
ELIMINAÇÃO DE RETAS PERTENCENTES AO TERRENO E REDUÇÃO DA FRAGMENTAÇÃO DAS RETAS NO PROCESSO DE DETECÇÃO DE CONTORNOS E CUMEEIRAS DE EDIFÍCIOS

VANESSA JORDÃO MARCATO

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ

Universidade Estadual Paulista - UNESP
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Departamento de Cartografia, Presidente Prudente, SP
vanessamarcato@yahoo.com.br, aluir@fct.unesp.br

RESUMO - Nesse artigo, uma metodologia é proposta para a extração automática de contornos e cumeeiras de telhados a partir de dados laser e imagens aéreas de alta-resolução. Esse método utiliza a projeção das estruturas 3D de edifícios na imagem para facilitar a identificação de feições retas que correspondam a contornos e cumeeiras de telhados de edifícios nessa imagem. Para tanto, inicialmente, os contornos e cumeeiras de telhados previamente extraídos dos dados laser, são projetados numa imagem aérea. As retas projetadas são úteis para delimitar áreas onde contornos e cumeeiras de edifícios podem ser encontrados. Para extrair os contornos e cumeeiras da imagem, respectivamente, como bordas do tipo degraus e linhas, os detectores de Canny e Steger devem ser selecionados adequadamente. O detector de Canny extrai eficientemente bordas do tipo degrau, enquanto que o detector de Steger proporciona uma detecção acurada de linhas. Diante dessa situação basta identificar onde se deve reter o resultado do detector de Canny e onde se deve reter o resultado do detector de Steger. Os resultados obtidos na avaliação experimental mostraram que a metodologia funciona adequadamente na tarefa de eliminar duplicidades na resposta do detector de Canny, via retenção, nesses casos, das respostas do detector de Steger.

ABSTRACT - In this paper, a methodology is proposed for building roof contours and ridges automatic extraction using laser data and high-resolution aerial images. The projection of 3D structures of building onto the image-space is used in order to facilitate the identification of straight features corresponding to building roofs and ridges in this image. First of all the building roof contours and ridges previously extracted from laser data, are projected onto an image. Projected lines are useful to delimit areas where building roof contours and ridges can be found. To extract the building roof contours and ridges from the image, which appear, respectively, as step edges and lines, Canny and Steger detectors need to be selected properly. The Canny detector extracts efficiently the step edges whereas through the use Steger detector is possible to accurately accomplish the line extraction. Thus, it is necessary to identify the situations where are required to retain the results obtained by the Canny edge detector and by the Steger line detector. An experimental evaluation was performed and the results showed that the methodology works successfully in the task of eliminating the duplicity in the Canny detector answers through the use, in this case, of Steger detector answers.

1 INTRODUÇÃO

Desde a década de 1960 são realizadas pesquisas em extração de feições em imagens digitais nas mais variadas comunidades científicas. Segundo Mayer (1999), as pesquisas na área de extração de edificações iniciaram-se na primeira parte da década de 1980, tendo por base dados de imagem de alta resolução, visto que o objetivo era a reconstrução detalhada de edificações. Nas décadas de 1980 e 1990 foram utilizadas quase que exclusivamente imagens aéreas. Já no final da década de 1990, essa situação mudou com o surgimento dos satélites de imageamento de alta-resolução e dos sistemas de varredura a laser.

Uma tendência atual de pesquisa é a combinação de dados laser com dados de outros sensores (imagens aéreas e de satélite) visando à extração automática ou semi-automática, de forma acurada e confiável, de objetos tais como edifícios e vias. Várias metodologias dessa classe podem ser encontradas na literatura. Como por exemplo, Haala e

Brenner (1999) combinaram imagens multiespectrais e dados MDE/LASER (Modelo Digital de Elevação gerado a partir de dados laser) para separar edifícios de vegetação. Sohn e Dowman (2003) sugeriram uma outra metodologia, em que inicialmente os edifícios são extraídos separadamente de uma imagem Ikonos e de dados MDE/LASER e, em seguida, ambos os resultados são combinados para a remoção de inconsistências. E Machado e Mitishita (2006) combinaram imagens aéreas de pequeno formato e dados laser para extrair contornos de telhados.

Tendo em vista essa tendência, esse trabalho apresenta uma metodologia para a extração automática de contornos e cumeeiras de telhados a partir de dados laser e de imagens aéreas de alta-resolução. Esta metodologia utiliza projeções no espaço-imagem de estruturas 3D de edifícios, extraídas de dados laser, para facilitar a extração na imagem de contornos e cumeeiras de telhados. Esse processo de análise de imagem inicia com a detecção de descontinuidades, as quais, para o caso em questão, manifestam-se como bordas degrau (step edges) ao longo de contornos de telhados e como linhas ao longo de cumeeiras. Essa pesquisa propõe uma solução para esse problema, consistindo em selecionar automaticamente os detectores de Canny (1986) e Steger (1996) para detectar, respectivamente, bordas degrau e linhas. Adicionalmente, são aplicadas técnicas para a eliminação de retas representantes do terreno e para a redução da fragmentação dos segmentos de lados de contornos e cumeeiras.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Detector de Canny

Canny (1986) definiu um conjunto de objetivos para um detector de bordas e descreveu uma metodologia de otimização para alcançá-los, sendo eles:

- 1)Taxa de Erro: o detector de bordas deverá responder somente para bordas verdadeiras, correspondendo a maximizar o SNR (Signal-to-Noise Ratio);
- 2)Localização: os pontos de borda devem estar bem localizados, ou seja, as distâncias entre os pontos extraídos pelo detector e as respectivas posições verdadeiras devem ser minimizadas;
- 3)Resposta Múltipla: o detector de bordas não deverá identificar múltiplos pixels de bordas onde somente existe uma borda.

A proposta de Canny é encontrar o filtro f que maximize o produto entre o SNR e a Localização, sujeito à limitação de respostas múltiplas. Para tanto, inicialmente, é realizada a maximização dos dois primeiros critérios (taxa de erro e localização) o que é igual à maximização do produto entre ambos (SNR e L), Canny (1986).

$$\left(\frac{\left| \int_{-w}^w G(-x)f(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f^2(x) dx}} \right) \cdot \left(\frac{\left| \int_{-w}^w G'(-x) f'(x) dx \right|}{n_0 \sqrt{\int_{-w}^w f'^2(x) dx}} \right) \quad (1)$$

em que $f(x)$ é a resposta de impulso do filtro definido no intervalo $[-w; w]$, $G(x)$ é uma borda unidimensional e a quantificação do ruído da imagem. Assume-se que a borda está centrada em $x = 0$.

O filtro ótimo ainda deve se submeter ao terceiro critério, injeção de resposta múltipla.

$$x_{\max} = 2\pi \left(\frac{\int_{-\infty}^{+\infty} f'^2(x) dx}{\int_{-\infty}^{+\infty} f''^2(x) dx} \right)^{1/2} \quad (2)$$

a expressão matemática para a distância (x) entre máximos adjacentes na resposta do filtro $f(x)$ devido ao ruído.

O filtro ótimo encontrado por Canny pode ser eficientemente aproximado pela derivada primeira da função Gaussiana unidimensional, isto é,

$$G'(x) = \left(-\frac{x}{\sigma^2} \right) e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (3)$$

Como a Gaussiana bidimensional é uma função separável, uma imagem pode ser convoluída unidimensionalmente com a derivada primeira da Gaussiana, primeiro numa direção (linha ou coluna) e depois na outra.

2.2 Detector de Steger

Para detectar linhas em uma imagem unidimensional $z(x)$ sem ruídos, basta determinar o ponto onde $z'(x)$ se anula. Para que as linhas mais salientes sejam selecionadas, é necessário utilizar o valor de magnitude da segunda derivada $z''(x)$ no ponto onde $z'(x) = 0$. Se as imagens contêm ruídos, o que ocorre na prática, esse método não é suficiente. Para contornar este problema, a primeira e a segunda derivadas de $z(x)$ podem ser estimadas convoluindo a imagem com as derivadas do núcleo gaussiano, Steger (1996). O núcleo Gaussiano e suas derivadas de primeira e segunda ordem, com desvio-padrão σ , são dadas por,

$$g_{\sigma}(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (4)$$

$$g'_{\sigma}(x) = \frac{-x}{\sqrt{2\pi}\sigma^3} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (5)$$

$$g''_{\sigma}(x) = \frac{x^2 - \sigma^2}{\sqrt{2\pi}\sigma^5} e^{-\frac{x^2}{2\sigma^2}} \quad (6)$$

A convolução com o núcleo Gaussiano das linhas conduz a uma descrição do espaço-escala do perfil da linha, como segue:

$$r_a(x; \sigma; w; a) = g_{\sigma} * f_a(x) = \varphi_{\sigma}(x+w) + (a-1)\varphi_{\sigma}(x-w) \quad (7)$$

$$r'_a(x; \sigma; w; a) = g'_{\sigma} * f_a(x) = g'_{\sigma}(x+w) + (a-1)g'_{\sigma}(x-w) \quad (8)$$

$$r''_a(x; \sigma; w; a) = g''_{\sigma} * f_a(x) = g''_{\sigma}(x+w) + (a-1)g''_{\sigma}(x-w) \quad (9)$$

em que, φ é a integral do núcleo Gaussiano, dada por:

$$\varphi_{\sigma}(x) = \int_{-\infty}^x e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}} dt \quad (10)$$

De uma forma geral, um determinado ponto da imagem é considerado como pertencente a uma linha saliente se, nesse ponto, $r'_a = 0$ e $r''_a \gg 0$.

Para preservar as linhas mais importantes, é necessário selecionar o desvio-padrão gaussiano tal que $\sigma > \frac{w}{\sqrt{3}}$.

Este valor de σ é obtido através da solução de $\frac{\partial}{\partial \sigma} \left(\frac{r''_a}{r'_a} \right) = 0$. A posição da linha pode ser determinada por, Steger (2000),

$$x = -\frac{\sigma^2}{2w} \ln(1-a) \quad (11)$$

A equação 11 mostra claramente que a linha será extraída na posição correta, ou seja, para $x = 0$, somente se o contraste em ambos os lados da linha forem iguais, isto é, $a = 0$.

No caso 2D, a imagem da primeira derivada corresponde a uma imagem de gradiente. Neste caso, podem-se modelar linhas como uma curva $s(t)$ para o qual se tem na direção transversal um comportamento semelhante ao perfil unidimensional. Assim, dado um ponto p de $s(t)$, deve-se analisar a direção transversal à linha em p , correspondente ao vetor normal $\vec{n}(t)$. Conseqüentemente, podem-se extrair pontos de linhas em 2D utilizando a primeira derivada direcional na direção $\vec{n}(t)$. Dessa forma o problema se resume a determinar a direção de $\vec{n}(t)$ em cada ponto da linha. A direção de $\vec{n}(t)$ pode ser obtida a partir do autovetor correspondente ao autovalor de maior magnitude da matriz Hessiana da imagem suavizada, Steger (2000). A matriz Hessiana é dada por:

$$H(x, y) = \begin{pmatrix} r_{xx} & r_{xy} \\ r_{xy} & r_{yy} \end{pmatrix} \quad (12)$$

em que, r_{xx} é a derivada segunda em relação à direção x , r_{yy} é a derivada segunda em relação à direção y e r_{xy} é a derivada mista, todos tomados sobre a imagem suavizada.

3 METODOLOGIA

Os contornos 3D de telhados de edifícios, a imagem aérea e os pontos de apoio são os dados de entrada da metodologia. O primeiro passo consiste em determinar por resseção espacial os parâmetros de orientação da imagem. O segundo passo consiste em transformar os vértices 3D dos contornos de telhados, extraídos de dados LASER, no sistema de coordenadas de imagem (LC) através de técnicas fotogramétricas e, em seguida, gerar janelas retangulares contendo as feições retas projetadas, de tal forma que: 1) cada feição reta projetada é coincidente com o eixo de simetria da janela que a contém; 2) as dimensões das janelas são calculadas em função dos comprimentos e erros de registro das respectivas feições retas projetadas; e 3) o erro de registro é estimado através da lei de propagação de erros aplicada às equações de transformação dos vértices 3D para o espaço-imagem.

No próximo passo, em cada janela previamente gerada, aplica-se sequencialmente o detector de bordas de Canny, um algoritmo de vetorização e outro de poligonização. E em seguida, repete-se o mesmo processo, só que dessa vez usando o detector de linhas de Steger. Em ambos os casos o objetivo é extrair feições retas.

A seguir é brevemente explicado o procedimento algorítmico em geral, mas com ênfase no procedimento específico aplicado a uma janela de feição reta projetada.

Após a aplicação do detector de Steger na primeira janela ($i = 1$), é feita uma busca por feições retas detectadas por ele (m - número de retas detectadas por Steger dentro da janela correspondente), se forem encontradas, é feita uma nova busca ($j = 1$), só que dessa vez por duas feições retas paralelas e bem próximas geradas por Canny que contenham a feição reta detectada por Steger. Se as feições retas de Canny forem encontradas, elas são descartadas e mantém-se a feição reta encontrada por Steger. Ao contrário, elimina-se a feição reta encontrada por Steger. Esse processo é repetido até que $j > m$ e, quando isso acontecer, mantém-se as feições retas restantes de Canny. Verifica-se então se $i (i = 2) > n$ (número de janelas) e, se sentença for verdadeira, o processo é encerrado. Caso contrário, repete-se todo o procedimento anterior, até que $i > n$.

Se na primeira busca a feição reta gerada por Steger não for encontrada, retêm-se as retas geradas por Canny, devendo-se a seguir ($i = 2$) verificar se o processo continua ($i \leq n$) ou é encerrado ($i > n$).

Nessa parte do trabalho, de análise dos resultados, é necessário que se estabeleçam algumas tolerâncias com relação ao paralelismo e a distância entre as duas retas de Canny, e também com relação à discrepância entre as distâncias entre a reta de Steger e as duas retas de Canny. As tolerâncias adotadas foram 3° , 4 pixels e 1 pixel, respectivamente. Maiores detalhes podem ser vistos em Marcato (2009).

Os resultados obtidos, nessa etapa do trabalho, foram bastante satisfatórios, no entanto, alguns problemas como, a presença de segmentos de retas representantes do terreno e, em muitas vezes, a descontinuidade dos segmentos de lados de contornos e cumeeiras, foram observados. Para solucionar tais problemas foi desenvolvida uma metodologia que apresenta dois objetivos principais. O primeiro trata da eliminação de retas pertencentes ao terreno. Para o alcance dessa finalidade é necessário detectar quais as retas que pertencem ao terreno, associando a essas retas dois parâmetros: a altura média e o erro de registro médio. Para tanto, torna-se necessário determinar para cada pixel da imagem um valor de altura e erro de registro. Esses valores são obtidos através de uma nuvem de pontos laser pertencente à área de estudo, as precisões dos pontos laser e a respectiva MVC dos parâmetros de orientação da imagem, adquirida no processo de resseção espacial e a partir das variâncias dos pontos laser. Para adquirir o valor de altura e erro de registro para cada pixel da imagem é necessário, inicialmente, transformar as coordenadas 3D dos pontos laser em coordenadas de imagem (C, L), sendo esse processo realizado através de técnicas fotogramétricas. Assim, ao final desse processo todas as coordenadas estarão no espaço-imagem e, além disso, para cada par de coordenadas estará associado um valor de altura (Z) do ponto correspondente ao terreno. O próximo passo consiste em, a partir desses pontos projetados, interpolar os valores de altura para cada pixel da imagem. Já para o cálculo do erro de registro, o procedimento utilizado é a propagação de variância-covariância aplicada às equações que transformam um ponto do terreno (X, Y, Z) em coordenadas imagem (C, L). O valor do erro de registro é obtido a partir das variâncias nas coordenadas do ponto projetado na imagem.

Esse processo será aplicado para toda a nuvem de pontos laser, o que resultará em valores de erro de registro para cada par de coordenadas de imagem (C, L) relacionadas com esses pontos. Em seguida, aplica-se um método de interpolação, para assim, obter para cada pixel da imagem o erro de registro.

O próximo passo consiste em detectar e conectar as retas próximas e colineares, possibilitando a redução da fragmentação das retas remanescentes. As retas pertencentes ao terreno devem ser eliminadas primeiro, uma vez que este procedimento possibilita reduzir o espaço de fusão e as possíveis falhas.

Para a redução de fragmentação, o método a ser utilizado é a fusão de retas colineares baseada em regras perceptuais, como as de colinearidade e proximidade. Para tanto, é necessário que os valores de distâncias e ângulos entre as retas em questão sejam próximos de 0 (zero).

Uma vez que as retas atendam as condições impostas, essas são fundidas. Dessa forma, os lados de contornos e cumeeiras que possuam lacunas nas quais o processo de extração falhou, são reconstruídos. Novos segmentos de lados de contorno e cumeeiras são gerados, preenchendo as lacunas remanescentes.

4 RESULTADOS

A seguir serão apresentados alguns dos resultados obtidos, a partir da aplicação da metodologia, em alguns dos lados de contornos e cumeeiras de edifícios.

Como pode ser observado, na Figura 1, para o lado de contorno 1 (Figura 1(a,b)), o resultado mantido para esse local foi o do detector de Canny (Figura 1(e)). Nesse caso, o detector de Steger (Figura 1(c)) praticamente não apresentou resposta.

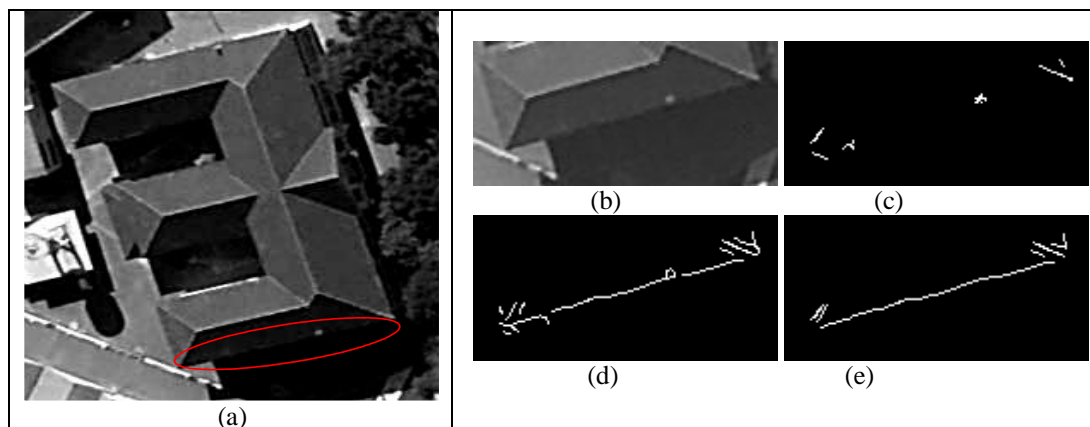


Figura 1 – Lado de contorno 1. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) recorte na imagem contendo o lado de contorno; (c) resultado da detecção de Steger; (d) resultado da detecção de Canny; (e) resultado mantido para o local.

Pode-se notar, também que ao comparar a reta conservada com o resultado de Canny (três retas colineares e bem próximas) houve a redução da fragmentação de retas.

O detector de Canny (Figura 2(d)) apresentou para a cumeeira 1 respostas duplas e o detector de Steger apresentou uma única resposta. Nesse caso é mantida a reta detectada pelo detector de Steger (Figura 1(e)).

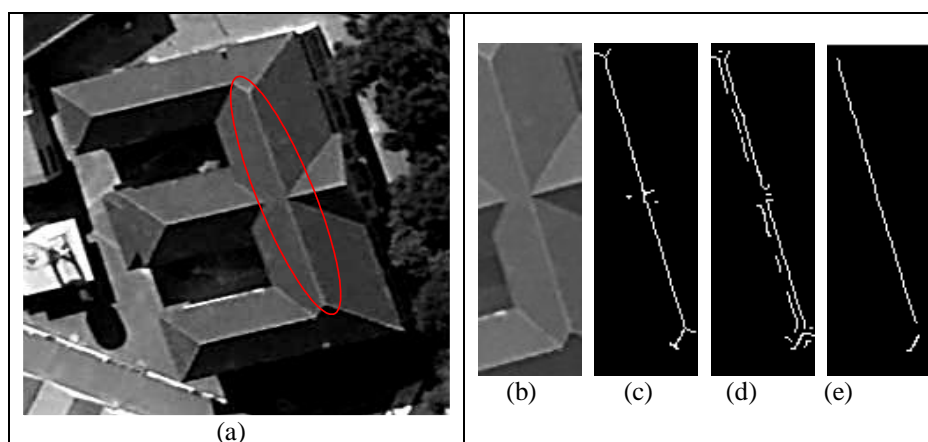


Figura 2 – Cumeeira 1. (a) localização da cumeeira no edifício; (b) recorte na imagem contendo a cumeeira; (c) resultado da detecção de Steger; (d) resultado da detecção de Canny; (e) resultado mantido para o local.

Nesse primeiro lado de contorno (Figura 3), pode-se verificar que a resposta conservada foi a de Canny.

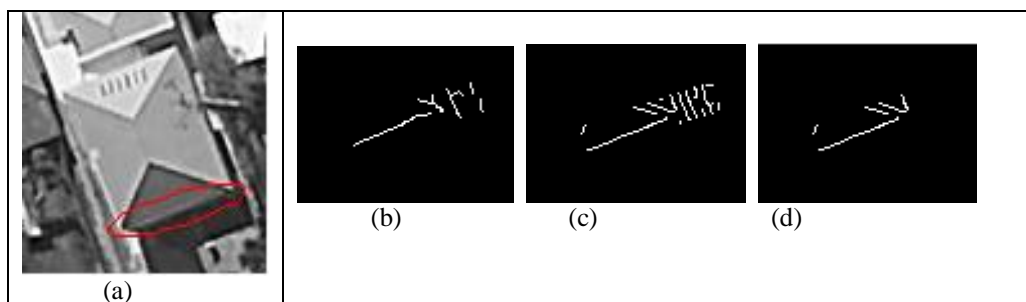


Figura 3 – Lado de contorno 2. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

Verifica-se que a resposta mantida está correta, tendo em vista os resultados obtidos em separado por ambos os detectores e as regras assumidas na metodologia proposta.

As próximas duas cumeeiras apresentaram o mesmo tipo de resultado, visto que o detector de Canny forneceu duplas respostas para as cumeeiras e o detector de Steger uma única resposta. Consequentemente, nos dois casos as retas detectadas por Steger, para as respectivas cumeeiras, foram mantidas. Isso pode ser verificado nas figuras a seguir (Figura 4, 5).

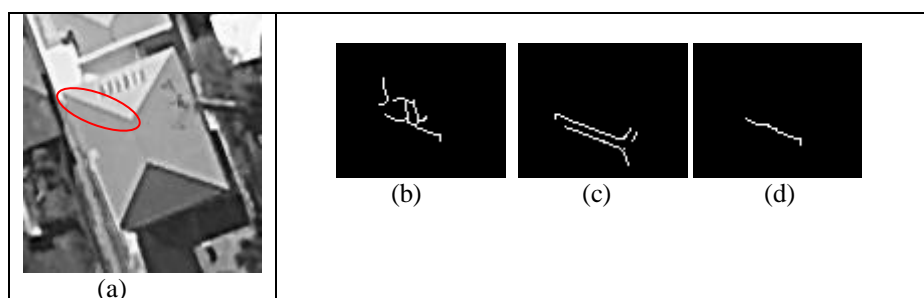


Figura 4 – Cumeeira 2. (a) localização da cumeeira no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

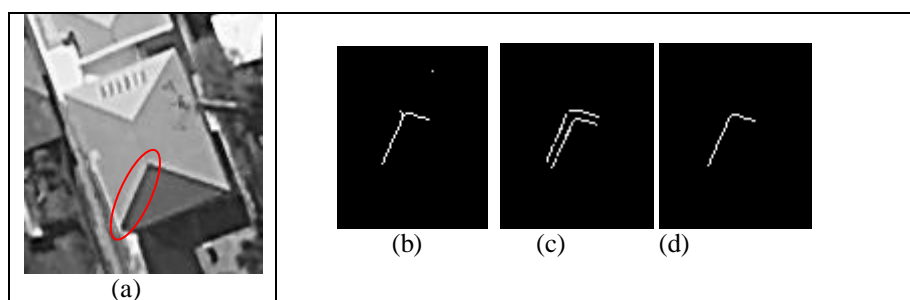


Figura 5 – Cumeeira 3. (a) localização da cumeeira no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

Para o próximo lado de contorno (Figura 6), pode-se verificar que a resposta conservada foi a de Canny.

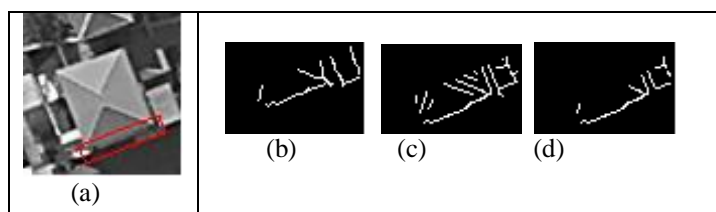


Figura 6 – Lado de contorno 3. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

Verifica-se que a resposta mantida está correta, tendo em vista os resultados obtidos em separado por ambos os detectores e as regras assumidas na metodologia proposta.

A figura 7 mostra que os detectores de Canny (Figura 7 (c)) e de Steger (Figura 7(b)) geraram apenas uma reta, o que, pela metodologia proposta, acarreta na conservação da resposta de Canny.

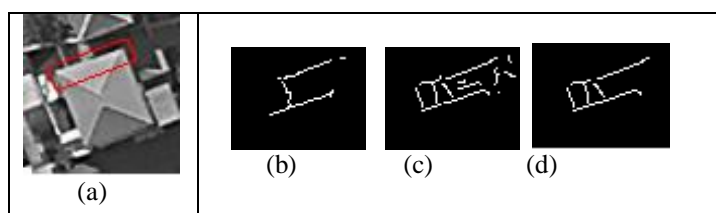


Figura 7 – Lado de contorno 4. (a) localização do lado de contorno no edifício; (b) resultado da detecção de Steger; (c) resultado da detecção de Canny; (d) resultado mantido para o local.

Pode-se notar que algumas retas detectadas por Canny foram eliminadas do resultado final, pois pertenciam ao terreno. E, pode-se notar também que ao comparar a reta conservada com o resultado de Canny (duas retas colineares e bem próximas) houve a redução da fragmentação de retas

5 CONCLUSÕES

Este trabalho apresentou um estudo de um problema comum na extração de cumeeiras e contornos de telhados em imagens aéreas de alta resolução, tratando-se da coexistência de padrões de intensidade dos tipos borda degrau e linha. O uso só de um detector de bordas, como o de Canny, gera respostas duplas para as linhas. Já um detector de linhas, como o de Steger, que é baseado em perfis na forma de uma barra, normalmente não responde às bordas degrau. Portanto, é necessário combinar detectores de linha e borda para se obter resultados de melhor qualidade e facilitar as etapas seguintes de análise de imagem.

Pode ser visto através dos resultados experimentais a viabilidade do método. Essa técnica foi empregada em vários edifícios, que se localizavam em diferentes regiões da imagem e, essa correspondeu às expectativas.

AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer à FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) pelo financiamento dessa pesquisa através de uma bolsa de iniciação científica (Processo nº 2007/07757-9).

REFERÊNCIAS

CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.

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.

MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E. A. Detecção automática de contornos de edificações utilizando imagem gerada por câmera digital de pequeno formato e dados LIDAR. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 12, n. 3, 2006, p. 215-233.

MARCATO, V. J. **Seleção automática dos métodos de Canny e Steger para a detecção acurada e confiável de linhas e bordas associadas com contornos e cumeeiras de edifícios**. Presidente Prudente, 2009. Relatório de iniciação

científica (FAPESP), Curso de Graduação em Engenharia Cartográfica, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista.

MAYER, H. Automatic Object Extraction from Aerial Imagery - A Survey Focusing on Buildings. **Computer Vision and Image Understanding**, v. 74, n. 2, p. 139-149, 1999.

SOHN, G.; DOWMAN, I. J. Building extraction using Lidar DEMs and Ikonos images. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, 2003.

STEGER, C. Extracting Lines Using Differential Geometry and Gaussian Smoothing; In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 31, Part B3, 1996, p. 821-826.

STEGER, C. Subpixel – Precise Extraction of Lines and Edges. **ISPRS: International Society for Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 33, Amsterdam, 2000.