

# **O USO DE FEIÇÕES RETAS EXTRAÍDAS DO MDT GERADO PELO SISTEMA DE VARREDURA LASER COMO APOIO PARA O CÁLCULO DA RESSEÇÃO ESPACIAL DE IMAGENS DIGITAIS**

*Using straight features extracted from MDT obtained from laser scanning system  
as a control for calculating spatial resection of digital images.*

QUINTINO DALMOLIN<sup>1</sup>  
DANIEL RODRIGUES DOS SANTOS<sup>1</sup>  
ROOSEVELT DE LARA SANTOS JR.<sup>1</sup>  
ING-HABIL HANS-PETER BÄHR<sup>2</sup>

Universidade Federal do Paraná-UFPR  
<sup>1</sup>Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas  
CEP 81531-990 - Curitiba PR – Brasil  
{qdalmolin;danielsantos;rls}@ufpr.br  
Universität Karlsruhe (TH) – Karlsruhe – Alemanha  
<sup>2</sup>Institut für Photogrammetrie und Fernerkundung  
baehr@ipf.uni-karlsruhe.de

## **RESUMO**

O presente trabalho apresenta o cálculo de resseção espacial de imagens digitais usando como apoio de campo feições retas extraídas de uma imagem de intensidade, proveniente do sistema de varredura laser. As feições retas são extraídas automaticamente na imagem de intensidade e na imagem digital e as correspondências são determinadas manualmente pelo operador. Os parâmetros de orientação exterior da imagem digital, foram estimados através do método paramétrico com injunções de posição. O objetivo deste trabalho é apresentar a viabilidade da integração de imagens de intensidade e imagens digitais adquiridas com câmaras de pequeno formato, para o cálculo da resseção espacial de imagens digitais. Os resultados obtidos mostraram que, a extração automática do apoio de campo sobre a imagem de intensidade é um processo viável e auxiliar de forma eficiente na determinação dos parâmetros de orientação exterior da imagem digital, além de apresentar sua potencialidade na integração de imagens digitais e imagens

de intensidade.

**Palavras-chaves:** Varredura laser; Resseção espacial; Extração de feições.

### ABSTRACT

This paper deals with a method of spatial resection of digital images with the help of straight features extracted from images of laser scanning as field control. These straight features are automatically extracted from laser scanning images and from digital images, and their correspondences are determined by the operator manually. The parameters of image's outer orientation were estimated by the Parametric Method with positioning constraint. This paper aims at presenting the availability of intensive image use as field control for spatial resection of digital image acquired from small cameras. The obtained results showed that the use of straight features gotten from laser scanning can be used in digital image spatial resection.

**Key words:** Laserscanning; Spatial resection; Features extraction.

## 1. INTRODUÇÃO

O uso de imagens adquiridas com o sistema de varredura laser (imagem de intensidade) e com câmaras de pequeno formato (imagem digital) tem sido objeto de investigação para várias aplicações nas áreas de Ciências Geodésicas e afins. A grande potencialidade do sistema de varredura laser encontra-se na disponibilidade direta das informações tridimensionais de cada ponto varrido no terreno. Estas informações possibilitaram o uso do sistema em diversas aplicações, inclusive para a realização de algumas tarefas da Fotogrametria como, a geração de MDT (Modelo Digital do Terreno) e MNE (Modelo Numérico de Elevação), a aerotriangulação e a resseção espacial de imagens.

Neste trabalho, a aplicação de interesse na integração dos dados descritos é a determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara ( $\kappa$ ,  $\varphi$ ,  $\omega$ ,  $X_0$ ,  $Y_0$ ,  $Z_0$ ), por meio de um processo de resseção espacial de imagens, com uso de feições retas como apoio de campo extraídas na imagem de intensidade. Para isto, uma das informações primordiais é são as coordenadas tridimensionais das feições que serão utilizados como apoio de campo.

A determinação de coordenadas tridimensionais com uso da Fotogrametria possui alguns problemas, tais como, em áreas homogêneas a informação posicional é muito escassa e a precisão vertical das coordenadas não é satisfatória, comparada à precisão horizontal. Por isso, existe uma demanda por tecnologias que solucionam esses problemas e que tem sido conquistada com a utilização de imagens e dados provenientes do sistema de varredura laser.

O objetivo deste trabalho é apresentar a viabilização do uso de feições retas como apoio de campo, extraídas das imagens de varredura laser, no processo de resseção espacial de imagens digitais, adquiridas com câmaras de pequeno formato.

As feições retas foram extraídas automaticamente na imagem de varredura laser e na imagem digital, por meio de algoritmos de extração de feições retas, e as suas correspondências foram determinadas manualmente pelo operador.

Os parâmetros de orientação exterior da câmara foram estimados pelo método paramétrico com injunção de posição, aplicado ao modelo dos planos equivalentes, desenvolvido por TOMMASELLI (1993). Os resultados obtidos mostraram a viabilidade do uso de feições retas como apoio de campo, extraídas automaticamente da imagem digital e da imagem de intensidade, sendo bastante promissor na automação do método de resseção espacial.

## 2. CONSIDERAÇÕES GERAIS

O uso de feições lineares no cálculo da resseção espacial de imagens, é bastante abordada na literatura (LUGNANI 1980; TOMMASELLI e LUGNANI, 1988; TOMMASELLI, 1993; DAL POZ, 1996, DAL POZ e TOMMASELLI, 1999), bem como feições *free-form* (BUCHANAN, 1992; ZIELINSKI, 1992; PETA e PATIAS, 1994; FORKET, 1996; ZALMASON, 2000; KOKUBUM e TOMMASELLI, 2002; HABIB et al, 2003), entre outros.

Imagens oriundas do sistema de varredura laser têm sido utilizadas para várias aplicações. Recentemente, HABIB et al (2004a), integraram imagens digitais adquiridas por câmaras de pequeno formato e imagens derivadas do sistema de varredura laser para propósitos de calibração de câmaras digitais e sistema de varredura.

HABIB et al (2004b), utilizou feições *free-form*, derivadas do sistema de varredura laser, como controle de campo na determinação da orientação absoluta de imagens. Os resultados mostraram a compatibilidade existente entre os sistemas e a versatilidade do uso de feições como controle de campo derivadas do sistema de varredura laser. Ainda, HABIB et al (2004c) integrou dados do sistema de varredura laser e imagens digitais para aplicações de Fotogrametria à Curta-Distância. Feições retas construídas pela intersecção entre planos detectados automaticamente foram utilizadas para a resseção espacial das imagens.

DELARA et al (2004), integrou imagens provenientes de câmaras de pequeno formato e do sistema de varredura laser para a aerotriangulação de um bloco de imagens digitais. A integração das imagens forneceu um maior número de pontos de apoio para o processo de aerotriangulação e os resultados obtidos mostraram a viabilidade da integração dos dados tomados por câmaras de pequeno formato e o sistema de varredura laser, além de apresentar resultados compatíveis com o método convencional de aerotriangulação.

A seguir serão apresentados conceitos que descrevem os métodos e as imagens utilizadas para a realização deste trabalho.

## 2.1 O Sistema de Varredura Laser

O sistema de varredura laser mede distâncias entre a plataforma do sensor e os objetos. O sistema é composto basicamente por 3 componentes, isto é, o receptor GPS, o Sistema Inercial e o Laser (sistema). As coordenadas tridimensionais dos pontos no terreno são determinadas em função do tempo entre a emissão e recepção do pulso laser, das coordenadas fornecidas pelo receptor GPS e das inclinações da aeronave, fornecidas pelo sistema inercial de navegação.

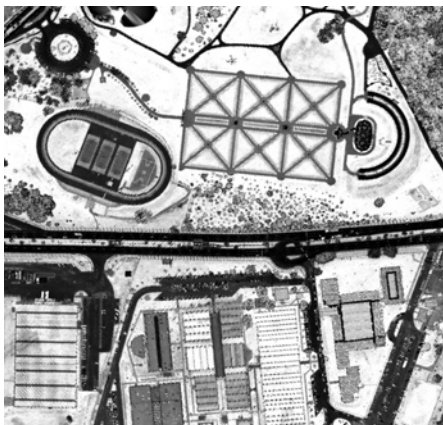
A plataforma se desloca para que o sistema possa varrer o terreno no sentido perpendicular ao deslocamento da aeronave. O posicionamento do sensor é corrigido diferencialmente (DGPS) em pós-processamento e as atitudes de inclinação da aeronave, são determinadas pelo sistema inercial. Os sistemas GPS e Inercial são devidamente calibrados antes do início de qualquer operação. Maiores detalhes sobre os princípios de funcionamento do sistema podem ser encontrados em DALMOLIN e SANTOS (2004).

## 2.2 Imagem de Varredura Laser

A imagem de varredura laser utilizada neste trabalho, foi gerada em setembro de 2003 pelo sistema da *Optech ALTM 2050 system (Airborne Laser Terrain Mapper)*, e gentilmente cedida pelo LACTEC/UFPR (Instituto de Tecnologia para o Desenvolvimento). Os pontos perfilados com espaçamento irregular, foram obtidos sequencialmente no sentido perpendicular à linha de voo. Os dados fornecidos pelo sistema são apresentados num arquivo bruto (em linha por texto), contendo as seguintes informações: coordenadas EN (Este, Norte) no sistema referencial adotado, altitude ortométrica (H) e valores de intensidade de reflectância de cada ponto varrido pelo sistema.

A área teste utilizada situa-se no Campus III - Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná. A figura 1 apresenta uma porção da região da imagem de intensidade. O voo foi realizado pela empresa de aerolevantamentos Engefoto e o processamento dos dados foi realizado pelo LACTEC.

Figura 1: Imagem de intensidade de varredura laser (Fonte: LACTEC).



A imagem de intensidade foi interpolada numa grade regular com 0.4m de resolução e com uma correspondência de 0.25m de resolução espacial no terreno. A resolução espacial das imagens digitais é coincidente com a imagem de intensidade, conforme apresentado por DELARA et al (2004).

## 2.4 Sistemas Fotogramétrico e de Varredura Laser

A imagem digital é uma matriz bidimensional, em função de coordenadas, com seus elementos (pixels) dispostos em coluna (C) e linha (L), com origem no canto superior esquerdo. Cada pixel está associado a um par de coordenadas (C, L) e à uma tonalidade de cinza.

Para transformar o sistema de imagem em sistema de coordenadas do centro da imagem (similar ao sistema fiducial), foi realizada uma translação para o centro da imagem seguida da aplicação de um fator de escala (dada pelo tamanho do pixel), como segue:

$$\begin{aligned} x' &= \left( \frac{TC - 1}{2} - C \right) * tp \\ y' &= \left( L - \frac{TL - 1}{2} \right) * tp \end{aligned} \quad (1)$$

onde,

- $x', y'$ : coordenadas do sistema do centro da imagem
- $TC, TL$ : tamanho da imagem em coluna e linha; e
- $tp$ : tamanho do pixel.

Finalmente, para transformar o sistema do centro da imagem para o sistema fotogramétrico foi aplicada uma translação considerando o ponto principal, como apresentado na equação (2), abaixo.

$$\begin{aligned}x &= x' - x_{pp} \\ y &= y' - y_{pp}\end{aligned}\tag{2}$$

sendo,

- $x, y$ : coordenadas no sistema fotogramétrico; e
- $x_{pp}, y_{pp}$ : coordenadas do ponto principal.

Para o sistema de referência do espaço-objeto (sistema de coordenadas do laser), foi adotado o Sistema Geodésico Brasileiro – SGB, no qual o datum planimétrico é o vértice Chuá, localizado em Minas Gerais e o datum vertical é a referência de nível do marégrafo de Imbituba, Santa Catarina. A figura de representação da Terra é o elipsóide de referência IGGU 1967, compondo o chamado South American Datum 1969 ou SAD69.

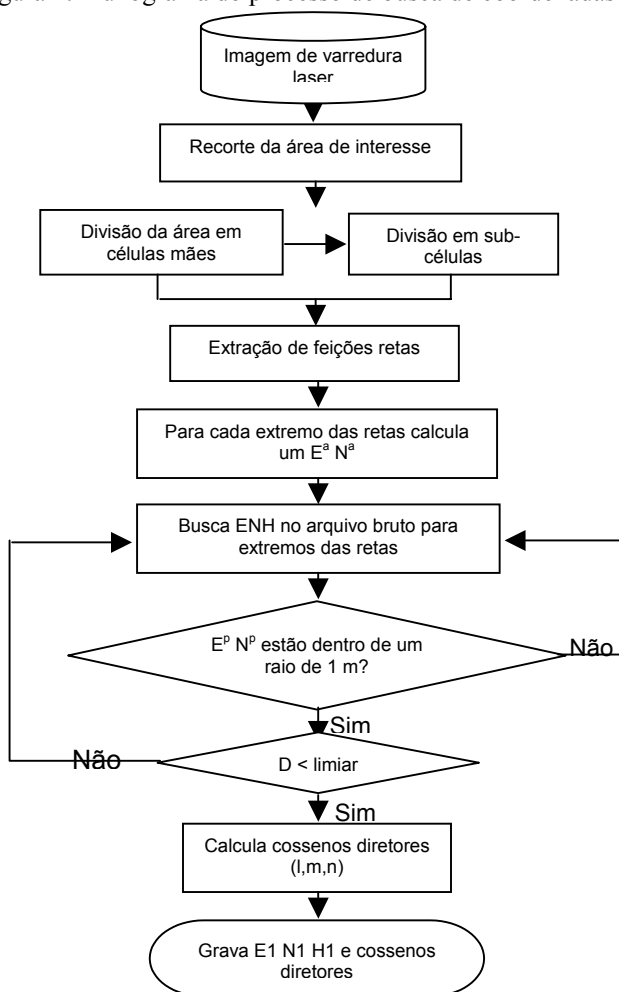
### 3. METODOLOGIA

#### 3.1 Extração De Feições Retas

As feições retas foram extraídas automaticamente na imagem de intensidade e na imagem digital. O algoritmo de extração de feições, implementado por ARTERO e TOMMASELLI (2002), possui um fluxo de etapas de processamento digital de imagens e ajustamento das feições retas. As feições retas são extraídas nas imagens digital e de varredura laser, que se encontram no sistema de coordenadas de imagem.

Extraídas as feições retas na imagem de intensidade, para cada ponto extremo das mesmas é verificado no arquivo bruto (arquivo texto disponibilizado pelo sistema laser) suas coordenadas tridimensionais (ENH) e calculados os cossenos diretores ( $l, m, n$ ). A figura 2, apresenta o fluxograma completo da metodologia para a busca das coordenadas no arquivo bruto.

Figura 2: Fluxograma do processo de busca de coordenadas ENH



De acordo com a figura 2, a imagem de intensidade é recortada segundo a área que recobre a imagem aérea, a qual se pretende determinar seus parâmetros de orientação exterior, e o arquivo bruto é dividido em arquivos de célula mãe e sub-células (tal como o procedimento realizado para gerar pirâmides de imagens). Este procedimento foi realizado para diminuir o tamanho do arquivo de coordenadas que será pesquisado (arquivo ASCII, linhas por texto, provenientes do sistema de

varredura laser), com a finalidade de encontrar as coordenadas tridimensionais do terreno com maior velocidade e eficiência computacional.

Após aplicar o algoritmo de extração de feições retas na imagem de intensidade, para cada ponto extremo são calculadas as coordenadas EN aproximadas utilizando a seguinte expressão:

$$\begin{aligned} E^a &= E^i + (C - 1) * GSD \\ N^a &= N^i + (L - 1) * GSD \end{aligned} \quad (3)$$

Onde,

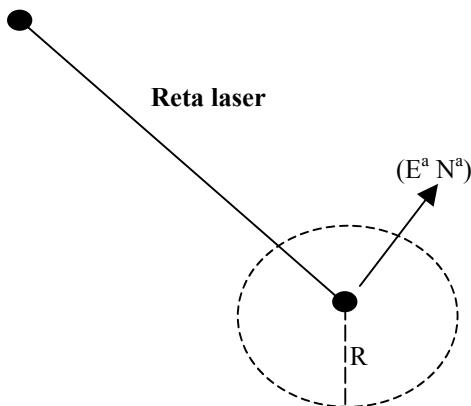
- $E^i, N^i$ : coordenadas no sistema do espaço-objeto iniciais;
- $C, L$ : coordenadas coluna e linha do sistema de imagem;
- $GSD$ : resolução do pixel no terreno; e
- $E^a, N^a$ : coordenadas no sistema do espaço-objeto aproximadas.

As coordenadas aproximadas são gravadas em arquivo texto e utilizadas para a busca das coordenadas reais, que neste trabalho serão denominadas  $E^p N^p H^p$ . Desta forma, a priori é verificado se a coordenada pesquisada no arquivo bruto (ASCII) está dentro de um raio de 1 metro em relação ao ponto extremo da reta (coordenada aproximada, calculada pela equação 3) (ver figura 3). Em seguida, calcula-se a distância euclidiana entre as coordenadas aproximadas ( $E^a N^a$ ) e reais ( $E^p N^p$ ). Caso a distância calculada seja menor que um limiar estabelecido, atribui-se ao ponto aproximado as coordenadas reais pesquisadas.

Apesar da imagem de varredura ser interpolada numa grade regular com resolução de 0.4 m, por isso foi estabelecido um limiar de 0.8 m, pois não foi possível encontrar para todos os pontos extremos, no arquivo bruto, pontos com distância inferior ou igual a regularidade na distribuição dos pontos interpolados pelo aplicativo do sistema. Provavelmente pela deficiência dos interpoladores utilizados. Portanto, neste trabalho, a precisão planimétrica é de 0.8m. A figura 3 apresenta o esquema descrito.



Figura 3: representação de uma reta e o raio que determina a janela de busca no arquivo bruto.

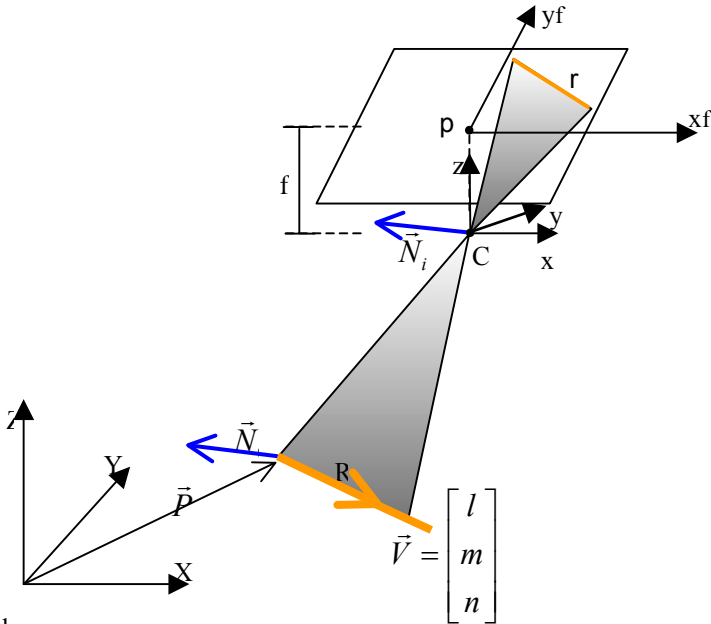


Finalmente, calcula-se os cossenos diretores para cada feição reta analisada no sistema de coordenadas do laser, gravando-os no arquivo juntamente com as coordenadas do primeiro ponto extremo.

### 3.2 Modelo Matemático

TOMMASELLI (1993), desenvolveu um modelo matemático que relaciona funcionalmente uma reta no espaço-objeto com sua homóloga no espaço-imagem, denominado modelo dos planos equivalentes. A figura 4 apresenta o esquema das relações entre as retas no espaço-imagem e no espaço-objeto.

Figura 4 – Geometria dos Planos Equivalentes  
(Adaptado de TOMMASELLI, 1993).



Onde,

- R: feição reta no espaço-objeto;
- r: feição reta no espaço-imagem homóloga de R;
- [XYZ]: referencial de Terreno;
- $\vec{P} = \begin{bmatrix} X_1 \\ Y_1 \\ Z_1 \end{bmatrix}$ : coordenadas tridimensionais de um ponto P qualquer da reta R;
- $\vec{V}$ : cossenos diretores da reta R;
- pp: ponto principal;
- xf, yf: coordenadas no sistema fotogramétrico;
- CP: centro perspectivo em função de  $(\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0)$ : posição da câmara;

- $\vec{N}_0 = \begin{bmatrix} nx \\ ny \\ nz \end{bmatrix}$  : vetor normal ao plano de interpretação no espaço-objeto;
- $\vec{N}_i = - \begin{bmatrix} f \cos \theta \\ f \sin \theta \\ -\rho \end{bmatrix}$  : vetor normal ao plano de interpretação no espaço-imagem;
- $f$ : distância focal da câmara; e
- $\theta, \rho$  : parâmetros da reta na sua forma normal.

De acordo com TOMMASELLI (1993), o vetor  $\vec{N}_i$  normal ao plano de interpretação no espaço-objeto, é definido pelo produto vetorial do vetor diretor da linha reta ( $\vec{V}$ ) e o vetor diferença (CP- $\vec{P}$ ). Assim, sendo  $l, m, n$  as componentes do vetor diretor da linha reta, o vetor  $\vec{N}_o$  é dado pela expressão:

$$\vec{N}_o = \begin{bmatrix} nx \\ ny \\ nz \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -n(Y_0 - Y) + m(Z_0 - Z) \\ n(X_0 - X) - l(Z_0 - Z) \\ -m(X_0 - X) + l(Y_0 - Y) \end{bmatrix} \quad (4)$$

Multiplicando o vetor  $\vec{N}_o$  pela matriz de rotação  $R$ , elimina-se a diferença angular entre os sistemas de referência da imagem e do objeto resultando em um vetor normal ao plano de interpretação no espaço-imagem, o qual possui a mesma direção que o vetor  $\vec{N}_i$ , também normal ao plano de interpretação no espaço-imagem, mas com magnitude diferente (Tommaselli, 1993).

$$\vec{N}_i = \lambda R \vec{N}_o \quad (5)$$

Onde  $\lambda$  é o fator de escala e  $R$  a matriz de rotação com elementos  $r_{ij}$  definida pela sequência  $\kappa, \phi, \omega$ . Por sua vez, o elemento  $\lambda$  pode ser algebricamente eliminado da equação através de operações de divisão entre as linhas da matriz.

Para Tommaselli (1993), a equação (6) é subdividida em dois conjuntos de equações, de acordo com o valor do parâmetro  $\theta$  a fim de evitar divisões por zero como segue,

1) Para intervalos entre  $45^0 < \theta < 135^0$  ou  $225^0 < \theta < 315^0$  tem-se o conjunto:

$$\begin{aligned} a &= -\frac{r_{11}.nx + r_{12}.ny + r_{13}.nz}{r_{21}.nx + r_{22}.ny + r_{23}.nz} \\ b &= -f \frac{r_{31}.nx + r_{32}.ny + r_{33}.nz}{r_{21}.nx + r_{22}.ny + r_{23}.nz} \end{aligned} \quad (6)$$

2) Para intervalos entre  $315^0 < \theta < 45^0$  ou  $135^0 < \theta < 225^0$ , tem-se o conjunto:

$$\begin{aligned} a^* &= -\frac{r_{21}.nx + r_{22}.ny + r_{23}.nz}{r_{11}.nx + r_{12}.ny + r_{13}.nz} \\ b^* &= -f \frac{r_{31}.nx + r_{32}.ny + r_{33}.nz}{r_{11}.nx + r_{12}.ny + r_{13}.nz} \end{aligned} \quad (7)$$

Os detalhes sobre a formulação matemática apresentada acima podem ser encontrados em TOMMASELLI (1993) e/ou TOMMASELLI e TOZZI (1996).

### 3.3 Determinação Dos Parâmetros De Orientação Exterior Utilizando Feições Retas

Para a determinação dos parâmetros de orientação exterior da câmara foi realizada uma resseção espacial na imagem digital. A imagem utilizada neste trabalho foi adquirida por uma câmara de pequeno formato da Sony DSC-F717 com resolução de 2560x1920 e dimensões do pixel de 0.0054 mm, que equivale a 0.4 m no terreno, gentilmente cedida pela empresa AGRITEC Aerolevantamentos. As imagens digitais foram tomadas a uma altura de vôo de aproximadamente 750 m, sendo a altitude média da região 900 m (Fonte: Lactec). A tabela 1 apresenta os parâmetros de orientação interior devidamente calibrados, que definem a geometria interna da câmara.

Tabela 1 – Parâmetros de orientação interior (Fonte: DELARA, 2004).

focal (mm)	xpp (mm)	ypp (mm)	K1 E-03	K2 E-05	K3 E-07	P1 E-04	P2 E-05	A E-04	B E-06
10.0	-0.246	-0.142	-2.25	2.49	1.29	-1.17	6.90	-1.50	9.54

Foram coletadas 43 feições retas na imagem digital e a tabela 2 apresenta os parâmetros de algumas das feições retas (**a**, **b**) coletadas, sua parametrização (**h** ou **v**, horizontal ou vertical), suas respectivas precisões (**σ<sub>a</sub>** **σ<sub>b</sub>**) e as coordenadas ENH de um dos pontos extremos da reta extraídas no espaço-objeto e seus cossenos diretores. As precisões dos parâmetros **a** e **b** foram obtidas com uso da seguinte equação (TOMMASELLI, 1993):

1) Para intervalos entre  $45^0 < \theta < 135^0$  ou  $225^0 < \theta < 315^0$  tem-se o conjunto:

$$\sigma_a^2 = \frac{2(a^2 + 1)}{(x_2 - x_1)^2} \sigma_{xy}^2$$

$$\sigma_b^2 = \frac{x_2^2 - x_1^2}{(x_2 - x_1)^2} (a^2 + 1) \sigma_{xy}^2$$
(8)

2) Para intervalos entre  $315^0 < \theta < 45^0$  ou  $135^0 < \theta < 225^0$ , tem-se o conjunto:

$$\sigma_a^{2*} = \frac{2(a^{*2} + 1)}{(y_2 - y_1)^2} \sigma_{xy}^2$$

$$\sigma_b^{2*} = \frac{y_2^2 - y_1^2}{(y_2 - y_1)^2} (b^{*2} + 1) \sigma_{xy}^2$$
(9)

onde:

- $\sigma_a^2, \sigma_b^2$  : variância dos parâmetros  $a$  e  $b$ ;
- $\sigma_a^{2*}, \sigma_b^{2*}$  : variância dos parâmetros  $a^*$  e  $b^*$ ; e
- $\sigma_{xy}^2$  : variâncias dos pontos  $xy$ .

Tabela 2 – Parâmetros da reta e suas respectivas precisões.

Reta	h/v	a	b(mm)	$\sigma a$	$\sigma b(mm)$
1	v	0.209	-3.375	0.009	0.028
2	h	-0.107	3.954	0.270	2.026
3	h	-1.023	1.369	0.027	0.060

Coordenadas do ponto extremo das retas extraídas no espaço-objeto e seus cossenos diretores.

Reta	E (m)	N(m)	H(m)	l	m	n
1	677.265.69	7183.305.32	907.59	-0.511	0.858	0.041
2	677.337.05	7183.255.63	914.55	-0.839	-0.539	-0.072
3	677.382.63	7183.484.42	906.76	-0.411	-0.911	-0.001

Foi implementado um aplicativo em C++ ambiente Builder 5.0 da Borland, para a coleta manual das retas homólogas no sistema de coordenadas laser e sistema de coordenadas fotogramétricas. Neste aplicativo, as feições retas são extraídas automaticamente em ambos os espaços imagem e objeto, de acordo com o fluxograma apresentado na figura 2. A figura 5 apresenta o conjunto de feições retas extraídas.

Figura 5: Feições retas extraídas no espeço-objeto (laser) e imagem (imagem digital).



Como pode ser visualizado na figura 5, as feições retas são extraídas na imagem de intensidade (lado esquerdo da figura 5) e na imagem digital (lado direito). As feições retas homólogas (apresentadas em cor verde na figura 5), são identificadas manualmente pelo operador. A metodologia de identificação de feições retas é muito mais rápida e eficiente do que com pontos, pois a identificação das retas são feitas aproximadamente e o algoritmo reconhece a reta de interesse, sem a necessidade de recursos de *zoom*.

Após a identificação manual das retas homólogas, os parâmetros de orientação exterior da câmara foram estimados por meio de métodos de ajustamento de observações. Como o modelo matemático dos planos equivalentes é explícito e não linear, o método de estimação utilizado foi o método paramétrico iterativo com injunções de posição. O modelo funcional do método paramétrico é dado por (DALMOLIN, 2002):

$$L_a = F(X_a) \quad (10)$$

onde,

$L_a$  : vetor das observações ajustadas;

$F$  : função matemática (modelo dos planos equivalentes);

$X_a$  : vetor dos parâmetros ajustados.

Pode-se determinar ainda:

$$\begin{aligned} L_a &= L_b + V \\ X_a &= X_0 + X \end{aligned} \quad (11)$$

sendo,

$L_b$  : vetor das observações;

$V$  : vetor dos resíduos;

$X_a$  : vetor dos parâmetros ajustados;

$X$  : correção dos parâmetros aproximados; e

$X_0$  : vetor dos parâmetros aproximados.

Como o modelo dos planos equivalentes não é linear, é necessário linearizar o modelo funcional apresentado, isto é realizado a partir da introdução da equação

(11) na equação (10) e por meio da fórmula de Taylor em torno do ponto  $X_0$ , onde obtém-se:

$$L_b + V = F(X_0 + X) = F(X_0) + \frac{\partial F}{\partial X_a} \Big|_{Xa=X_0} \quad (12)$$

Que através de manipulações descritas em DALMOLIN (2002), obtém-se o modelo matemático linearizado, como segue:

$$V = AX + L \quad (13)$$

Aplicando o MMQ (Método dos Mínimos quadrados) tem-se o vetor X, como segue:

$$X = -(A^T P A)^{-1} (A^T P L) \quad (14)$$

O método paramétrico com injeção de é descrito pela adição do meodelo funcional apresentado por:

$$L_a^i = G(X_a) \quad (15)$$

onde,  $L_a^i$  é o vetor das novas observações ajustadas, relativas às injeções, sendo o modelo linearizado como segue:

$$V^i = A^i X + L^i \quad (16)$$

onde,

$V^i$  : vetor dos resíduos das injeções;

$$A^i = \frac{\partial G}{\partial X_a} \Big|_{Xa=X_0} ; e$$

$L^i$  : vetor das observações relativo às injeções.

A solução da correção aos parâmetros por meio do Método Paramétrico com injeções é dado como segue:



$$X = -(N + N^i)^{-1}(U + U^i) \quad (17)$$

onde,

$$N^i = P^i;$$

$P^i$  : matriz peso das injunções;

$$U^i = P^i L^i;$$

$$N = (A^t P A)^{-1}; \text{ e}$$

$$U = (A^t P L).$$

A matriz variância-covariância dos parâmetros ( $\sum X_a$ ) é dada por:

$$\sum X_a = \sigma_0^2 (N + N^i)^{-1} \quad (18)$$

sendo  $\sigma_0^2$  a variância de unidade peso a posteriori, dada pela seguinte expressão:

$$\sigma_0^2 = \frac{(V^t P V) + (V^{it} P^i V^i)}{n + n^i - u} \quad (19)$$

onde,

$n$  : número de observações;

$n^i$  : número de injunções; e

$u$  : número de incógnitas.

#### 4. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Como descrito anteriormente, para estimar os parâmetros de orientação exterior da imagem foi utilizado o método paramétrico com injunções de posição. A tabela 3 mostra os parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões, utilizadas como injunção de posição no método. Na concepção de valores aproximados para os parâmetros de orientação exterior, pode-se considerar a

determinação dos mesmos por meio de vôle apoiado ou integração de sensores GPS/Inercial (*Geodetic Positioning System*) e câmara. Entretanto, para avaliar a capacidade do método para a recuperação dos parâmetros, foram utilizados desvios-padrão entre 10 e 25 m.

Tabela 3 – Parâmetros de orientação exterior aproximados e suas respectivas precisões.

Atitude			Posição		
$\kappa$	$\varphi$	$\omega$	$X_0$ (m)	$Y_0$ (m)	$Z_0$ (m)
114 <sup>0</sup>	-3 <sup>0</sup>	-4 <sup>0</sup>	677410.	7183600.	1645.
Precisões					
3 <sup>0</sup>	3 <sup>0</sup>	3 <sup>0</sup>	23	-25	-10

Os parâmetros das feições retas extraídas, suas respectivas precisões e seus resíduos são apresentados na tabela 4.

Tabela 4: Parâmetros das retas ajustados e seus resíduos.

Reta	h/v	a	b (mm)	$\sigma_a$	$\sigma_b$ (mm)	$v_a$	$v_b$ (mm)
1	v	0.2707	-3.2781	5.5942E-2	1.4332 E-1	-6.07E-2	-9.74E-2
2	h	-0.068	3.6925	2.0389E-1	2.7176E-3	-3.84E-2	2.61E-1
3	h	-0.986	1.3188	6.6964E-2	3.8581E-2	-3.71E-2	5.05E-2
					média	-0.0142	0.039
					$\sigma$	0.0754	0.151
					e.m.q	0.0057	0.024

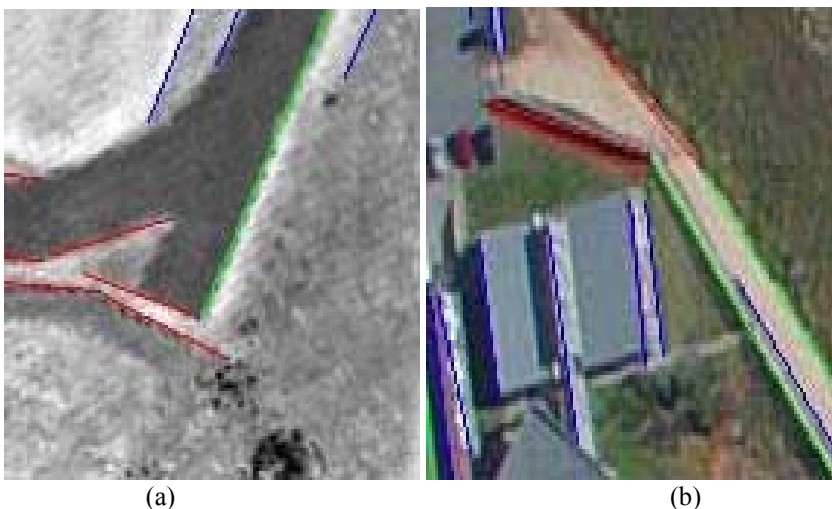
De acordo com a tabela 4 pode-se dizer que:

- Sendo o tamanho do pixel na imagem digital de 0.0054 mm e o e.m.q (erro médio quadrático) dos resíduos para o parâmetro **b** da reta é de 0.024 mm, obteve-se um erro de 4 pixel na medida do parâmetro **b** da feição reta, fato que pode ser explicado devido aos erros sistemáticos causados pelas influências do meio e dos equipamentos utilizados na câmara digital e no sistema de varredura laser, que não foram devidamente corrigidos. Outro fator é a qualidade do algoritmo de extração de feições, sendo que técnicas mais sofisticadas implementadas no algoritmo de extração de feições poderão oferecer melhores resultados;
- Outro fator que pode ter refletido a qualidade dos resíduos obtidos é o problema do algoritmo de interpolação utilizado para gerar a grade

regular da imagem de varredura laser. Como descrito anteriormente, a imagem de varredura laser foi interpolada numa grade regular com 0.4 m de resolução. Porém, para a busca das coordenadas no arquivo bruto, muitos pontos não correspondiam a este valor e assim, foram tomados pontos com vizinhança de 0.8 m.

A figura 6 revela um dos problemas que afetaram a qualidade na obtenção do parâmetro **b** da reta.

Figura 6: (a) Retas extraídas no espaço-objeto (imagem de varredura laser); (b) Retas extraídas no espaço-imagem (imagem ótica).



Pode-se verificar visualmente na figura 6 que, as bordas que descrevem as feições retas contidas na imagem digital e de varredura laser não são bem definidas geometricamente, pois existem efeitos de aliasing que consequentemente reflete na qualidade de extração da feição reta, e apresenta desvios-padrão piores que os esperados.

A qualidade ruim no processo de extração provoca um distúrbio nos vetores normais aos planos de interpretação do modelo matemático dos planos equivalentes, tornando-os não paralelos e afetando a convergência do método e consequentemente na determinação dos parâmetros.

Outro fator limitante é o tamanho das feições retas utilizadas no processo de estimação, pois quanto menor o tamanho da feição reta, pior a qualidade dos

parâmetros determinados. Os parâmetros estimados pelo método paramétrico com inunção de posição são apresentados na tabela 5.

Tabela 5: Parâmetros de orientação exterior, Qui-quadrado amostral, variância a posteriori, número de observações, número de parâmetros, número de inunções e número de graus de liberdade estimados pelo método paramétrico com inunções de posição.

Parâmetros estimados pelo método com feições retas derivadas da imagem Laser						
Atitude				Posição		
$\kappa$	$\varphi$		$\omega$	$X_0$ (m)	$Y_0$ (m)	$Z_0$ (m)
112° 35' 42.73"	2° 41' 36.05"		1° 30' 04.27"	677396.646	7183613.82	1651.54
Precisões						
±0° 52' 26.00"	±1° 07' 25.84"		±1° 14' 33.44"	±5.8026	±6.3275	±2.6274
N	u	Inj.	Graus de liberdade	$\sigma_0$	$\hat{\sigma}_0$	$\chi_a^2$
86	6	6	86	1.0	0.21	17.84
Parâmetros estimados pelo método convencional (Fonte: DELARA et al, 2004)						
Atitude				Posição		
$\kappa$	$\varphi$		$\omega$	$X_0$ (m)	$Y_0$ (m)	$Z_0$ (m)
112° 21' 59.22"	-0° 28' 53.90"		-1° 21' 59.49"	677397.488	7183613.74	1651.84
Precisões						
±0° 02' 33.19"	±0° 14' 11.76"		±0° 13' 34.99"	±5.8026	±6.3275	±2.6274
N	u	Inj.	Graus de liberdade	$\sigma_0$	$\hat{\sigma}_0$	$\chi_a^2$
216	78	36	57	1.0	0.17	34,89
Discrepâncias entre os métodos						
Atitude				Posição		
$\kappa$	$\varphi$		$\omega$	$X_0$ (m)	$Y_0$ (m)	$Z_0$ (m)
0° 13' 17.51"	1° 07' 18.73"		0° 09' 54.22"	0.842	0.08	0.3

A tabela 5 mostra os parâmetros de orientação exterior da câmara estimados e suas respectivas precisões, bem como o número de observações (**n**), o número de incógnitas (**u**), o número de inunções (**inj**), os graus de liberdade, sigma a priori ( $\sigma_0$ ), sigma a posteriori ( $\hat{\sigma}_0$ ) e o qui-quadrado amostral ( $\chi_a^2$ ) calculados. A pretexto de comparação com o método de resseção espacial convencional por pontos, foram determinadas as discrepâncias em função da diferença entre os

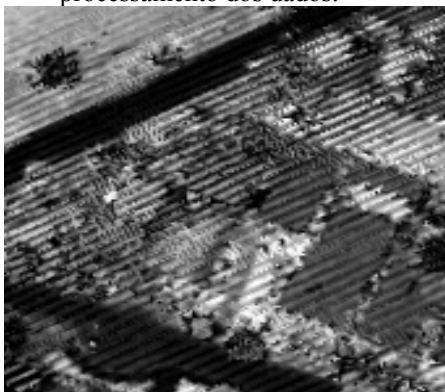
parâmetros obtidos pelo método de resseção espacial utilizando feições retas derivadas da imagem de varredura laser e o método convencional por pontos.

Foi realizada a análise de qualidade do ajustamento com um nível de significância de 5%, o qui-quadrado teórico ( $\chi_T^2$ ) para esse nível de significância de 55.17 e comparado ao  $\chi_a^2$  (17.84). Verificou-se que o  $\chi_a^2$  é menor que o  $\chi_T^2$  e pode-se concluir que os parâmetros ajustados têm 95% de probabilidade de estarem corretos.

Os parâmetros de orientação da imagem utilizada neste trabalho, estimados em DELARA et al (2004) foram utilizados como referência. Numa análise da tabela 5, onde os parâmetros de orientação exterior da imagem utilizada foram estimados pelo método paramétrico iterativo com injunções de posição pode-se concluir que:

- O menor erro encontrado para as translações foi na posição  $\mathbf{Y}_0$  e o maior em  $\mathbf{X}_0$ . O menor erro encontrado para as rotações foi no parâmetro  $\omega$  e o maior em  $\phi$ ;
- Como o maior erro verdadeiro nas rotações foi no ângulo  $\phi$  sua perturbação influenciou na determinação da coordenada  $X_0$ , pois são geometricamente correlacionadas, ou vice-versa;
- A distribuição das feições retas de apoio não foi heterogênea, pois na parte direita central da imagem digital não houve estabelecimento de correspondência, pois na imagem de varredura laser ocorreu algum problema de processamento da imagem de intensidade, sendo toda esta região afetada, como pode ser visualizado na figura 7. Isto explica a baixa qualidade dos desvios-padrão dos parâmetros de rotação; e
- A entrada de parâmetros aproximados deve ser feita cuidadosamente, principalmente nas rotações, pois nos casos de existir uma deriva muito grande em relação ao referencial de terreno, o processo de correspondência entre as observações nos espaços-imagem e objeto torna-se bastante complicado.

Figura 7: Imagem de varredura laser com problemas causados pelo processamento dos dados.



Como pode ser visualizado na figura 7, existe um problema de arrastamento na imagem de intensidade que, para este efeito ainda não foi encontrada a causa. Acredita-se que o problema ocorreu devido á alguma falha no processamento dos dados no momento da geração da imagem de intensidade.

## 5. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Neste trabalho foi apresentada uma metodologia para o cálculo da resseção espacial de imagens com feições retas como apoio de campo, derivadas da imagem de intensidade. As feições retas foram extraídas automaticamente no espaço-imagem e objeto. Na imagem de intensidade, cada ponto extremo das feições retas foi utilizado como pontos aproximados para a busca das coordenadas reais, no arquivo bruto (ASCII) fornecido pelo sistema de varredura laser.

A metodologia de identificação de feições retas mostrou-se mais rápida e atraente do que o método de coleta por pontos, pois a identificação de feições retas pode ser feita aproximadamente para que o algoritmo possa reconhecer a reta de interesse, sem a necessidade de recursos de *zoom*. A estimativa determinada pelo método paramétrico com injunções de posição apresentou uma discrepância maior na rotação em  $\phi$  e para a translação em  $X_0$ .

As discrepâncias indicam que apesar de haver uma discrepância em torno de  $1^0$  para as rotações e 0.8 m para as translações o método proposto é promissor. Porém, o sucesso dos resultados depende da implementação de técnicas de extração de feições retas mais sofisticadas, que apresente soluções eficiências para os diferentes problemas detectados. Além do mais, a qualidade geométrica das imagens de

intensidade e digital devem ser melhoradas, para que conseqüentemente sejam apresentados resultados mais confiáveis.

Portanto, o uso de feições retas como apoio de campo, derivados das imagens de intensidade apresentou resultados satisfatórios e mostrou sua potencialidade no cálculo da resseção espacial, além da integração de imagens provenientes de diferentes sensores. Pesquisas futuras estão sendo desenvolvidas para a automação do processo de resseção espacial com uso de feições retas derivadas do sistema de varredura laser.

## 6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de externar seus agradecimentos ao Prof. Dr. Antonio Maria Garcia Tommaselli, por fornecer o algoritmo de extração de feições retas, a CAPES e ao DAAD pelo fomento da bolsa de doutorado e estadia na Alemanha.

## REFERÊNCIAS

- BUCHANAN, T. **Critical Sets for 3D Reconstruction Using Lines**. Computer Vision – ECCV, Berlin. Germany. pp.730-738, 1992.
- DAL POZ, A. P. **Correlação Estrutural Aplicada à Extração Automática de Apoio de Campo**. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica. Universidade de São Paulo. pp 182, 1996.
- DAL POZ, A. P; TOMMASELLI, A. M. G. **Automação do Processo de Orientação Absoluta**. Anais do XIX Congresso Brasileiro de Cartografia. Recife, 1999.
- DALMOLIN, Q. **Ajustamento por Mínimos Quadrados**. Curitiba, Curso de Pós-Graduação em Ciências Geodésicas da Universidade Federal do Paraná. 2002, 174 pág.
- DALMOLIN Q.; SANTOS, D. R. **Sistema Laserscanning: Conceitos e Princípios de Funcionamento**. Ed. UFPR. 3ª. Edição. Curitiba. pp. 99, 2004.
- DELARA, R. Jr; MITISHITA, E. A.; HABIB, A. F. **Bundle adjustment of images from non-metric CCD camera using lidar data as control points**. International Archives of XXth ISPRS Congress. Commission III. pp. 13-19, 2004.
- FORKERT, G. **Image Orientation Exclusively Based on Free-form Tie Curves**. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing. vol. XXXI. pp.196-201, 1996.
- HABIB, A. F; LIN, T. H; MORGAN, M. Autonomous space resection using Point-and Line-Based representation of FREE-FORM control Linear Features. **The Photogrammetric Record**. Vol. 18. no. 103. pp. 244-258, 2003.
- HABIB, A. F; GHANMA, M. S.; MORGAN, M. F.; MITISHITA, E. A. **Integration of laser and photogrammetric data for calibration purposes**.

- International Archives of XXth ISPRS Congress. Commission I. Istanbul/turkey. pp. 170-176, 2004a.
- HABIB, A. F; GHANMA, M. S.; KIM, C. J.; MITISHITA, E. A. **Alternative approaches for utilizing lidar data as a source of control information for photogrammetric models.** International Archives of XXth ISPRS Congress. Commission I. Istanbul/turkey. pp. 193-199, 2004b.
- HABIB, A. F; GHANMA, M. S.; TAIT, M. **Integration of lidar and photogrammetry for close range applications.** International Archives of XXth ISPRS Congress. Commission I. Istanbul/turkey, 2004c.
- KOKUBUM, C. N.C.; TOMMASELLI, A. M. G. **Orientação de imagens aéreas usando linhas retas.** Anais: I Simpósio Brasileiro de Geomática. Presidente Prudente: UNESP. pp. 144-149, 2002.
- LUGNANI, J.B. **Using Digital Entities as Control.** PhD thesis. Department of Surveying Engineering. University of New Brunswick, Fredericton. pp 159, 1980.
- PETSA, E.; PATIAS, P. **Sensor Attitude Determination Using Linear Features.** In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, Como, vol. XXX, Comm. I, pp.62-70, 1994a.
- TOMMASELLI, A. M. G; LUGNANI, J. B.- **An Alternative Mathematical Model to the Colinearity Equation Using Straight Features.** Proceedings of the International Society for Photogrammetry and Remote Sensing, Kyoto. Commission III. Pp. 756-774, 1988.
- TOMMASELLI, A. M. G. **Um Método Recursivo Aplicado ao Problema de Localização em Visão de Máquina.** Tese de Doutorado, Faculdade de Engenharia Elétrica da Universidade de Campinas, pp. 142, Unicamp, 1993.
- TOMMASELLI, A.M.G.; TOZZI, C. - **Line Based Camera Calibration in Machine Vision Dynamic Applications.** SBA Controle & Automação, vol. 10, número 2, 1996.
- ZALMANSON, G. - **Hierarchical Recovery of Exterior Orientation from Parametric and Natural 3-D Curves.** In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXXIII, part B2, pp.610- 617, 2000.
- ZIELINSKI, H. - **Line Photogrammetry with Multiple Images.** In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, vol. XXIX, part B3, pp.669-676, Washington, 1992.

(Recebido em fevereiro/05. Aceito em maio/05.)