredor laser se apresenta como alternativa viável para o mapeamento. Neste artigo são apresentados os resultados de um estudo cujo objetivo é avaliar a obtenção de cartas planimétricas combinando fotografias aéreas de grande escala (1:6000) com dados do varredor laser. Duas opções são avaliadas, a vetorização usando a monorrestituição digital e também a vetorização sobre imagens geradas dos dados do varredor laser.

2. MODELO DIGITAL DA SUPERFÍCIE

Até recentemente, os modelos digitais utilizados para representar a superfície de uma região eram derivados de mapas topográficos e representavam a superfície do terreno, do que o termo Modelo Digital do Terreno era apropriado para descrever-los. Porém, com o surgimento do sistema de Varredura a Laser, a cota na superfície de todos os elementos presentes na superfície do terreno pode ser registrada, incluindo construções e vegetação. Por este motivo, para o desenvolvimento deste trabalho, torna-se necessário esclarecer a diferença entre um Modelo Digital do Terreno e um Modelo Digital de Superfície. Segundo HAALA (1999), Modelo Digital do Terreno (MDT) armazena apenas as altitudes dos pontos na superfície do terreno, ao passo que Modelo Digital de Superfície (MDS) é aquele que inclui outros objetos tais como árvores e edificações. Esta diferenciação é também adotada por BURROUGH (1989).

3. VARREDOR A LASER

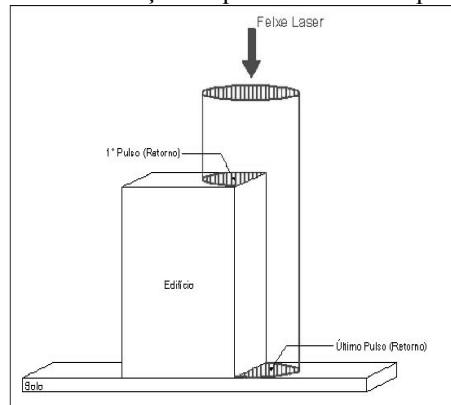
O Sistema de Varredura a Laser representa uma tecnologia altamente automatizada na geração de MDT e MDS. Seu funcionamento baseia-se na utilização de um feixe de laser (LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiance) que é emitido em direção aos objetos. Ao atingir sua superfície, este feixe é refletido e uma parte dele retorna ao sistema. A partir da intensidade do sinal de retorno é possível derivar informações a respeito da natureza da superfície do objeto, mas o dado mais relevante é o tempo decorrido entre a emissão do feixe e o registro do retorno, pois permite calcular a distância entre o sensor e o objeto. Este tipo de sistema também é chamado de LIDAR - Light Detection And Ranging ou LADAR - Laser Detection And Ranging (WEHR & LOHR, 1999).

O Sistema de Varredura a Laser é composto de uma unidade de medição laser, um sistema de varredura óptico-mecânico e uma unidade de registro de medições de apoio. A unidade de medição laser é responsável pela geração e emissão dos pulsos laser. Para direcionar os pulsos, um sistema de varredura óptico-mecânico (scanner) é utilizado. Este sistema de varredura pode ser uni ou bidirecional. Para o cálculo da posição do feixe incidente na superfície do terreno são necessárias duas unidades de apoio que são encarregadas da

determinação da altitude e posição do sensor na hora da emissão do feixe. A posição é determinada mediante um sistema de GPS diferencial (DGPS), encarregado de calcular a posição da plataforma no espaço. Um segundo sistema de apoio, um Sistema de Medição Inercial (SMI) é encarregado de calcular a inclinação do sensor nas três direções. Na fase de pós-processamento, as medidas de distância com seus respectivos ângulos, os dados de GPS e dados de navegação inercial são combinados para determinar a posição dos pontos varridos na superfície terrestre. Para garantir a boa qualidade do resultado, estes dados devem estar sincronizados (WEHR & LOHR, 1999).

Além da posição do ponto onde o feixe incidiu na superfície, o sistema possibilita medir a intensidade do sinal de retorno. O feixe associado a um pulso Laser disparado desde um avião sofre uma pequena divergência. Por este motivo, a área associada ao feixe depende da altura do vôo. O tamanho dos objetos, em relação à projeção do feixe, bem como o material que compõe a superfície, determinam a intensidade do pulso que retorna ao sensor. Assim sendo, o feixe pode não atingir um único objeto e pode ser refletido por diferentes pontos localizados a diferentes distâncias do sensor, como é mostrado na figura 01. Sendo assim, o ponto mais próximo ocasionará um pulso que retorna mais rapidamente e o ponto mais distante um retorno mais demorado. Esta característica ganha relevância quando se leva em consideração a diferença de penetração que pode existir em um único pulso (BEHAN, 2000), pois permite a distinção de elevações.

Figura 01 – Demonstração do primeiro e último pulso



Fonte: CAVASSIM, 2004

Alguns sistemas laser possuem como característica a medição de diferentes retornos do sinal emitido, refletido por diferentes objetos dentro da projeção do feixe no terreno. É possível medir o primeiro e o último retorno do pulso, *first/last pulse*, ou até pode-se medir toda a variação do retorno, se for

necessário. Na figura 02 é mostrado um exemplo de duas grades altimétricas de uma mesma região, associadas ao primeiro e último pulso. Pode-se verificar visualmente que alguns feixes conseguem atravessar a copa das árvores, atingindo o terreno.

Figura 02 – Diferentes retornos do pulso Laser. (a) Primeiro retorno. (b) Segundo retorno.

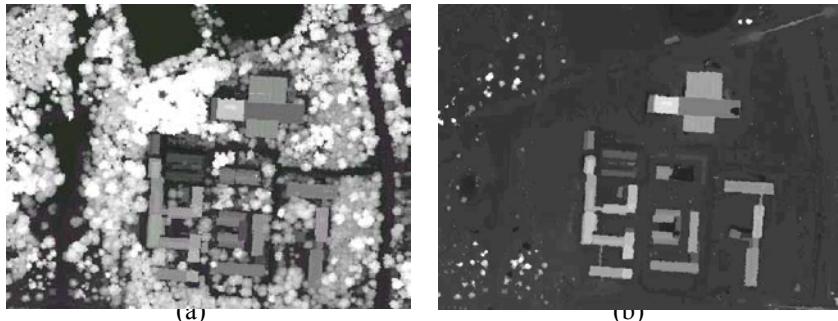


Imagen cedida pela Universidade de Karlsruhe: Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung

O Sistema de Varredura a Laser é baseado na medida da distância entre o sensor e o objeto e, com base na medição do intervalo entre a emissão do sinal e a recepção do retorno (Figura 03). Segundo BALTSAVIAS (1999), este tempo é medido por um contador de intervalo relativo a um ponto específico no pulso, por exemplo, a extremidade principal do lado ascendente do pulso, ou seja, a sua borda. Caso a borda não seja bem definida, o tempo é medido para um ponto na extremidade principal onde a voltagem do sinal adota um valor de limiar predeterminado. Erros podem acontecer se a voltagem da magnitude, transmitida e recebida dos pulsos não for ajustada ao mesmo valor antes de serem enviados ao contador de intervalo de tempo, isto é, se receberem pulsos com amplitude muito baixa, o tempo medido t vai ser muito longo.

De acordo com a figura 03, a distância entre o sensor e o objeto pode ser calculada a partir do tempo entre o pulso emitido e recebido pela equação 01

$$R = \frac{c \cdot t}{2} \quad (01)$$

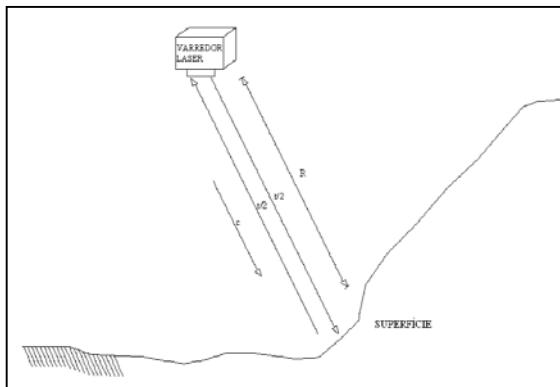
onde,

R - é a distância entre a superfície do objeto e o sensor;

c - é a velocidade da luz;

t - tempo entre o pulso transmitido e recebido.

Figura 03 – Determinação da distância entre o sensor e a superfície



Fonte: CAVASSIM, 2004

Como todo método de aquisição de informações sobre a superfície, o Sistema de Varredura a Laser possui erros oriundos do pulso emitido, do sistema de orientação (GPS) e atitude da aeronave (SMI), erros caracterizados pela divergência do pulso. Estes erros sistemáticos – podem ocorrer quando a posição e orientação relativa dos três sistemas, GPS, unidade inercial e o varredor laser, não é determinada com precisão. Os três equipamentos estão instalados no avião em locais diferentes. A antena GPS fica na carenagem externa da aeronave enquanto o sensor e a unidade inercial encontram-se dentro dela. Mesmo ficando no interior da aeronave, estes dois últimos dispositivos não ocupam o mesmo espaço. A unidade inercial é colocada geralmente sobre o sensor, transformações de rotação e translação relativas são necessárias para compatibilizar os dados captados pelos três sistemas, bem como transformar os dados para o sistema de referência no espaço objeto. Os erros decorrentes destas transformações afetam a estimativa da posição dos pontos medidos pelo varredor laser (WEHR & LOHR, 1999).

4. MONORESTITUIÇÃO

A monorrestituição digital pode ser definida como um procedimento fotogramétrico que possibilita a obtenção de mapeamento planimétrico digital a partir da digitalização vetorial (monoscópica) de entidades contidas numa única aeroimagem (MITISHITA, 1997). A falta de visão estereoscópica para corrigir o deslocamento da imagem provocada pela variação da altura dos objetos na projeção central é compensada pelo uso de um MDS. O processo de monorrestituição digital foi concebido por MAKAROVIC (1973) utilizando as equações de colinearidade inversas, conforme é mostrado na equação 02, e a

modelagem matemática da superfície para transformar as coordenadas fotogramétricas observadas nas aeroftos em coordenadas de terreno no referencial geodésico cartesiano tridimensional local.

$$\begin{aligned} X &= X_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{11}x + m_{21}y + m_{31}c}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}c} \\ Y &= Y_0 + (Z - Z_0) \frac{m_{21}x + m_{22}y + m_{32}c}{m_{13}x + m_{23}y + m_{33}c} \end{aligned} \quad (02)$$

Onde:

(x,y) – coordenadas do ponto no referencial fotogramétrico;

(X,Y,Z) – coordenadas do ponto no referencial geodésico local;

c – distância focal da câmera;

(X0,Y0,Z0) – parâmetros de posição do centro perspectivo da aerofto;

mi – matriz dos parâmetros de rotação da fotografia nos três eixos ortogonais [R(κ),R(ϕ),R(ω)].

A obtenção do arquivo gráfico referenciado a um sistema de projeção cartográfica (UTM) por meio da monorrestituição segue as seguintes etapas: Na primeira, as entidades de interesse são vetorizadas visualizando a fotografia na tela do computador e delineando-as com ajuda do mouse. Para esta tarefa, foi utilizado um sistema de computação gráfica. Este sistema de computação gráfica (C.A.D.), disponibiliza as ferramentas necessárias à produção do arquivo digital na forma vetorial, como também o gerenciamento, manipulação e edição das entidades MITISHITA (1997). Ao término da digitalização, obtém-se um arquivo vetorial, onde todas as entidades estarão materializadas no referencial de imagem (CAD).

As linhas, pontos e polígonos são depois armazenados sob forma digital. Na segunda fase, são aplicadas transformações entre sistemas de referência do espaço imagem e objeto apenas às entidades vetorizadas, de maneira que os pontos que definem estas entidades sejam transformados do referencial digital da imagem para o Sistema Geodésico Local. Este procedimento obedece a seguinte seqüência através de um processo iterativo:

- Obtenção das coordenadas dos pontos vetorizados no referencial digital de imagem;
- Transformação das coordenadas do referencial digital de imagem para o referencial fiducial e deste para o referencial fotogramétrico corrigidas dos erros sistemáticos;
- Transformação das coordenadas do referencial fotogramétrico corrigido para o referencial do sistema geodésico local aproximado, utilizando a transformação projetiva plana;
- Determinação da coordenada Z (altimétrica) do ponto com as coordenadas aproximadas no MDS;

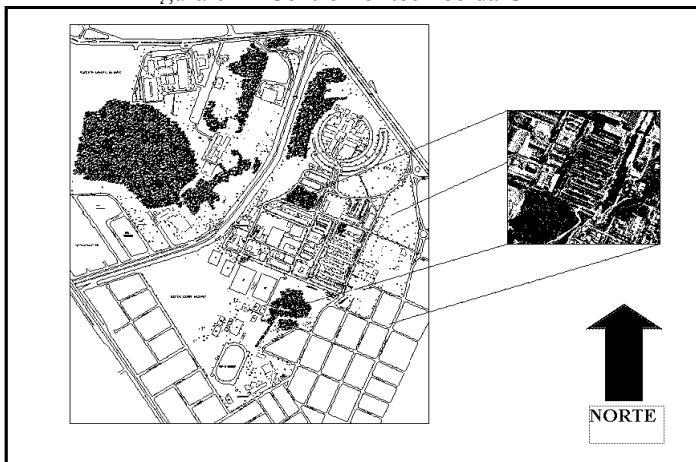
- Determinação das coordenadas dos pontos vetorizados, no sistema geodésico local, com as coordenadas fotogramétricas destes pontos, a coordenada Z e as equações de colinearidade inversa;
- Determinação de uma nova coordenada altimétrica mais precisa no MDS, e com esta determinar uma coordenada no sistema geodésico local com a equação da colinearidade inversa. Isto é feito uma vez que as coordenadas determinadas no item anterior são imprecisas devido ao fato de que a coordenada altimétrica do ponto foi obtida por interpolação. A nova coordenada altimétrica é mais precisa do que a determinada anteriormente;

Uma nova iteração deve ser realizada sempre que a diferença planimétrica entre as coordenadas geodésicas locais planas calculadas entre duas iterações for maior que a precisão definida. O processo é finalizado quando a diferença entre duas iterações consecutivas estiver dentro da precisão definida.

5. ÁREA DE ESTUDO E MATERIAIS

A área teste é uma região do Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, estado do Paraná. A figura 04 mostra a localização da área teste.

Figura 04 – Centro Politécnico da UFPR



Dois tipos de coberturas no solo são claramente identificados nesta região: as áreas residenciais de baixa densidade, compostas por residências de até dois pavimentos; a região do centro politécnico, composta por edificações de grande porte, jardins, vegetação arbórea e estacionamento. Quanto à rede viária, podem ser distinguidas ruas pavimentadas e ruas não pavimentadas, bem como duas rodovias.

Para a realização deste trabalho, foram utilizados os dados de um levantamento com o sistema de Varredura a Laser OPTECH / INS GPS APPLANIX, pertencente ao Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento (LACTEC), realizado em 04/07/2003 sobre a área de estudo. A tabela 01 apresenta as principais características do Sistema de Varredura a Laser utilizado.

Tabela 01 - Características do Equipamento Laser do LACTEC

Descrição do sistema	Característica
Modelo do equipamento	ALTM 2050
Fabricante do equipamento	Optech
Ano de fabricação	2002
Freqüência do pulso laser	50.000 pulsos por segundo – 50kHz
Freqüência de varredura	Variável de 1Hz a 100Hz
Ângulo de varredura	Variável 0° a 40°
Sistema Inercial (IMU) / GPS	Applanix
Capacidade de armazenamento	36 GigaBytes
Software da operação de vôo	ALTM-NAV (Optech)
Software do processamento	REALM (Optech)
Tipo de coleta de dados	Primeiro e último retorno do pulso
Densidade de pontos	Variável de 400.000 a 4.000.000
Número de pontos por m ²	Variável de 1 a 4 pontos
Precisões	50 cm na planimetria e 15 cm na altimetria

Fonte: Optech about ALTM System

Foi utilizada na monorrestituição uma fotografia aérea métrica, contendo a área de estudo, de 23 cm x 23 cm na escala de vôo 1/6000 (câmera WILD-RC10 com distância focal de 153,73mm), digitalizada matricialmente com um scanner fotogramétrico com 1000 d.p.i (1 píxel tem 0,0254 mm). Este material foi cedido pela empresa AEROSAT Arquitetura e Engenharia. Como verdade de campo, foi utilizada a Carta do Centro Politécnico em meio digital na escala 1:2000 cedido pelo Departamento de Geomática da Universidade Federal do Paraná.

6. METODOS

Com a finalidade de avaliar o potencial dos dados derivados da varredura a laser para o mapeamento, duas opções foram consideradas: a vetorização sobre imagens derivadas dos dados do varredor laser e o uso do MDS derivado do varredor a laser na monorrestituição digital.

6.1 Vetorização Sobre Imagens Derivadas Da Varredura A Laser

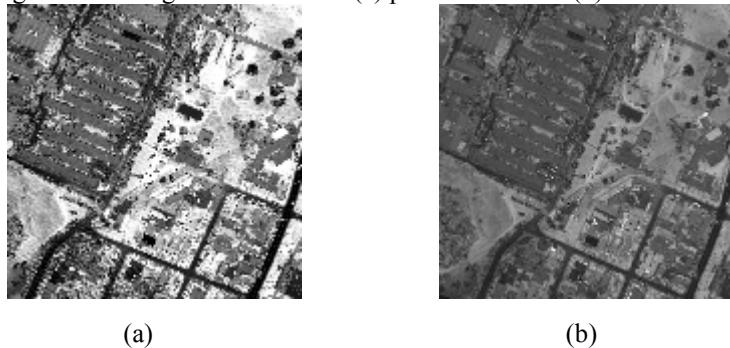
A primeira série de testes teve por objetivo avaliar o potencial do uso de imagens derivadas do Sistema de Varredura a Laser, através de uma composição colorida. Para isto, os dados foram transformados ao formato raster

e destas grades foram derivadas imagens. A primeira grade está associada à altimetria derivada do primeiro pulso, a segunda corresponde à altimetria oriunda do último retorno. Geraram-se ainda mais duas grades, associadas à intensidade do primeiro e último retorno. Nas figuras 05 a e b são mostradas as imagens derivadas da altimetria, transformadas em tons de cinza. Áreas mais claras correspondem a regiões mais altas. As figuras 06 a e b correspondem à intensidade do primeiro e último retorno.

Figura 05 – Imagem de altimetria em tons de cinza (a) primeiro retorno (b) último retorno.



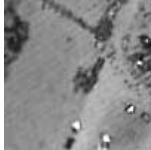
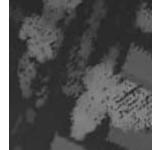
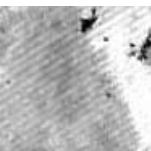
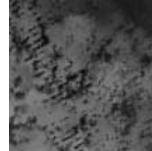
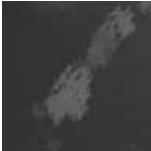
Figura 06 – Imagens intensidade (a) primeiro retorno (b) último retorno



Como cada imagem obtida a partir de varredura a laser contém informações específicas da área de estudo, inicialmente foi efetuada uma avaliação individual, verificando as entidades melhor visualizadas em cada uma destas imagens. Foram encontradas três grandes assinaturas espectralmente separáveis: vegetação; construções e vias. A caracterização dos tipos de vegetação presente na região pode ser visualizada na tabela 02. Verifica-se, através desta tabela, que para identificar os tipos de vegetação são necessárias diferentes imagens. Por exemplo, as árvores isoladas de grande ou médio porte,

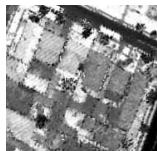
são visualizadas nas imagens de altimetria. Isto ocorre devido ao poder de penetração do pulso laser que permite identificar o topo das árvores, com o primeiro pulso e a superfície logo abaixo com o retorno do último pulso. Já tipos de vegetação baixa, como a grama seca, capoeirinha e bosques, são identificáveis nas imagens de intensidade.

Tabela 02 – Chave da interpretação dos dados laser – Vegetação

	Feição: Grama seca Imagen: Intensidade, último pulso Tonalidade cinza.		Feição: árvores de grande porte (isoladas) Imagen: Altimetria, primeiro pulso Tonalidade muito clara em relação à vizinhança, forma irregular.
	Feição: Capoeirinha Imagen: Intensidade, primeiro pulso. Tonalidade cinza clara.		Feição: Bosque Imagen: Intensidade, primeiro pulso. Tonalidade clara em relação à vizinhança, forma irregular, textura rugosa.
	Feição: árvores de médio porte isoladas Imagen: Altimetria, primeiro pulso Tonalidade clara em relação à vizinhança, forma irregular.		

A mesma análise foi repetida para as construções presentes na região. Verifica-se, através das amostras presentes na tabela 03, que as edificações de grande porte são facilmente identificadas através do tamanho de suas áreas e pelas bordas bem definidas. Já as construções de pequeno porte, por terem bordas muito próximas ou adjacentes, são difíceis de identificar.

Tabela 03 – Chave da interpretação dos dados laser – Construções

	Feição: Edificação grande porte Fonte: Altimetria, primeiro pulso Aparência clara em relação à vizinhança.		Feição: Edificações pequenas Fonte: Intensidade, primeiro pulso Aparência clara em relação à vizinhança, formando pequenas áreas regulares.
---	--	---	---

A tabela 04 mostra a análise aplicada às vias presentes na região, caracterizada por dois tipos de vias: ruas pavimentadas e as ruas não pavimentadas. Verificou-se que ambas as vias identificadas na tabela 04 tiveram uma resposta espectral bem definida na imagem intensidade derivada do varredor laser. Este fato ocorreu devido, em ambas as vias, à intensidade do píxel presente na feição ser bem diferente da intensidade da vizinhança.

Tabela 04 – Chave da interpretação dos dados laser – Vias

	Feição: Ruas pavimentadas Fonte: Intensidade, primeiro pulso. Aparência escura.		Feição: Ruas não pavimentadas Fonte: Intensidade, primeiro pulso Aparência clara
---	---	---	--

A análise visual se baseou, principalmente, no contraste entre o objeto e sua vizinhança. Este contraste pode variar ao longo da imagem em função da mistura de elementos. Alguns objetos foram facilmente identificados, como a malha viária de vias de asfalto. Por outro lado, as pequenas construções que ocupam as quadras das regiões vizinhas ao Centro Politécnico da UFPR não são de fácil identificação.

Devido aos resultados mostrados nas tabelas 02 a 04, verificou-se que as imagens em tons de cinza provindas do primeiro pulso e do último pulso, bem como a imagem intensidade do primeiro pulso, eram as melhores para a realização da composição colorida a ser usada na digitalização. Com base na análise das diferentes entidades e a disponibilidade das mesmas na base cartográfica usada como referência, foram vetorizadas apenas as edificações de grande área e as vias.

A coleta dos pontos foi realizada de forma independente, ou seja, depois de selecionadas as entidades, os pontos da imagem e da base foram coletados separadamente. Foram realizadas 36 coletas de pontos para as construções e 27 coletas para as vias.

6.2. Monorrestituição Digital Usando MDS Derivado da Varredura a Laser

Na segunda fase, um MDS derivado do primeiro retorno, foi utilizado no processo de monorrestituição digital. O sistema de monorrestituição digital implementado por MITISHITA (1997) no Sistema Monorrestituidor foi utilizado neste trabalho. O sistema dispõe de algoritmos matemáticos capazes de interpolar a coordenada altimétrica dentro da precisão necessária à retificação das coordenadas planimétricas do ponto. Neste trabalho foram testados dois algoritmos matemáticos de interpolação, o interpolador “vizinho mais próximo” e o interpolador “superfície triangular plana”, para verificar qual produz melhores resultados com os dados derivados do varredor laser.

Nos testes, foram vetorizadas as edificações de grande área e as vias. Estas entidades foram escolhidas por serem as entidades que foram vetorizadas na imagem obtida por varredura a laser. Assim pode-se realizar uma melhor avaliação dos resultados obtidos por estes dois procedimentos. Os mesmos pontos que foram coletados para as edificações e vias presentes na imagem derivada no varredor laser foram coletados na retificação realizada com o monorrestituidor, ou seja, 36 coletas de pontos nas construções e 27 coletas para as vias.

7. ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS RESULTADOS

Com as diferenças das coordenadas E e N das feições da base e das cartas obtidas da imagem e da monorrestituição, calculou-se a média e o desvio padrão da diferença para cada caso. A análise estatística baseou-se primeiramente em verificar a normalidade dos dados (diferença entre as coordenadas E e N) e depois verificar a hipótese de que a média da amostra coincide com a origem, ou seja, que não ocorre tendências.

No primeiro caso, o da verificação da normalidade, utilizou-se o teste de Kolmogorov-Smirnov (K-S Teste). A resposta deste teste é um valor de probabilidade, sendo que o resultado tem que ser maior que 0,05, para se confirmar o valor de normalidade dos dados. Para o cálculo deste teste utilizou-se o Software estatístico Statgraphics. A série de dados analisados corresponde à diferença das coordenadas de cada entidade. Para cada diferença foi calculada a distância quadrática generalizada como mostra a equação 03. (JOHNSON;WICHERN, 1998):

$$d_j^2 = (x_j - \bar{x})^T S^{-1} (x_j - \bar{x}) \quad (03)$$

onde:

$j = 1, \dots, n$;

x_j = vetor que contém as diferenças entre as coordenadas (ΔE e ΔN);

x = vetor que contém as médias de ΔE e ΔN ;

S = matriz variância covariância entre ΔE e ΔN .

Depois de verificada e validada a normalidade dos dados o próximo teste é da verificação da hipótese de que as diferenças se concentram em torno da origem. Para isto, é utilizado o teste estatístico T 2 de Hoetling. Este teste verifica que a média da amostra coincide com a origem, ou seja, é nula. Para isto, o nível de significância de $\alpha = 95\%$, foi adotado. Caso a hipótese não for satisfeita, ou seja, se a hipótese nula for rejeitada, a média das amostras não estão próxima de (0,0), o que quer dizer que ocorre uma tendência desta amostra se concentrar fora da origem (JOHNSON; WICHERN, 1998). Este teste é dado pela equação 04:

$$H_0 : \mu = \mu_0$$

$$H_1 : \mu \neq \mu_0$$

$$n (X - \mu_0) T S^{-1} (X - \mu_0) > [(n-1)p/n-p] F(p, n-p) \quad (04)$$

onde:

n = número da amostra;

X = vetor das médias de DE e DN;

$$\mu_0 = [0 \ 0]^T$$

S = matriz variância covariância entre DE e DN;

p = número de variáveis (no presente trabalho $p = 2$, pois só existem duas médias, DE e DN);

$F(p, n-p)$ = valor obtido na tabela F de Snedecor com $(p, n-p)$ graus de liberdade.

Para que as médias sejam iguais a zero, o lado esquerdo da equação 04 tem que ser numericamente maior que o lado direito. Sendo assim, a condição de hipótese nula (H_0), com um nível de 95% de significância pode ser aceita.

8. RESULTADOS

Para a avaliação dos dois processos de vetorização, foi utilizada a base cartográfica na escala 1:2000 do Centro Politécnico UFPR de Curitiba, produzida pelo Departamento de Geomática. Foram identificados elementos presentes neste documento cartográfico e no conjunto de dados (fotografias e varredura a laser).

Para uma avaliação mais consistente dos dados obtidos através da imagem de varredura a laser e da monorrestituição, utilizou-se o Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984, que estabelece parâmetros para a classificação de cartas

topográficas. A tabela 05 mostra que a avaliação pode ser realizada pelo Padrão de Precisão Cartográfica (PEC).

Tabela 05 – Especificações do PEC para classificar cartas na escala 1:2000

Classe	PEC	PEC
	Planimétrico medido no mapa (mm)	Planimétrico medido no terreno (m)
A	0,5	1,0
B	0,8	1,6
C	1,0	2,0

A tabela 06 mostra um resumo das diferenças observadas entre os pontos obtidos com a vetorização realizada sobre a imagem derivada do varredor laser para edificações de grande porte e vias.

Tabela 06 - Diferença entre os pontos obtidos na imagem de varredura a laser com a base cartográfica

		E(m)	N (m)	Resultante(m)
Edificações	Média	-0,093	-0,205	0,594
	D. P.	0,314	0,499	0,194
Vias	Média	-0,048	-0,023	0,564
	D. P.	0,449	0,405	0,198

O resumo dos cálculos estatísticos necessários para verificar a hipótese de normalidade (Teste K-S) e de coincidência da média com a origem (Teste T2) para as construções e vias vetorizadas sobre a imagem foram realizados com as equações 03 e 04 respectivamente. O resultado do Teste K-S certifica que as diferenças podem ser aproximadas por uma distribuição normal, uma vez que valor calculado pelo teste é maior que 0,05. Na tabela 6, o termo “Teste T2 – lado 01” refere-se ao resultado do lado esquerdo da tabela da equação 04 e é maior que o termo “Teste T2 – lado 02” que mostra o lado direito da mesma equação. Sendo assim a condição de hipótese nula (H_0), com um nível de 95% de significância, para os dois tipos de feições digitalizadas, pode ser aceita.

A seguir, uma análise similar foi aplicada para avaliar os resultados da monorestituição utilizando o modelo digital de superfície derivado de varredura a laser. A tabela 07 mostra a diferença dos pontos retirados da monorestituição (retificação do arquivo gráfico) com os mesmos pontos retirados da base, para as edificações de grande porte (área) e vias, utilizando o interpolador vizinho mais próximo. A tabela 08 mostra a mesa análise para o interpolador “superfície plana”.

Tabela 07 - Diferença entre pontos associada à Monorrestituição utilizando o interpolador vizinho mais próximo

		E(m)	N (m)	Resultante(m)
Edificações	Média	0,030	0,030	0,437
	D. P.	0,329	0,331	0,151
Vias	Média	0,007	-0,015	0,182
	D. P.	0,182	0,189	0,120

Tabela 08 - Diferença entre pontos associada a Monorrestituição utilizando o interpolador superfície plana

		E(m)	N (m)	Resultante(m)
Edificações	Média	-0,015	0,020	0,244
	D. P.	0,207	0,199	0,147
Vias	Média	0,019	-0,016	0,115
	D. P.	0,138	0,160	0,100

Em ambos casos, os resultados dos testes para verificação da inexistência de tendências para estes dois métodos, as amostras podem ser consideradas normais e é verificado segundo o teste T2, que as médias são iguais a zero. Sendo assim a condição de hipótese nula (H_0), com um nível de 95% de significância, para os dois tipos de feições digitalizadas pode ser aceita.

Finalmente, a avaliação da qualidade destes três produtos (digitalização nas imagens e monorrestituição usando os dois interpoladores) foi efetuada, utilizando o critério fixado pelo PEC. Como é estipulado pelo critério do PEC, calculou-se a distância associada a 90% dos pontos de cada amostra para o enquadramento do produto dentro das categorias fixadas pelo Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984. A tabela 09 apresenta o raio do círculo que contém as discrepâncias associadas a 90% dos pontos para “edificações” e “vias”, considerando as três metodologias. Comparando estes valores com os valores fixados pelo decreto Lei, os produtos poderiam ser classificados como classe A na escala 1:2000, sendo ainda necessária a verificação do erro padrão estipulado pelo mesmo Decreto Lei.

Tabela 09 – Raio de 90% dos pontos segundo a classificação de cartas do PEC.

		Edificações (m)	Vias (m)
Digitalização		0,88	0,77
Monorrestituição	Vizinho mais próximo	0,60	0,38
	Superfície Plana	0,43	0,29

O Decreto Lei 89.817 de 20 de junho de 1984 estipula que para uma carta ser avaliada como Classe A na escala 1:2000 o erro padrão medido no terreno deve ser menor que sessenta centímetros. Como este critério é satisfeito em todos os casos, o resultado dos três métodos atende à especificação da classe A

para a escala 1:2000. Embora todos os resultados atendam ao padrão nacional, verifica-se que a monorrestituição é melhor que a digitalização sobre a imagem obtida por varredura a laser nos dois casos propostos, sendo que a monorrestituição utilizando o interpolador superfície plana produz resultados melhores, pois ela apresenta diferenças menores para as “edificações” e “vias”. Cabe ressaltar que a análise apresentada se restringe apenas a duas entidades: “construções” de grande área e “vias”. Os mesmos não são válidos para outras entidades que não foram aqui analisadas em função das restrições apresentadas e discutidas.

9. CONCLUSÕES

Com este trabalho verificou-se que imagens obtidas através dos dados do sistema de varredura a laser, tanto do primeiro e do último retorno como as respectivas imagens intensidade, podem ser aproveitadas individualmente ou sob forma de composições coloridas para efetuar a digitalização na tela do computador. Em algumas feições, como construções de grandes áreas e vias pavimentadas, obteve-se resultados na escala 1:2000 segundo o PEC. No caso da vetorização da imagem de varredura a laser sobre as vias, os resíduos foram menores que os resíduos das construções. Isto ocorreu devido à fronteira das vias estarem mais bem definidas nas imagens em função do contraste.

A utilização de um MDS, derivado da varredura a laser no processo de monorrestituição digital usando o Sistema Monorestituidor Digital oferece grandes vantagens, pois possibilita uma melhor definição das bordas dos objetos presentes na superfície, devido a utilização de fotografias aéreas métricas. Verificou-se através dos resultados obtidos que utilizando interpolador superfície triangular plana, com o MDS derivado do varredor laser, pode realizar o mapeamento de edificações de grande porte equivalente ao mapeamento estereofotogramétrico.

Mesmo a imagem de o varredor laser ser ortogonal, seus resultados foram inferiores aos da monorestituição devido a erros do operador, na hora da definição das bordas das edificações e vias. Esta falha ocorre devido ao fato das bordas não serem bem definidas na geração da grade. O tamanho do píxel que define a imagem tem de ser compatível com a quantidade de pontos levantados com o varredor laser. E, mesmo a monorrestituição sendo afetada pelos erros de orientação da imagem, além do MDS que é comum ao processo de geração da imagem, obteve resultados mais próximos a restituição estereofotogramétrica devido a uma melhor interpretação visual das entidades utilizadas no trabalho.

Os resultados aqui apresentados foram obtidos usando dados de uma única área teste, motivo pelo qual se recomenda verificar a eficiência desta metodologia em outras regiões. Outro tópico que merece estudo é o uso do modelo digital derivado da varredura a laser na monorrestituição de fotografias aéreas obtidas com câmaras de pequeno formato. Finalmente, recomenda-se

avaliar esta metodologia usando levantamentos do varredor laser com diferentes características (por exemplo, densidade de pontos), para verificar a viabilidade da digitalização de outras entidades, não consideradas no presente estudo.

REFERÊNCIAS

- ACKERMANN, F., Airborne laser scanning – present status & future expectation. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2000, pp 64-67.
- ANDRADE, J. B., *Fotogrametria*. 1^a ed. Curitiba, Editora UFPR, 1998.
- BALTSAVIAS, E. P., Airbone Laser Scanning: Basic Relation and Formulas. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, vol. XXXIII, Part B3, Amsterdam, 2000, pp 199-214.
- BEHAN, A., On the Matching Accuracy of Rastering Scanning Laser Altimeter Data. *ISPRS – International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*, vol. XXXIII, Part B3, Amesterdam, 2000.
- BURROUGH, P.A. *Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment*. Clarendon: Press-Oxford. 1989.
- CAVASSIM, I. J., Utilização de dados derivados do varredor laser na geração de cartas planimétricas na escala 1:2000. Curitiba, 2004. *Dissertação de Mestrado*, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.
- DALMOLIN, Q. & SANTOS, D. R., *Sistema Laserscanning: Conceitos e Princípios de Funcionamento*. Curitiba, 2003. Editora do Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas – UFPR.
- FERNANDES, J. C., Criação de Modelos Digitais de Terreno. *Revista do Instituto Geográfico e Cadastral*, 1998, pp 49-54.
- HAALA, N. & BRENNER, C., Interpretation of urban surface models using 2D building information. *Computer Vision and Image Understanding*. Vol 72, nº 2 November, pp 204-214, 1999.
- MAKAROVIC, B., Digital mono-ploter. *ITC Journal*, 1973-4, pp. 583-600.
- MITISHITA, E. A., Monorrestituição digital de fotos associada com sistema de computação gráfica CAD, para fins de mapeamento na área florestal. Curitiba, 1997. *Tese de doutorado*, Curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, UFPR.
- OPTECH about ALTM System. <http://www.optech.on.ca/> . Acesso em 16/10/2003.
- SOUZA, S. R. N., Uso da monorrestituição digital, aerofotos de pequena escala e modelamento matemático de superfície (DTM) para realização de mapeamento planimétrico. Curitiba - PR, 2001. *Dissertação de mestrado*, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas, UFPR.
- WEHR, A. & LOHR U., Airbone Laser Scanning – An Introduction and Overview. *ISPRS Journal of Photogrammtry & remote Sensing*, pp. 68-82, 1999.

WOLF, P. R., *Elements of photogrammetry*. 2^a ed. McGraw-Hill Kogakusha, Ltd., 1983.

(Recebido em abril/05. Aceito em agosto/05.)