



Revista Brasileira de Cartografia (2014) N° 66/5: 1135-1144
Sociedade Brasileira de Cartografia, Geodésia, Fotogrametria e Sensoriamento Remoto
ISSN: 1808-0936

REFINAMENTO FOTOGRAMÉTRICO DE CONTORNOS DE TELHADO EXTRAÍDOS DE DADOS DE VARREDURA A LASER

*Photogrammetric Refinement of Roof Contours Extracted from Laser Scanning
Data*

Aluir Porfírio Dal Poz

1 Universidade Estadual Paulista – UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT / Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305, 19050-350 Presidente Prudente, SP
aluir@fct.unesp.br

Recebido em 06 de Maio, 2014/ Aceito em 17 de Agosto, 2014
Received on May 06, 2014/ Accepted on August 17, 2014

RESUMO

Este artigo apresenta um método para o refinamento fotogramétrico de contornos tridimensionais de telhado de edifício extraídos de dados de varredura a laser aerotransportado (VLA). A hipótese principal assumida é que as faces planares de um telhado de edifício, acuradamente extraídas de dados de VLA, e o contorno do mesmo telhado, acuradamente extraído de uma imagem aérea de altíssima resolução, podem ser combinados para melhorar o correspondente contorno de telhado extraído de dados de VLA. O método proposto baseia-se em três etapas. Inicialmente polígonos representando contornos de telhados são extraídos de imagens aéreas de alta-resolução. Na sequência, os segmentos de reta que compõem cada polígono de telhado de edifício são projetados sobre as correspondentes faces de telhado extraídas de dados de VLA, usando um novo modelo fotogramétrico. Finalmente, a reconstrução de cada contorno tridimensional de telhado é realizada através da conexão de todos os pares adjacentes de segmentos de reta obtidos na etapa anterior. Os resultados obtidos mostraram que a integração de uma imagem aérea de altíssima resolução e dados de VLA permite a obtenção de melhores resultados, quando comparados com os correspondentes resultados gerados usando apenas dados de VLA.

Palavras chaves: VLA, Imagem Aérea de Alta Resolução, Contorno de Telhado, Modelo Fotogramétrico para Correspondência de Retas

ABSTRACT

This paper presents an approach for photogrammetrically refining three-dimensional building roof contours previously extracted from airborne laser scanning (ALS) data. The main hypothesis of the proposed approach is that the highly accurate ALS derived planar faces of a building roof and the highly accurate roof contour of the same building, extracted from a very high-resolution aerial image, can be properly combined for improving the corresponding ALS derived building roof contour. The proposed method proceeds in the following way. First, polygons representing building roof contours are extracted from a high-resolution aerial image. Second, straight-line segments delimitating each building roof polygon are projected onto the corresponding ALS derived roof planes by using a line-based photogrammetric model. Finally, each three-dimensional building roof contour is reconstructed by properly connecting every pair of photogrammetrically-projected adjacent straight lines. The obtained results showed that the integration of a very high

-resolution aerial image data and ALS data allows better results to be obtained, when compared to the corresponding results generated by using only ALS data.

Key words: ALS, High-Resolution Aerial Image, Roof Contour, Line-Based Photogrammetric Model.

1. INTRODUÇÃO

Os métodos de extração de edificações são relevantes no contexto de aquisição e atualização de bases de dados cartográficos em escala grande. Estes métodos de extração podem ser classificados em três classes diferentes, de acordo com o tipo de dado utilizado, isto é: métodos que usam apenas dados de varredura a laser (VLA); métodos que usam apenas dados de imagem; e métodos que combinam dados de imagem e de VLA.

Os primeiros métodos de extração de edifícios faziam o uso de imagens aéreas digitalizadas e as primeiras propostas metodológicas vêm da década de 1980. Por exemplo, Fua e Hanson (1987) propuseram um método para o delineamento de contornos retilíneos de edifícios em imagens aéreas. Mais recentemente Müller e Zaum (2005) usaram segmentação por crescimento de região para detectar edifícios em imagens aéreas. Já Akçay e Aksoy (2008) combinaram informações espectrais e estruturais de edifícios para a separação de edifícios de outros objetos. Ferraioli (2010) usou a teoria de campos randômicos de Markov (CRM) para detectar bordas de edificações. Outro método probabilístico é encontrado em Sırmaçek e Ünsalan (2011), que combinaram imagens aéreas e de satélite para detectar edifícios. Fazan e Dal Poz (2013) modelaram contornos de telhado em imagens aéreas usando a teoria de contorno ativo e restrições geométricas que forçavam os contornos a serem retilíneos, isto é, limitados por lados retos paralelos e/ou perpendiculares.

Os métodos para a detecção ou extração de edifícios que usam dados de VLA são bem mais recentes e as publicações relacionadas têm se tornado bem mais frequente na literatura que os métodos que usam apenas dados de imagem. Os métodos que utilizam dados de VLA podem ser agrupados nas seguintes categorias: detecção de edifícios; extração de contornos de edifícios; extração de telhado de edifício; e extração do modelo tridimensional de edifício. Os métodos de detecção de edifícios utilizam um modelo

digital de superfície (MDS) (MATIKAINEN et al., 2003), um MDS normalizado (MDSn) (TÓVARI & VÖGTLE, 2004) ou uma nuvem de pontos de dados de VLA (TARSHA-KURDI et al., 2006). Os métodos de extração de contornos de edifícios geralmente envolvem a detecção e a extração de contornos irregulares de edifício, seguidas de algum processo de regularização do contorno (SAMPATH & SHAN, 2007; WEI, 2008). Galvanin e Dal Poz (2012) focaram apenas a extração de contornos irregulares de edifícios, com a utilização de um modelo de contorno de edifício formulado com base na teoria de CRM. Os métodos de extração de telhados de edifício são baseados em procedimentos de segmentação, que são designados para agrupar pontos, determinados por varredura a laser, para gerar primitivas planares. Estes procedimentos requerem o uso de algum critério de homogeneidade, tais como o de altura similar e o de orientação similar das normais às faces de um MDS (ROTTENSTEINER et al., 2005; SAMPATH & SHAN, 2010). Já os métodos de extração ou reconstrução completa de edifício normalmente empregam as etapas de detecção de edifício, extração de contorno de edifício e extração de telhado de edifício. Uma extensiva e compreensiva revisão do estado da arte relacionado com métodos de extração tridimensional de edifícios, tanto a partir de dados de VLA quanto a partir de imagens aéreas e terrestres, é encontrada em Haala e Kada (2010).

Os métodos de extração de edifícios que se baseiam na combinação de dados de VLA com imagens procuram tirar proveito da sinergia entre ambas as fontes de dados. Haala e Brenner (1999) combinaram, com o intuito de separar edificações de vegetação, uma imagem multiespectral com informações altimétricas (MDS) obtidas a partir de dados de VLA. Sohn e Dowman (2003) extraíram separadamente edificações em imagem Ikonos e em um MDS derivado de dados de VLA, com posterior combinação de ambos os resultados de extração para remover inconsistências. Um método para

a extração de edificação em 3D combinando dados de VLA, planta baixa de edificações e imagens aéreas de alta resolução é encontrado em Vosselman (2002). Em Jaw e Cheng (2008) os contornos de edifícios eram primeiramente extraídos em dados de VLA e posteriormente refinados usando uma imagem aérea. Kim e Habib (2009) propuseram um método para a geração de modelos tridimensionais de edificações complexas, tendo por base três etapas principais: 1) detecção de edifícios e extração de telhados a partir de dados de VLA; 2) refinamento dos contornos dos telhados usando uma imagem aérea; e 3) geração das estruturas tridimensionais de edificações a partir dos telhados extraídos no passo 1 e refinados no passo 2. Cheng et al. (2011) propuseram um método para a extração tridimensional de edifícios, usando dados de VLA e imagens aéreas em cobertura estéreo. Finalmente, Tian et al. (2014) utilizaram um par estereoscópico de imagens de satélite e um MDS para detectar mudanças em áreas edificadas.

Os contornos de telhado são potencialmente mais bem definidos em imagens que em dados de VLA. Por exemplo, considerar uma imagem aérea de resolução de 10 cm e uma nuvem de pontos de VLA com densidade de 10 pontos por metro quadrado (isto é, 10 pts./m²). É imediato concluir que esta imagem aérea possui densidade de pontos 10 vezes maior que a densidade de pontos da nuvem de pontos de VLA. Consequentemente, as linhas de descontinuidade, como os contornos de telhado, são mais bem definidas na imagem aérea. O oposto ocorre quando se deseja reconstruir superfícies com textura homogênea, como as superfícies de telhado. As técnicas estereofotogramétricas são adequadas para reconstruir superfícies, mas no caso de superfícies com textura homogênea, é normalmente inviável extrair informações posicionais com base num par estereoscópico de imagens aéreas de alta resolução. Por outro lado, os sistemas de VLA possibilitam a determinação de alta densidade de pontos sobre qualquer superfície, independente obviamente de possuir textura homogênea ou não. Levando em conta que os pontos determinados via VLA possuem alta acurácia vertical (cerca de 10 cm), a reconstrução de planos de face de telhado usando dados de VLA é potencialmente mais acurada e confiável que se realizada a partir de imagens

aéreas. Um estudo compreensivo das questões discutidas acima é encontrado em Kaartinen et al. (2005).

A sinergia, acima discutida, entre os dados de VLA e imagens evidencia que é possível refinar o contorno de modelos poliédricos de edifícios extraídos de dados de VLA, usando as faces poliédricas de telhado, que são potencialmente bem definidas, e o correspondente bem definido contorno de telhado extraído de uma imagem aérea de alta resolução. O método proposto assume apenas que os telhados sejam constituídos de faces planas e delimitados por segmentos de reta. Este artigo está organizado em 4 seções principais. A Seção 2 apresenta o método proposto. Os resultados obtidos são apresentados e discutidos na Seção 3. O artigo é finalizado na Seção 4 com as principais conclusões.

2. REFINAMENTO FOTOGAMÉTRICO DE CONTORNOS DE TELhado

O método proposto para o refinamento de contorno de telhado é baseado em duas etapas principais. Primeiramente (Seção 2.1), segmentos de retas representando lados de um contorno de telhado selecionado são extraídos na imagem aérea e projetados fotogrametricamente sobre as correspondentes faces do modelo poliédrico previamente extraído de dados de VLA. Finalmente (Seção 2.2), os novos vértices do contorno refinado do telhado selecionado são determinados via combinação de segmentos adjacentes de reta, obtidos no passo anterior.

2.1 Modelo fotogramétrico para projeção de segmentos de reta

A Fig. 1 mostra o princípio do modelo fotogramétrico proposto para projetar segmentos de reta, extraídos numa imagem aérea, sobre as correspondentes faces do modelo poliédrico do edifício selecionado. Seja o lado poliédrico $\overline{A'B'}$ (linha tracejada na Fig. 1), que é correspondente ao segmento de reta \overline{ab} extraído da imagem. Consequentemente, o segmento de reta \overline{ab} representa parcial ou totalmente um lado de contorno de um edifício; este edifício representaria na imagem o modelo poliédrico que contém o lado $\overline{A'B'}$. O segmento de reta \overline{ab} necessita ser extraído da imagem, podendo

ser através da determinação de seus pontos extremos ou dos parâmetros da reta que o contém. Em ambos os casos estas determinações podem se apoiar em procedimentos manuais ou algorítmicos. Já a projeção do segmento de reta \overline{ab} sobre a correspondente face do modelo poliédrico, resultando no segmento de reta refinado \overline{AB} , é baseada na intersecção entre dois planos (Fig. 1):

Plano definido pelo centro de perspectiva (CP) e o segmento de reta \overline{ab} ;

Plano contendo os pontos da face poliédrica A', B', C e D .

Como mostra a Fig. 1, a intersecção entre ambos os planos define a reta r , na qual estão contidos os pontos A e B . Vale ressaltar que o segmento de reta $\overline{A'B'}$ representa a entidade a ser refinada e \overline{AB} é o resultado do procedimento fotogramétrico de refinamento. Este procedimento fotogramétrico será matematicamente detalhado a seguir.

É possível demonstrar que o plano definido no sistema de coordenadas fotogramétrico (PCxyz, conforme mostra a Fig. 1) pelo ponto CP e o segmento de reta \overline{ab} , doravante denominado *plano imagem*, é dado pela equação 1.

$$-f.\cos\theta.x - f.\sen\theta.y + \rho.z = 0 \quad (1)$$

Na Fig. 1, f é a distância focal; θ é o ângulo entre o eixo x do sistema de coordenadas

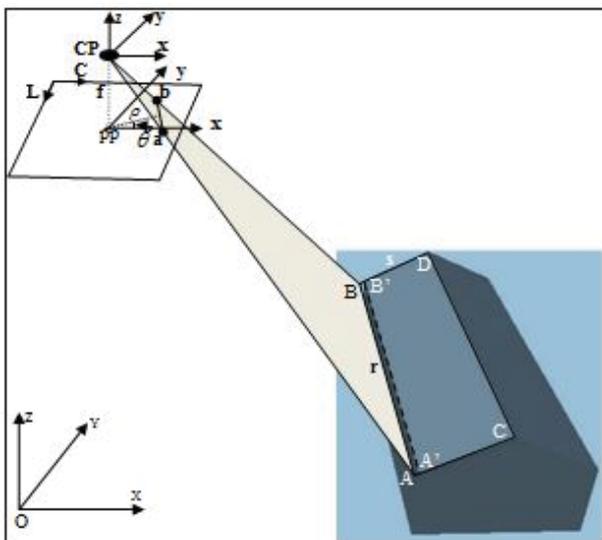


Fig. 1 - Princípio do modelo fotogramétrico proposto.

fotogramétrico e o segmento de reta que é perpendicular a \overline{ab} e que contém o ponto principal (pp); e ρ é a distância entre o ponto pp e o segmento de reta \overline{ab} .

A equação 1 mostra que o seguinte vetor (\vec{N}_i) é normal ao plano imagem:

$$\vec{N}_i = [-f.\cos\theta \quad -f.\sen\theta \quad \rho]^T \quad (2)$$

O vetor normal \vec{N}_i , acima formulado no sistema de coordenadas fotogramétrico, pode ser transformado para o sistema de coordenadas do espaço objeto (OXYZ) pela seguinte transformação de rotação:

$$\vec{N}_o = R^T \vec{N}_i \quad (3)$$

Na equação 3, R é a matriz de rotação entre os sistemas de coordenadas PCxyz e OXYZ. Os elementos (r_{ij}) da matriz R são dependentes dos ângulos de atitude (κ , ϕ e ω) da câmera.

Considerar que n_x , n_y e n_z são os componentes do vetor normal \vec{N}_o e X_o , Y_o e Z_o são as coordenadas do CP no sistema de coordenadas OXYZ. A equação do plano imagem (equação 1) pode ser reformulada no espaço objeto com base no vetor $\vec{N}_o = [n_x \quad n_y \quad n_z]$ e no ponto CP, ambos expressos no sistema de coordenadas do espaço objeto (OXYZ), como segue:

$$\begin{bmatrix} n_x \\ n_y \\ n_z \end{bmatrix} \cdot x \begin{bmatrix} X - X_o \\ Y - Y_o \\ Z - Z_o \end{bmatrix} = n_x(X - X_o) + n_y(Y - Y_o) + n_z(Z - Z_o) = 0 \quad (4)$$

Na equação 4, ' x ' é o operador *produto interno* e X , Y e Z são as coordenadas de um ponto qualquer pertencente ao plano formulado no espaço objeto (equação 4), doravante denominado *plano objeto*.

A equação 4 pode ser reescrita rearranjando e agrupando suas variáveis, ficando:

$$A_o \cdot X + B_o \cdot Y + C_o \cdot Z + D_o = 0 \quad (5)$$

Na equação 5, $A_o = n_x$, $B_o = n_y$, $C_o = n_z$ e $D_o = -n_x \cdot X_o - n_y \cdot Y_o - n_z \cdot Z_o$. Como os pontos A' , B' , C e D são coplanares (ver Fig. 1), a equação do plano (equação 6) que representa a face do telhado do edifício selecionado, sobre a qual o segmento de reta \overline{ab} é projetado, pode ser formulada usando três desses pontos.

$$I \cdot X + J \cdot Y + K \cdot Z + L = 0 \quad (6)$$

Na equação 6, I , J , K e L são os coeficientes do plano. A intersecção do plano objeto (equação 5) e o correspondente plano de face de telhado dá origem à reta r contendo os pontos A e B (ver Fig. 1), cuja equação na forma paramétrica é dada a seguir:

$$\begin{aligned} X &= (B_o K - C_o J)t \\ Y &= (C_o I - A_o K)t + \\ &\left[\frac{D_o J C_o - D_o B_o K - C_o J D_o + C_o B_o L}{B_o^2 K - B_o J C_o} \right] \\ Z &= (A_o J - B_o I)t + \left[\frac{J D_o - B_o L}{B_o K - J C_o} \right] \end{aligned} \quad (7)$$

onde, $t \in \mathbb{R}$. Vale notar que os termos multiplicativos ao parâmetro t são os componentes do vetor diretor da reta r . Já os termos independentes definem um ponto de suporte da reta r . A coordenada X desse ponto é nula porque se estabeleceu *a priori* que esse ponto pertence ao plano coordenado YOZ . Notar que essa escolha é válida se a reta r não for paralela ou aproximadamente paralela ao plano coordenado YOZ . Se esta condição não for satisfeita, implicando em indeterminação ou instabilidade numérica, basta selecionar um ponto de suporte em um outro plano coordenado, isto é, XOY ou XOZ .

2.2 Determinação dos vértices do contorno refinado do telhado de edifício

A determinação dos vértices do contorno refinado do telhado selecionado é realizada via intersecção de retas projetadas, correspondentes aos lados do telhado, com os respectivos planos objeto. Por exemplo (Fig. 1), o vértice B é determinado pela intersecção da reta (equação 7) que contém os pontos B' e D (isto é, a reta projetada s na Fig. 1) com o plano objeto (equação

6) que contém os pontos a e b na imagem. Notar que o problema principal a resolver consiste em selecionar a reta projetada e o plano objeto que permitem a determinação de cada novo vértice do contorno refinado do telhado. O algoritmo de refinamento leva em consideração que cada lado do contorno do telhado, extraído de dados de VLA, possui uma e somente uma correspondente reta projetada. Vale ressaltar também que o contorno de telhado extraído de dados de VLA é um polígono. Consequentemente, sabe-se *a priori* como seus respectivos lados se conectam. De forma geral, o algoritmo de refinamento procede segundo as seguintes etapas:

Escolher arbitrariamente o primeiro lado do contorno do telhado do edifício selecionado, extraído de dados de VLA;

Tomar o plano objeto (π) que gerou a reta projetada (r) que corresponde ao lado de contorno de telhado selecionado no passo 1;

Selecionar no sentido horário (ou anti-horário) o próximo lado do contorno do telhado do edifício selecionado, extraído de dados de VLA; seja s a correspondente reta projetada;

Interceptar o plano π com a reta projetada s para determinar o vértice (v_i) do contorno refinado do telhado selecionado;

Se o vértice v_i coincide com o primeiro vértice refinado, descartá-lo e interromper o refinamento do contorno do telhado selecionado; caso contrário, re-rotular a reta projetada s como r , descartando a antiga reta projetada r , e retornar ao passo 2 para a determinação do vértice seguinte (v_{i+1}).

Todos os vértices determinados pelo algoritmo descrito acima definem o contorno refinado do telhado selecionado.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Os dados utilizados nos experimentos são de uma área urbana da cidade de Curitiba-Pr, compreendendo um par estereoscópico de imagens aéreas de alta resolução (GSD~ 0,2 m), juntamente com parâmetros de orientação interior (distância focal, coordenadas do pp e coeficientes de distorção da lente) e exterior (ângulos de atitude e coordenadas dos CPs), e modelos poliédricos de três edifícios. Dois conjuntos de modelos poliédricos foram gerados, cada qual com três unidades, usando: 1) dados de VLA com densidade em torno de 2 pts./

m²; e 2) um par estereoscópico de imagens aéreas. O primeiro conjunto foi gerado semi-automaticamente através de aplicativos caseiros e utilizado como dado de entrada no processo proposto de refinamento de contorno de telhado. Já o segundo conjunto, contendo basicamente os contornos de telhado dos edifícios, foram gerados no LPS (*Leica Photogrammetry Suite*®) e utilizados como dados de referência para avaliar os contornos refinados obtidos pelo método proposto.

Abaixo são apresentados e analisados os resultados obtidos para o telhado de quatro águas mostrado na Fig. 2. Nesse experimento e nos demais os contornos dos telhados foram extraídos manualmente. Este procedimento foi adotado porque este artigo foca principalmente na acurácia geométrica do método fotogramétrico de retraçamento de contornos de telhados gerados previamente a partir de dados de VLA, e não na automação de todo o processo. Entretanto, vale comentar que os segmentos de reta podem potencialmente ser extraídos na imagem com melhor acurácia usando um procedimento algorítmico, o que certamente impactaria na qualidade das retas projetadas.

A Tabela 1 mostra as coordenadas dos vértices dos contornos de telhado do edifício extraídas previamente dos dados de VLA e do par estereoscópico de imagens aéreas, bem como extraídas pelo método de refinamento proposto neste artigo. Os contornos extraídos do par estereoscópico de imagens serão denominados *contornos de referência*. Em todos os casos



Fig. 2 - Edifício teste 1

Tabela 1: Coordenadas dos vértices (em metros) do contorno de telhado extraído de dados de VLA, do contorno de telhado refinado e do contorno de telhado de referência – Edifício teste 1

Coordenadas dos vértices do contorno de telhado extraído dos dados de VLA			
	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>h</i>
V ₁	675896,5	7188210,7	921,2
V ₂	675902,9	7188201,9	923,2
V ₃	675910,1	7188207,9	925,8
V ₄	675903,7	7188215,9	923,1
Coordenadas dos vértices do contorno refinado			
	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>h</i>
V ₁	675896,3	7188209,9	922,0
V ₂	675902,6	7188202,3	923,2
V ₃	675909,8	7188207,8	925,0
V ₄	675903,5	7188215,4	923,9
Coordenadas dos vértices do contorno de Referência			
	<i>E</i>	<i>N</i>	<i>h</i>
V ₁	675896,5	7188210,1	922,4
V ₂	675902,7	7188202,3	922,8
V ₃	675909,6	7188207,6	924,4
V ₄	675903,3	7188215,1	924,2

as coordenadas dos vértices dos contornos de telhado de edifício estão em UTM (*Universe Transverse Mercator*) (*E*, *N*) com altitude ortométrica (*h*).

A Tabela 2 mostra as discrepâncias entre o contorno de telhado extraído de dados de VLA e o correspondente contorno de referência e entre o contorno de telhado extraído pelo método proposto e o correspondente contorno de referência. A métrica de discrepância é definida como a distância Euclidiana entre os vértices correspondentes (neste experimento são os vértices V₁, V₂, V₃ e V₄) dos contornos de telhado que estão sendo numericamente comparados.

Conforme mostra a Tabela 2, as discrepâncias obtidas neste experimento mostram que o método proposto permitiu uma clara melhoria na qualidade geométrica do contorno de telhado extraído usando dados de VLA. Nota-se também que o RMSE (*Root Mean Square Error*) das discrepâncias mostra que o contorno de telhado refinado é significativamente (quase duas vezes) mais acurado que o correspondente contorno extraído de dados de VLA.

Tabela 2: Discrepâncias (em metros) entre o contorno de telhado extraído de dados de VLA e o correspondente contorno de referência e entre os contornos refinado e de referência– Edifício teste 1

	Discrepâncias nos vértices do contorno de telhado extraído dos dados de VLA	Discrepâncias nos vértices do contorno de telhado refinado
V ₁	1,3	0,5
V ₂	0,6	0,4
V ₃	1,5	0,7
V ₄	1,4	0,5
RMSE	1,3	0,5

O segundo exemplo baseia-se também num edifício teste de quatro águas, conforme mostra a Fig. 3.

As coordenadas dos vértices dos contornos de telhado extraídas dos dados de VLA, do par estereoscópico de imagens aéreas (resultando no contorno de telhado de referência) e pelo método proposto (resultando no contorno de telhado refinado) são apresentados na Tabela 3.

As discrepâncias entre os contornos de referência e extraído de dados de VLA e entre os contornos refinado e extraído de dados de VLA são mostrados na Tabela 4, juntamente com o RMSE para os contornos refinado e extraído de dados de VLA. Vale notar que novamente o contorno de telhado refinado é mais acurado que o contorno de telhado extraído de dados de



Fig. 3 – Edifício teste 2.

Tabela 3: Coordenadas dos vértices (em metros) do contorno de telhado extraído de dados de VLA, do contorno de telhado refinado e do contorno de telhado de referência – Edifício teste 2

Coordenadas dos vértices do contorno de telhado extraído dos dados de VLA			
	E	N	h
V ₁	675845,3	7188377,2	924,5
V ₂	675855,7	7188384,8	922,3
V ₃	675844,9	7188398,0	920,5
V ₄	675835,3	7188390,0	924,1
Coordenadas dos vértices do contorno refinado			
	E	N	h
V ₁	675843,5	7188376,3	923,2
V ₂	675854,1	7188383,6	925,1
V ₃	675843,7	7188396,5	923,2
V ₄	675834,0	7188388,8	924,7
Coordenadas dos vértices do contorno de referência			
	E	N	h
V ₁	675843,1	7188376,6	924,0
V ₂	675854,3	7188383,7	924,1
V ₃	675844,4	7188396,9	923,9
V ₄	675833,6	7188388,4	924,2

VLA. Os valores do RMSE (Tabela 4) mostram que o contorno de telhado extraído pelo método proposto é bem mais (cerca de três vezes) acurado que o contorno de telhado extraído dos dados de VLA. Contudo, nota-se que o contorno refinado do telhado do edifício teste 2 é menos acurado que o contorno refinado de telhado obtido no exemplo anterior. Esta diferença em acurácia entre ambos os contornos é acompanhada pela diferença em acurácia dos correspondentes contornos extraídos de dados de VLA. É difícil precisar a causa para estas diferenças de acurácia, que pode ser inclusive resultantes da maior dificuldade em fazer pontaria para a digitalização visual do contornos de telhado de referência do edifício teste 2.

O edifício teste 3 (Fig. 4) é bem mais complexo que os edifícios teste analisados nos exemplos anteriores.

Como mostra a Fig. 4, o telhado do edifício teste 3 é composto de um ramo principal, ortogonalmente conectado a três ramos secundários. De uma forma geral, pode ser visto como um complexo de quatro telhados

Tabela 4: Discrepâncias (em metros) entre o contorno de telhado extraído de dados de VLA e o correspondente contorno de referência e entre os contornos refinado e de referência– Edifício teste 2

	Discrepâncias nos vértices do contorno de telhado extraído dos dados de VLA	Discrepâncias nos vértices do contorno de telhado refinado
V ₁	2,3	0,9
V ₂	2,5	1,0
V ₃	3,6	1,1
V ₄	2,3	0,7
RMSE	2,7	0,9

de 3-4 águas. A extremidade do ramo central do telhado possui detalhes difíceis de serem modelados usando dados de VLA disponíveis, devido principalmente a sua baixa densidade (2 pts./m²). A Fig. 4 mostra também as posições aproximadas dos vértices do contorno de telhado extraído de dados de VLA. Notar que os detalhes na extremidade do ramo central do telhado, visíveis na imagem aérea, foram grosseiramente descritos pelo contorno extraído dos dados de VLA.

Como o contorno do telhado do edifício teste 3 é definido por muitos vértices, são apresentados e analisados somente os valores do RMSE para os contornos de telhado refinado e



Fig. 4 – Edifício teste 3 com as localizações aproximadas dos vértices do contorno extraído dos dados de VLA.

extraído dos dados de VLA, que são 0,7 m e 1,9 m, respectivamente. Estes valores mostram que o contorno refinado de telhado é significativamente (quase três vezes) mais acurado que o contorno de telhado extraído dos dados de VLA. Como era de se esperar, as maiores discrepâncias para ambos os contornos foram observadas nos quatro vértices localizados ao longo da extremidade do ramo central do telhado. Já as menores discrepâncias foram encontradas nos vértices em 90° do ramo principal do telhado. Além de geometria favorável para a determinação destes vértices, também os planos correspondentes às longas águas de telhado são geometricamente mais bem definidos.

5. CONCLUSÕES E TRABALHOS FUTUROS

Neste artigo foi apresentado e avaliado um método para o refinamento fotogramétrico de contornos de telhados de edifícios extraídos previamente de dados de VLA. Primeiramente um modelo fotogramétrico é utilizado para projetar segmentos de retas, que representam lados de contorno de telhado no espaço imagem, sobre as correspondentes faces de telhado de um modelo poliédrico reconstruído a partir de dados de VLA. Na sequência, as retas projetadas são utilizadas para determinar os vértices do contorno de telhado refinado. O método proposto pode ser utilizado para refinar inúmeros tipos de telhados de edifícios extraídos previamente de dados de VLA, com a condição de que suas faces sejam planas e delimitadas por segmentos de reta.

Três experimentos foram realizados para exemplificar a desempenho do método e, principalmente, verificar a hipótese básica de que imagens aéreas de altíssima resolução podem ser utilizadas *a posteriori* para refinar o contorno de telhados de modelos poliédricos de edifícios, extraídos de dados de VLA. Os experimentos foram realizados com base em dois telhados de quatro águas e em um telhado mais complexo, que combina vários telhados de 3-4 águas. Os resultados obtidos estão de acordo com a expectativa de que a integração de dados de VLA e imagens aéreas de altíssima resolução permite a obtenção de resultados melhores no contexto de delineamento de contorno de telhado de edifício. De fato, os resultados obtidos mostraram que os

contornos refinados de edifício foram 2-3 vezes mais acurados que os correspondentes contornos de telhado de edifício extraídos de dados de VLA. Isto é especialmente esperado sempre que a densidade de pontos na imagem (equivalente ao número de pixels no terreno por m²) for bastante superior à densidade de pontos da nuvem de pontos de VLA. Por exemplo, considerando os dados utilizados nos experimentos, a densidade de pontos das imagens aéreas é cerca de doze vezes maior que a densidade da nuvem de pontos de VLA utilizada para compilar os três modelos poliédricos.

Um problema a ser estudado no futuro é o desenvolvimento de modelos de erro para predição de erros cometidos, por um lado, na projeção fotogramétrica de segmentos de reta e na determinação dos vértices do contorno refinado de telhado e, por outro lado, na geração de modelo poliédrico de edifícios usando dados de VLA. Estes modelos de erro seriam úteis não só para fornecer a qualidade dos modelos poliédricos gerados, obtidos de dados de VLA e refinados, mas também para decidir antecipadamente se uma dada reta a ser projetada teria qualidade suficiente para substituir o correspondente lado do poliedro gerado via dados de VLA. Por exemplo, se um dado edifício aparecer na imagem muito distante do pp, podem ocorrer intersecções entre planos objeto e de correspondentes faces de telhado segundo ângulos muito pequenos, implicando em retas projetadas com grande incerteza. Nesse caso pode ser preferível manter o segmento original da representação poliédrica gerada via dados de VLA. Outro desafio interessante envolve a melhoria do método proposto para corrigir os detalhes não modelados nas representações poliédricas de edifício obtidas a partir de dados de VLA. Exemplos de dificuldades de modelagem de detalhes em modelos poliédricos de edifícios usando dados de VLA foram identificados no edifício teste 3.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com suporte do CNPq, via processo número 304879/2009-6.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AKÇAY, H. G.; AKSOY, S. Automatic

Detection of Geospatial Objects Using Multiple Hierarchical Segmentations. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 46, n. 7, p. 2097–2111, 2008.

CHENG, L.; GONG, J.; LI, M.; LIU, Y. 3D Building Model Reconstruction from Multi-view Aerial Imagery and Lidar Data. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 77, n. 2, p. 125-138, 2011.

FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P. Rectilinear building roof contour extraction based on snakes and dynamic programming. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation** (former ITC Journal), v. 25, p. 1 - 10, 2013.

FERRAIOLI, G. Multichannel InSAR Building Edge Detection. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 48, n. 3, p. 1224–1231, 2010.

FUA, P.; HANSON, A. J. Resegmentation Using Generic Shape: Locating General Cultural Objects. **Pattern Recognition Letters**, v. 5, p. 243-252, 1987.

GALVANIN, E. A. S.; DAL POZ, A. P. Extraction of Building Roof Contours from LiDAR Data Using A Markov-Random-Field-Based Approach. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 50, p. 981-987, 2012.

HAALA, N.; BRENNER, C. Extraction Of Buildings And Trees In Urban Environments. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 54, p. 130-137, 1999.

HAALA, N.; KADA, M. An Update on Automatic 3D Building Reconstruction. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 65, n. 6, p. 570–580, 2010.

JAW, J. J.; CHENG, C. C. Building Roof Reconstruction by Fusing Laser Range Data and Aerial Images. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, 2008. p. 707-712.

KAARTINEN, H.; HYYPPÄ, J.; GÜLCH, E.; VOSSELMAN, G. et al. Accuracy of the 3D City Model: EuroSDR Comparison. *In Proceedings of the International Archives*

- of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Enschede, Holanda, 2005. p. 227-232.
- KIM, C.; HABIB, A. Object-Based Integration of Photogrammetric and LiDAR Data for Automated Generation of Complex Polyhedral Building Models. **Sensor**, v. 9, p. 5679-5701, 2009.
- MATIKAINEN, L.; HYYPPÄ, J., AND HYYPPÄ, H. Automatic Detection of Buildings from Laser Scanner Data for Map Updating. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Alemanha, 2003. Sem paginação
- MÜLLER, D, S.; ZAUM, W. Robust Building Detection in Aerial Images. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Viena, Austria, 2005. p. 143-147.
- ROTTENSTEINER, F.; TRINDER, J.; CLODE, S.; KUBIK, K. Automated Delineation of Roof Planes from LiDAR Data. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Vienna, Austria, 2005. p. 221-226.
- SAMPATH, A.; SHAN, J. Building Boundary Tracing and Regularization from Airborne LiDAR Point Clouds. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 73, n. 7, p. 805–812, 2007.
- SAMPATH, A.. SHAN, J. Segmentation and Reconstruction of Polyhedral Building Roofs from Aerial LiDAR Point Clouds. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 48, n. 3, p. 1554–1567, 2010.
- SIRMAÇEK, B.; ÜNSALAN, C. A. Probabilistic Framework to Detect Buildings in Aerial and Satellite Images. **IEEE Transaction on Geosciences and Remote Sensing**, v. 49, n. 1, p. 211-221, 2011.
- SOHN, G.; DOWMAN, I. J. Building Extraction Using Lidar DEMs and Ikonos Images. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Dresden, Alemanha, 2003. Sem paginação
- TARSHA-KURDI, F.; LANDES, T.; GRUSSENMEYER, P.; SMIGIEL, E. New Approach for Automatic Detection of Buildings in Airborne Laser Scanner Data Using First Echo Only. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Bonn, Alemanha, 2006. Sem paginação
- TIAN, J.; CUI, S.; REINARTZ, P. Building Change Detection Based on Satellite Stereo Imagery and Digital Surface Models. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 52, n. 1, p. 406-417, 2014.
- TÓVARI, D.; VÖGTLE, T. Object Classification in Laserscanning Data. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Istambul, Turquia, 2004. Sem paginação
- VOSSelman, G. Fusion of Laser Scanning Data, Maps, and Aerial Photographs for Building Reconstruction. *In Proceedings of the IEEE International Symposium on Geosciences and Remote Sensing*, Toronto, Canadá, 2002. p. 85-88
- WEI, S. Building Boundary Extraction Based on LiDAR Point Clouds Data. *In Proceedings of the International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Beijing, China, 2008. p. 157-162.