

AUTOMAÇÃO NA EXTRAÇÃO DE OBJETOS CARTOGRÁFICOS A PARTIR DE DADOS DE ALTA RESOLUÇÃO

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ

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

RESUMO - Várias pesquisas em extração de objetos cartográficos vêm sendo realizadas no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP - Campus de Presidente Prudente. Este artigo sumaria as pesquisas desenvolvidas nos últimos 8 anos pelo grupo de pesquisa que coordeno. São apresentados os princípios e exemplos ilustrativos de metodologias para a extração automática e semi-automática de contornos de edifícios e de rodovias a partir de dados de alta-resolução. De uma forma geral, as metodologias desenvolvidas para a extração de rodovias baseiam-se em imagens aéreas e de satélite de alta-resolução e as destinadas para a extração de contornos de edifícios baseiam-se em dados LiDAR ou na combinação destes dados com imagens de alta-resolução.

ABSTRACT - Diverse researches in cartographic object extraction have been carried out in the Cartographic Science Graduate Program at UNESP - Campus of Presidente Prudente. Researches that have been accomplished in the last 8 years by the research group under my coordination are summarized in this paper. Principles and illustrative examples of automated and semiautomatic methodologies for road extraction and roof contour extraction are presented. In general, our road extraction methodologies are based on high-resolution aerial and satellite images and our building roof contour extraction methodologies are based either in LiDAR data or in the combination between LiDAR data and high-resolution images.

1 INTRODUÇÃO

O problema de extração de feições em imagens digitais vem sendo alvo de intensa investigação desde a década de 1960. Mais recentemente se intensificaram também as pesquisas com dados de varredura a laser, fato decorrente do amadurecimento do sistema que integra sensor laser com o GPS (*Global Positioning System*) e o IMU (*Inertial Navigation Unit*). Várias pesquisas em extração de objetos cartográficos vem sendo realizadas, nos últimos 8 anos, no âmbito do grupo que coordeno e que desenvolve atividades de pesquisa vinculadas ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas (PPGCC) da UNESP, Campus de Presidente Prudente.

Este trabalho apresenta um panorama das pesquisas desenvolvidas em extração automática de rodovias e contornos de edifícios a partir de dados LiDAR e de imagem de alta-resolução, juntamente com exemplos ilustrativos relacionados a cada metodologia. A Seção 2 apresenta as metodologias desenvolvidas para a extração de rodovias. Metodologias específicas para a extração de edifícios são apresentadas na Seção 3. O artigo é finalizado na Seção 4 com a apresentação de algumas considerações finais.

2 METODOLOGIAS PARA A EXTRAÇÃO DE RODOVIAS

Os modelos e estratégias para a extração de rodovia dependem em essência dos seguintes fatores: 1) Tipo de cena: rural ou urbana; 2) Resolução da imagem: alta-resolução (pixels menores que 0,7 m ou rodovias com largura superior a 7 pixels), média-resolução (pixels no intervalo [0,7 m; 2,0 m] ou rodovias com larguras entre 4 pixels e 6 pixels) e baixa-resolução (pixels maiores que 2,0 m ou rodovias com larguras entre 1 pixel e 3 pixels); e 3) Uso de dados externos: mapas preexistentes e pontos sementes fornecidos por um operador. Nas subseções que seguem são apresentados os princípios, além de exemplos ilustrativos, das principais metodologias desenvolvidas para extração de rodovias em imagens de alta-resolução.

2.1 Metodologias semi-automáticas

As metodologias semi-automáticas são caracterizadas pela interferência de um operador que reconhece a rodovia de interesse e que mede sobre ela alguns pontos sementes, necessários para a inicialização do processo de extração. A tarefa de delineamento geométrico fica a cargo do algoritmo computacional. O

algoritmo de delineamento pode ser seqüencial, caso em que o operador necessita fornecer a posição e a direção em um ponto inicial, ou global, quando o operador necessita fornecer pontos sementes distribuídos esparsa e grosseiramente ao longo da rodovia.

2.1.1 Metodologias com controle seqüencial

Foram desenvolvidas uma metodologia baseada em técnicas de correlação e uma outra baseada nos princípios de teste ativo e análise de bordas anti-paralelas.

2.1.1.1 Metodologia baseada em técnicas de correlação

A inicialização do delineamento é feita pelo operador que fornece dois pontos sementes num pequeno trecho aproximadamente reto. Após a inicialização, o método prossegue com o delineamento combinando técnicas de extrapolação linear e correlação entre perfis de tons de cinza extraídos transversalmente à rodovia. Um outro ponto semente é usado para informar onde o processo de delineamento deve parar.

Como mostra a figura 1, dois perfis de tons de cinza são utilizados: 1) o perfil modelo (linha pontilhada) representando o perfil médio do leito da rodovia até o último ponto extraído; e 2) o perfil medido representando o perfil de rodovia extraído no último ponto extrapolado. O objetivo do processo de correlação é encontrar a melhor correspondência entre ambos os perfis.

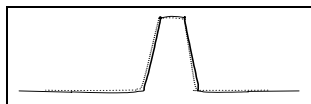


Figura 1 - Princípio do processo de correlação.

Em Mendes (2005), utilizou-se a função de correlação denominada erro quadrático, que tem como característica desejável o fornecimento da posição de melhor correlação com maior exatidão. Um refinamento posterior utilizando a correlação pelos mínimos quadrados também foi empregado. O método prossegue o delineamento da rodovia empregando passos seqüências de extrapolação e refinamento, parando quando o final da rodovia for encontrado.



Figura 2 – Exemplo de resultado obtido pelo método em uma imagem de alta-resolução.

A figura 2 mostra um exemplo de aplicação do método. O delineamento é iniciado na parte superior com dois pontos sementes e interrompido através de um ponto semente localizado na borda inferior da imagem.

2.1.1.2 Delineador baseado em teste ativo e análise de bordas

Esta metodologia (Dal Poz e Silva, 2002, 2003) tem o mesmo princípio básico da metodologia descrita na subseção anterior, diferenciando-se pelos mecanismos empregados nas etapas de extrapolação e extração de cada ponto do eixo de rodovia. A extrapolação de um ponto do eixo de rodovia um passo adiante é realizada através de uma estratégia conhecida como *teste ativo*. A estratégia de teste ativo pode ser definida como o processo em que uma imagem é explorada seqüencialmente para extrair informações que possibilitem a identificação de um ou mais objetos, cujos modelos encontram-se armazenados em uma biblioteca de objetos (por exemplo, rodovias, viadutos, edifícios etc.). Em Dal Poz e Silva (2002), o modelo de objeto é o maior segmento retangular de rodovia de interesse na imagem. A partir de um dado ponto do eixo da rodovia, o modelo retangular é ajustado geometricamente à rodovia, permitindo a definição de um novo segmento reto de eixo de rodovia. Na extremidade deste segmento é estabelecida uma seção transversal, ao longo da qual são extraídos, caso existam, dois pontos de borda de rodovia. Estes pontos de borda são usados para interpolar uma posição acurada para o eixo de rodovia.

A figura 3 mostra um resultado obtido usando uma imagem de alta-resolução envolvendo uma área florestal, onde se pode notar a robustez do método na presença de uma rodovia geometricamente irregular.

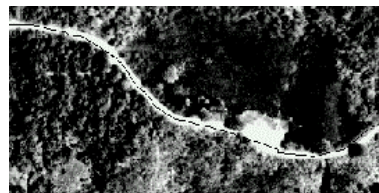


Figura 3 – Exemplo de aplicação.

2.1.2 Metodologias com controle por otimização

Estes métodos dependem da modelagem do eixo da rodovia através de uma função custo ou de energia. Várias soluções baseadas neste conceito foram desenvolvidas, sendo que as soluções específicas para tratar imagens de alta-resolução são apresentados a seguir, juntamente com os respectivos exemplos ilustrativos.

2.1.2.1 Programação dinâmica no espaço-imagem com injeção de bordas

O algoritmo de programação dinâmica é adequado para resolver problemas de otimização quando a função custo envolvida apresentar poucas variáveis inter-

relacionadas simultaneamente (Ballard e Brown, 1982). Como esta metodologia depende de uma aproximação inicial e grosseira da feição linear (eixo de rodovia no caso de imagens de alta-resolução), é necessário que um operador forneça alguns pontos sementes ao longo da mesma. Este procedimento dá origem a uma linha poligonal inicial, a ser refinada iterativamente.

Dal Poz (2000) desenvolveu uma primeira solução baseada em programação dinâmica, só que era específica para extração de rodovias em imagens de baixa resolução. Considerando que uma rodovia pode ser representada por uma linha poligonal $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde $p_i = (x_i, y_i)$ é o i -ésimo vértice, demonstra-se que uma função custo com a estrutura da equação 1 e da desigualdade 2 podem ser utilizadas para modelar a entidade rodovia.

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (1)$$

$$C_i = D_i < T, \quad i = 1, \dots, n-1. \quad (2)$$

onde, E é a função custo expressa na forma de uma soma de $n-1$ funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) da linha poligonal que representa a rodovia; e C_i permite limitar o espaço de busca do problema, evitando que vértices cujos ângulos de deflexão (D_i) forem maiores que um limiar T sejam avaliados.

A função custo dada pela equação 1 pode ser eficientemente otimizada pelo algoritmo de programação dinâmica porque depende apenas de três vértices sucessivos da linha poligonal que descreve a rodovia.

As rodovias resultantes da otimização da função custo acima (equação 1) geralmente são de ótima qualidade quando extraídas de imagens de baixa-resolução, como as imagens SPOT de 10 m de resolução. Em se tratando de imagens de alta-resolução, apenas pode-se garantir que as linhas poligonais resultantes pertencerão aos respectivos leitos de rolagem das rodovias. Em outras palavras, o resultado da otimização da função custo geralmente não representa bem os eixos de rodovia. Vale (2003) modificou a equação 1 para incluir uma injeção de bordas de rodovia, a fim de forçar a linha poligonal extraída a coincidir com o eixo de simetria da respectiva rodovia. Sendo w_i a largura local da rodovia, então um ponto p_i será um ponto do eixo de rodovia se o mesmo estiver a uma distância $w_i/2$ de ambas as bordas da rodovia. Como p_i e w_i são desconhecidos, ambos têm que ser tratados como incógnitas no problema. Demonstra-se que (Vale, 2003) a função custo para extrair acuradamente eixos de rodovia em imagens de alta-resolução pode ser expressa na forma:

$$E^m = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1}) \quad (3)$$

Esta equação mostra que 9 variáveis estão inter-relacionadas simultaneamente e, dessa forma, podem também ser eficientemente otimizada pelo algoritmo de programação dinâmica.

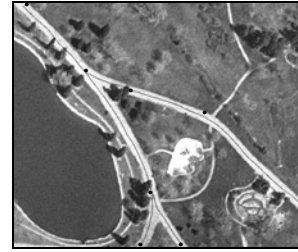


Figura 4 - Resultados obtidos com uma imagem de baixa-resolução.

A figura 4 mostra um resultado obtido a partir da aplicação da metodologia acima a uma imagem aérea de alta-resolução. Pode-se notar que geralmente o eixo de rodovia foi acuradamente extraído e as obstruções parciais causadas por árvores não influenciaram significativamente os resultados.

2.1.2.2 Programação dinâmica no espaço-objeto

A extração de rodovia no espaço-objeto é um processo que permite a extração direta de rodovias num sistema de referência tridimensional associado ao espaço-objeto. Isto requer que uma função custo seja formulada no espaço-objeto. Se o referencial escolhido para a extração de rodovias for o que combina as coordenadas UTM (*Universe Transverse Mercator*) E e N com a altura ortométrica h , será necessário que a função custo incorpore as relações matemáticas entre um ponto em coordenadas E, N e h e seu homólogo no sistema de referência da imagem (L, C). Vários parâmetros são necessários para modelar rigorosamente as relações entre os espaços-imagem e -objeto, como por exemplo os parâmetros de orientação interior e exterior e os parâmetros do datum e da projeção UTM.

O processo de extração de rodovias no espaço objeto pode ser realizado nos modos mono e estéreo. No modo mono apenas uma imagem aérea ou de satélite é utilizada. Principalmente no caso de imagens aéreas, é necessário um MDT (Modelo Digital do Terreno) para se obter uma solução rigorosa. Demonstra-se (Gallis, 2006) que a função custo a ser otimizada tem a forma geral da equação 4. A coordenada h foi removida através de uma restrição que força as rodovias a pertencerem a uma superfície poliédrica, estabelecida a partir de um MDT da região. Esta restrição é necessária para possibilitar a solução única para cada rodovia. As larguras das rodovias nos vértices P_{i-1}, P_i e P_{i+1} são respectivamente W_{i-1}, W_i , e W_{i+1} .

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}), P_i(E_i, N_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}) \quad (4)$$

A figura 5 mostra um exemplo de resultado da aplicação da metodologia de extração para o caso mono, podendo-se notar a boa qualidade dos eixos de rodovia extraídos.

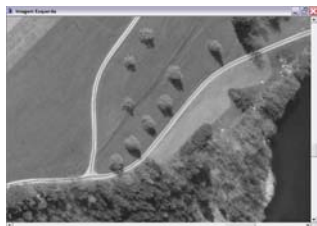


Figura 5 – Exemplo de resultado obtido com a metodologia de extração de rodovia no espaço-objeto – caso mono.

No caso estéreo, o processo de otimização no espaço objeto pode-se basear em duas ou mais imagens aéreas ou de satélite, podendo-se inclusive combinar imagens de diferentes sensores. Os resultados do processo de otimização por PD são linhas poligonais no referencial tridimensional (E, N, h) do espaço objeto. A forma geral da função custo para o caso estéreo é a da equação 5.

$$E^T = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^T (P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), W_{i-1}, W_i, W_{i+1}). \quad (5)$$

A figura 6 mostra um exemplo de resultado obtido pela aplicação da metodologia de extração de rodovia no espaço-objeto para o caso estéreo. O eixo de rodovia foi extraído no espaço-objeto e projetado em ambas as imagens para possibilitar a verificação da qualidade do eixo extraído.

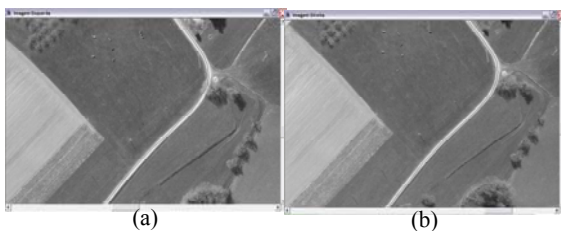


Figura 6 – Exemplo de resultado obtido com a metodologia de extração de rodovia no espaço-objeto – caso estéreo. (a) Recorte da imagem esquerda; e (b) recorte da imagem direita.

Vale por último notar que as funções custo para os casos mono (equação 4) e estéreo (equação 5) possuem respectivamente 9 e 12 variáveis de estado inter-relacionadas simultaneamente. Entretanto, o número de variáveis de estado pode ser reduzido para 4 e 7, respectivamente, impondo restrições no espaço de soluções e considerando que apenas uma largura de rodovia modela adequadamente cada seção de rodovia definida por 3 pontos sucessivos.

2.2 Metodologias automáticas

Várias metodologias foram desenvolvidas para a extração ou a detecção automática de rodovias. Essas

metodologias podem de uma forma geral ser agrupadas nas que apenas detectam as regiões de rodovias, isolando-as do fundo, e as que extraem segmentos de rodovia ou toda malha viária. Esta última classe pode ainda ser subdividida em métodos que dependem e não dependem de dados externos georreferenciados.

2.2.1 Detecção de regiões de rodovia

Em Vale (2007) foi proposta uma estratégia totalmente automática para reduzir a complexidade de padrões (vegetação, edificações, solos etc.) que interagem com o objeto 'rodovia' em imagens coloridas, visando conseqüentemente reduzir a dificuldade na extração automática desse objeto. A metodologia gera, em duas etapas básicas, uma imagem binária contendo regiões de rodovia e fundo.

Primeiramente, o operador pontual de índice de artificialidade NandA é aplicado, consistindo em realizar a seguinte operação pixel a pixel de soma e subtração entre os canais R, G e B de uma imagem RGB: $G - (R + B)$. O resultado é uma imagem mostrando os objetos artificiais (menores níveis de cinza) e naturais (maiores níveis de cinza), geralmente de forma bem contrastada. Esta imagem pode então ser limiarizada para gerar uma imagem binária com regiões artificiais e naturais separadas. Como em áreas rurais as regiões artificiais são geralmente compostas por rodovias, as regiões de rodovia seriam facilmente identificadas na imagem binária. Esta imagem é gerada automaticamente através de um processo denominado *limiarização contextual*.

Na seqüência, a limiarização contextual é realizada através de um limiar calculado automaticamente com base em conhecimentos sobre o comportamento de rodovias no espaço-escala. As rodovias em imagens de alta-resolução manifestam-se como faixas alongadas de pelo menos 7 pixels em escalas finas, tornando-se cada vez mais estreitas, à medida que se avança na direção de escalas mais grosseiras. Uma forma simples e eficiente de gerar um espaço-escala baseia-se na estrutura piramidal de imagens, onde na base se tem a imagem original e na direção do topo se têm imagens de resoluções menores. A última imagem do topo deve possuir uma resolução tal que as rodovias tenham largura entre um e dois pixels, sendo esta largura automaticamente fixada em função da largura média das rodovias na imagem original. Tendo por base este princípio, inicialmente a imagem NandA é reamostrada numa outra em resolução menor de tal forma que as rodovias tenham no máximo 2 pixels de espessura. Sobre esta imagem é aplicado um detector de linhas, que no presente caso foi o detector de linhas de Canny modificado. As linhas detectadas são transformadas para a imagem NandA original (base da pirâmide) invertendo-se o processo geométrico utilizado para a geração da grade da imagem NandA reamostrada (topo da pirâmide). Como as linhas longas geralmente correspondem a rodovias em imagens de cenas rurais, as maiores cadeias de pixels de linha são utilizadas para o cálculo do limiar. Assumindo-se que a distribuição de freqüência de intensidade dos

pixels das linhas longas se dá de forma semelhante a distribuição normal, basta calcular a média (M) e o desvio-padrão (σ) das intensidades para obter uma descrição matemática do comportamento dos pixels de rodovia na imagem NandA. Esta descrição está relacionada com um pico menor mais à esquerda do histograma da imagem. Por estas hipóteses, acima de 99% dos pixels de rodovia possuem valores de cinza inferior ao limiar $M + 3\sigma$. Como a situação ideal assumida não ocorre na realidade, uma vez que outros objetos também podem se manifestar na imagem NandA com intensidades semelhantes, e até mais escuras, outros objetos (como edificações) são separados junto com o objeto rodovia.

No exemplo da figura 7 pode ser visto que a imagem binária (figura 7(b)) possui na classe objetos artificiais não só rodovias, mas também edificações e solo nu. Apesar disso, resultados, como o mostrado na figura 7, facilitam bastante o processo de reconhecimento e delineamento de rodovias, visto que todo processo de análise fica focado nas regiões potenciais de objetos artificiais.

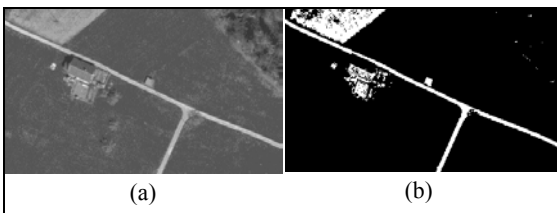


Figura 7 – Exemplo para o método de determinação de regiões de rodovia. (a) Imagem de entrada; e (b) Imagem binária.

2.2.2 Extração automática de rodovias sem o uso de dados externos

2.2.2.1 Extração de segmentos de rodovia via agrupamento hierárquico

Dal Poz et al. (2005) desenvolveram uma metodologia automática para a extração de segmentos de rodovia através de uma estratégia hierárquica.

Primeiramente são extraídas linhas poligonais com base em várias etapas seqüenciais, quais sejam (Jain et al., 1995): a detecção e o afinamento de bordas, a geração de listas ordenadas de pixels de borda e a geração propriamente dita de linhas poligonais.

Os segmentos de rodovia são gerados a partir da combinação de pares de linhas poligonais. Cada par é formado por uma linha poligonal base ou de referência e uma linha poligonal candidata. As linhas poligonais combinadas aos pares são então segmentadas em pequenos quadriláteros e, após, conectados em cadeias. Um segmento de rodovia é formado por uma seqüência de quadriláteros justapostos.

A figura 8 mostra um exemplo ilustrativo, bastante simples, onde se tem uma linha poligonal base compatível com duas linhas poligonais candidatas (figura 8(a)).

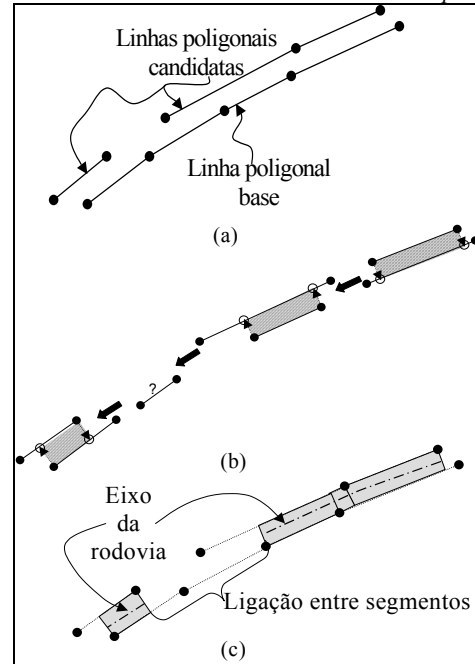


Figura 8 - Exemplo ilustrativo de extração de segmentos de rodovia. (a) Linhas poligonais base e candidatas; (b) Extração de quadriláteros; e (c) Segmentos de rodovia.

O processo de extração e agrupamento de quadriláteros é mostrado nas figura 8(b) e 8(c), respectivamente. Supondo que a linha poligonal base (figura 8(a)) é combinada da direita para a esquerda, dois quadriláteros são gerados pela combinação com a primeira linha poligonal candidata (figura 8(b)). A conexão destes dois quadriláteros gera um primeiro segmento de rodovia (figura 8(c)). Notar que um terceiro quadrilátero é formado entre os dois quadriláteros resultantes da segmentação do par de linhas poligonais. Os vértices dos quadriláteros permitem a definição do eixo da rodovia. A combinação da linha poligonal base com a 2ª candidata (figura 8(a)) permite gerar um segundo segmento de rodovia, constituída apenas de um quadrilátero (figura 8(c)).



Figura 9 – Exemplo de resultado obtido pela metodologia de extração de segmentos de rodovia.

A figura 9 mostra um exemplo de resultado obtido pela metodologia de extração de segmentos de rodovia, podendo-se notar na imagem os segmentos de linhas poligonais correspondentes às bordas de rodovia sobrepostos em tom claro e os segmentos de eixo de rodovia sobrepostos em tom escuro.

2.2.2.2 Extração de segmentos de rodovia via detector de linhas de Steger com seleção automática escala

As rodovias em imagens de alta-resolução se manifestam como faixas alongadas de alta intensidade de brilho. Uma seção transversal de rodovia, com brilho normalizado no intervalo [0; 1], pode ser modelada pela equação 6.

$$f_a(x) = \begin{cases} 0, & x < -w \\ 1, & |x| \leq w \\ a, & x > w \end{cases} \quad (6)$$

onde, para o perfil considerado de rodovia (figura 10(a)): $a \in [0,1]$ é o contraste lateral e w é a semi-largura.

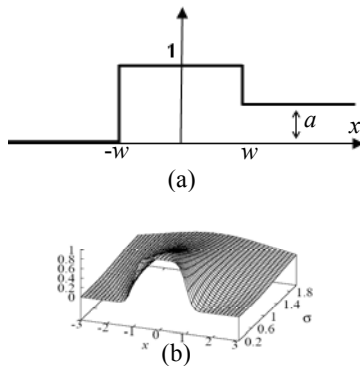


Figura 10 – Seção de rodovia (a) e seu comportamento (b) ao longo do espaço-escala para $a=0$; $w=3$ e $\sigma \in [0,2; 1,8]$.

Para o caso geral, com brilho variando no intervalo [0; h], uma representação geral é obtida re-escalando a equação 6, isto é, fazendo $hf_a(x)$. Vale notar que o ponto central da seção de rodovia ocorre em $x=0$.

A figura 10(b) mostra o comportamento do modelo de linha 1D ($f_a(x)$) ao longo de um espaço-escala gaussiano para $\sigma \in [0,2; 1,8]$. Notar que para sigmas menores a seção de rodovia fica arredondada, assemelhando-se a uma parábola. Para sigmas maiores ela se achata totalmente e se pulveriza. Para detectar o ponto de eixo de rodovia para a seção considerada basta encontrar o ponto de máximo de função $f_a(x)$, convoluída por um núcleo gaussiano, e assegurar que se trata de uma linha com grande possibilidade de não ser espúria. O ponto de máximo ocorre onde a primeira derivada de $f_a(x)$ suavizada se anula e, nesse ponto de máximo, ocorre alto valor da segunda derivada se a linha for não espúria. No

caso 2D envolvendo uma imagem de alta-resolução, bastaria encontrar e analisar as direções transversais às rodovias para extrair pontos ao longo dos respectivos eixos de rodovia.

Ishibashi (2008) desenvolveu uma estratégia para selecionar o valor de sigma automaticamente a fim de que os resultados sejam afetados minimamente por ruídos. A estratégia desenvolvida baseia-se no fato de que as derivadas segundas na direção transversal às linhas são geralmente bem menores para linhas espúrias do que para as físicas. A figura 11(b) mostra os resultados obtidos com uma imagem de alta-resolução, onde se pode notar que as rodovias, como esperado, estão desconectadas apenas nos cruzamentos.

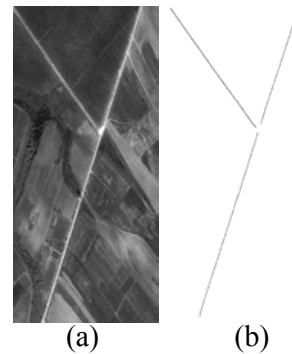


Figura 11 – Exemplo de resultado obtido. (a) Imagem de entrada; e (b) Eixos extraídos.

2.2.2.3 Extração automática da malha viária usando otimização em grafos

Vale (2007) desenvolveu uma metodologia para complementação automática dos resultados gerados pela metodologia de extração de segmentos de rodovia brevemente descrita na subseção 2.2.2.1. É necessário reconstruir as conexões entre segmentos de rodovia tanto ao longo das rodovias quanto nos cruzamentos delas. O grande problema neste contexto é como ordenar topologicamente os segmentos de rodovia, visto que não se sabe quais segmentos compõem cada rodovia. Além disso, os falsos positivos têm que ser detectados e eliminados. No final, deve-se ter somente a malha viária acuradamente representada, tanto do ponto de vista geométrico quanto topológico.

A metodologia proposta por Vale (2007) para resolver este problema pode ser dividida em três etapas:

1. **Ordenação lógica de segmentos que compõem cada rodovia por meio de uma estratégia de otimização em grafo:** consiste em determinar a seqüência e orientação dos segmentos de rodovia que compõem as rodovias e a eliminação dos falsos positivos;
2. **Reconstrução dos falsos negativos:** Objetos tais como edificações, árvores e sombras, influenciam o processo de extração de segmentos de rodovia. Dessa forma, o processo de extração falha, deixando

lacunas (falsos negativos). Assim, como a etapa 1 identifica os segmentos vizinhos ao longo de cada lacuna, basta substituir as lacunas por segmentos de rodovia compatíveis geometricamente com os segmentos de rodovia vizinhos às lacunas.

3. **Reconhecimento e delineamento dos cruzamentos entre as rodovias reconstruídas:** com o término da segunda etapa, cada rodovia será inteiramente representada por segmentos de rodovia, originais e reconstruídos. Estes segmentos de rodovia são utilizados para identificar e delinear os cruzamentos entre rodovias.



Figura 12 – Malha viária extraída automaticamente.

A figura 12 mostra um exemplo de resultado obtido pela metodologia automática de extração da malha viária. Pode-se observar que a malha viária composta pelas rodovias principais foi corretamente extraída.

2.2.3 Extração automática de rodovias usando dados externos

Em Silva (2005) foi proposta uma solução para o problema de extração automática da malha viária georreferenciada em imagens aéreas digitais. O método baseia-se em duas etapas, isto é: 1- Extração automática de rodovias georreferenciadas; e 2- Análise de consistência das rodovias extraídas. Na primeira etapa, a metodologia para a extração de rodovias baseada no algoritmo de programação dinâmica, descrita na subseção 2.1.2.1, é utilizada para extrair automaticamente rodovias georreferenciadas a partir de imagens atuais. Nesta etapa, o método é inicializado a partir da projeção de pontos salientes para o espaço imagem, os quais foram extraídos automaticamente ao longo das rodovias georreferenciadas. Estes pontos descrevem grosseiramente a forma, a posição e a topologia das rodovias georreferenciadas. Além disso, a precisão dos pontos salientes transformados para o espaço imagem é também estimada, o que possibilita a definição automática das janelas de busca utilizadas pelo algoritmo de programação dinâmica. A análise de consistência das rodovias extraídas baseia-se num modelo de erro que permite concluir estatisticamente se as rodovias extraídas não discrepam significativamente das correspondentes projetadas na imagem. A figura 13 mostra um exemplo da aplicação desta metodologia a uma imagem de alta-resolução. Nesta figura são apresentadas algumas janelas recortadas na imagem original.

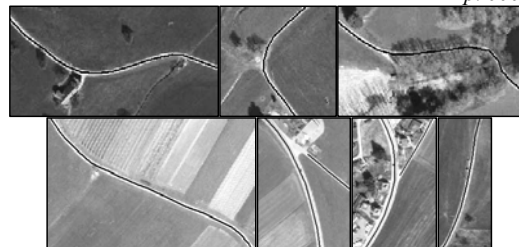


Figura 13 - Exemplo de resultado obtido com a metodologia de extração de rodovias georreferenciadas.

Embora a aplicação principal da metodologia seja no contexto de atualização automática da malha viária, vale ressaltar que esta metodologia pode também ser aplicada na atualização geométrica e na correção de erros sistemáticos de base de dados de rodovias. A atualização geométrica se refere ao processo de gerar automaticamente uma malha viária em escala maior que uma preexistente, a partir desta e de uma ou mais imagens digitais em escala adequada.

3 METODOLOGIA PARA A EXTRAÇÃO DE CONTORNOS DE TELHADOS

As metodologias existentes para a extração de edifícios podem ser classificadas de acordo com o tipo de dado de entrada (Rutzinger et al., 2006). Três grupos podem ser identificados de acordo com os seguintes dados de entrada: 1) malha irregular de pontos LiDAR; 2) malha regular (MDE) gerada pela regularização de dados LiDAR; e 3) dados LiDAR combinados com dados de outros sensores ou com dados georreferenciados. A seguir são apresentadas duas metodologias associadas com a primeira e terceira categoria.

3.1 Metodologia para a extração de contornos de edifícios usando dados LiDAR

Galvanin (2007) desenvolveu uma metodologia para extração automática de contornos de telhado de edifícios utilizando dados de varredura a laser. A metodologia baseia-se em duas etapas principais:

1. **Extração de regiões altas (edifícios, árvores etc.) de um MDE gerado a partir dos dados laser:** Nesta etapa são utilizadas as técnicas de divisão recursiva, via estrutura *quadtree* e de fusão Bayesiana de regiões considerando um MRF (*Markov Random Field*). Inicialmente a técnica de divisão recursiva é usada para particionar o MDE em regiões homogêneas. No entanto, devido a ligeiras diferenças de altura no MDE, nesta etapa a fragmentação das regiões pode ser relativamente alta. Para minimizar essa fragmentação, a técnica de fusão Bayesiana de regiões é aplicada nos dados segmentados. Utiliza-se para tanto um modelo hierárquico, cujas alturas médias das regiões dependem de uma média geral e de um efeito aleatório, que incorpora a relação de vizinhança entre elas. A distribuição a priori para o

efeito aleatório é especificada como um modelo condicional auto-regressivo (CAR). As distribuições a posteriori para os parâmetros de interesse foram obtidas utilizando o Amostrador de Gibbs.

2. **Extração das regiões altas que correspondem a contornos de telhados:** Esta etapa da metodologia consiste na separação dos telhados entre os objetos altos extraídos na primeira etapa da metodologia. As regiões altas são agora estruturadas segundo um RAG (*Region Adjacency Graph*), onde cada nó do RAG corresponde a uma região alta. Nesta etapa é utilizada uma abordagem baseada em MRF. Essa modelagem deve propiciar a obtenção apenas dos contornos correspondentes aos telhados. A análise de cada região, dadas as medidas de alguns atributos (por exemplo, área, retangularidade, ângulos entre eixos principais de objetos) realizadas nas regiões do MDE, por hipótese obedece a um MRF. Assim, a construção do MRF envolve a definição de uma função de energia apropriada e o problema de análise é resolvido a partir da estimativa MAP (*Maximum a posteriori*), via algoritmo *Simulated Annealing* (SA). A partir do conhecimento a priori do objeto de interesse é possível realizar a extração automática de contornos de telhados.

A figura 14 mostra um resultado envolvendo um edifício de relativa complexidade. A figura 14(a) é uma imagem de intensidade, cuja função é apenas a de permitir a visualização da área teste, visto que toda análise é feita no MDE. A figura 14(b) mostra o resultado obtido.

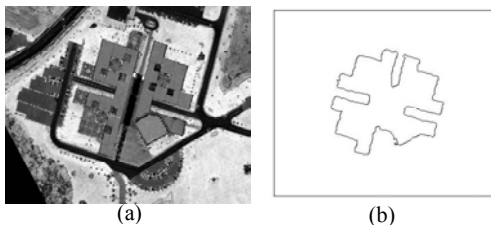


Figura 14 - Exemplo de resultado de extração de edifícios a partir de dados LiDAR. (a) Imagem de intensidade; e (b) Resultado.

3.2 Metodologia para a extração de contornos de edifícios combinando dados LiDAR e de imagem

Dal Poz (2008) desenvolveu uma metodologia para o refinamento geométrico de contornos de telhados extraídos de dados LiDAR, usando imagens aéreas de alta resolução e modelos MRF.

Como mostra a figura 15, a metodologia proposta compreende o registro de contornos de telhados na imagem, a extração de feições retas vizinhas dos contornos de telhados projetados, o estabelecimento da função de energia $U(x)$ tendo por base o modelo MRF, a otimização da função de energia para gerar agrupamentos de feições retas representando segmentos isolados de telhados no espaço imagem e a complementação dos agrupamentos de feições retas detectadas para reconstruir

os contornos refinados de telhados no espaço imagem. Estes procedimentos formam o corpo principal da metodologia proposta.

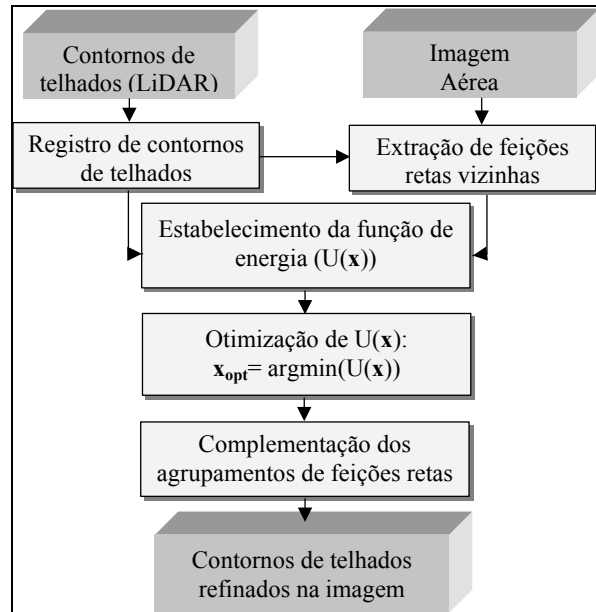


Figura 15 – Metodologia desenvolvida.

Os contornos 3D de telhados de edifícios e os parâmetros de orientação exterior podem ser vistos como dados de entrada ou, opcionalmente, como dados resultantes de procedimentos metodológicos intermediários.

A projeção ou o registro de contornos de telhados no espaço imagem e a extração de feições retas ao redor dos contornos de telhados projetados são etapas de pré-processamento. Supõe-se que os contornos de telhados 3D e os parâmetros de orientação da imagem estão, de uma forma ou de outra, disponíveis. O primeiro passo consiste em transformar os vértices 3D dos contornos de telhados no sistema de coordenadas de imagem (LC) através de técnicas fotogramétricas convencionais. No segundo passo, as feições retas são extraídas aplicando-se sequencialmente o detector de bordas de Canny, um algoritmo perseguidor de bordas na imagem de bordas e o algoritmo de poligonização por divisão recursiva. As feições retas são extraídas no entorno dos contornos de telhados. As feições retas são usadas para construir um modelo MRF expressando formas de telhados de edifícios, tendo por referência os contornos projetados de telhados. A função de energia associada é otimizada através de um método modificado de enumeração exaustiva. O último passo consiste em reconstruir a topologia dos agrupamentos, possibilitando a geração de contornos refinados de telhados no espaço imagem.

A figura 16 (b) mostra o resultado do refinamento do contorno de telhado extraído de dados LiDAR (figura 16 (a)). Em geral, uma melhoria significativa na geometria do contorno foi obtida.

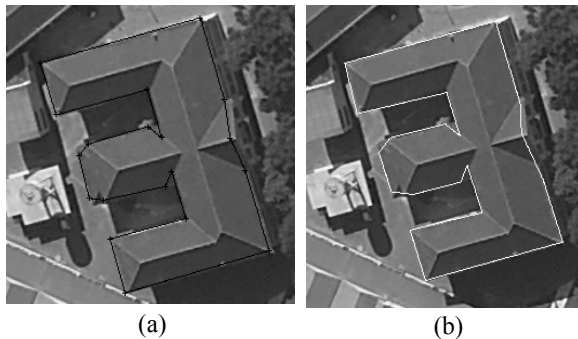


Figura 16 – Exemplo de resultado. (a) Contorno extraído de dados LiDAR e projetado na imagem; e (b) Contorno de telhado refinado com dados da imagem.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma visão geral das principais metodologias desenvolvidas no PPGCC para a extração de rodovias e edifícios a partir de dados de alta resolução. A percepção atual sobre o estágio de desenvolvimento de metodologias para a extração algorítmica de objetos cartográficos, é de que ainda não se chegou a soluções que possam claramente substituir os correspondentes procedimentos manuais. Portanto, é provável que o problema de extração automática de feições ainda permaneça, por um bom número de anos, como um dos grandes desafios a resolver em Fotogrametria. A tendência atual das atividades em nosso grupo é a de incrementar as pesquisas para extração da malha viária e de edifício combinando de dados de vários sensores, incluindo dados LiDAR e imagens multiespectrais, aéreas e de satélite.

AGRADECIMENTOS

Todas as pesquisas desenvolvidas contaram com apoio fundamental da FAPESP, CNPq e CAPES. Ressalta-se também o apoio do Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da FCT/UNESP.

REFERÊNCIAS

BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer vision**. Englewood Cliffs, Prentice-Hall, 1982.

DAL POZ, A. P. **Integração de dados laser e de imagem para a extração de contornos de telhados usando uma abordagem bayesiana**. Relatório CNPq de pós-doutorado no exterior realizado no Depto. de Engenharia Geomática da Universidade de Calgary, Calgary-AB, Canadá, 2008, 100p.

DAL POZ, A. P.; GYFTAKIS, S.; AGOURIS, P. **Semi-Automated Road Extraction: Comparison of Methodologies and Experiments**. In: **ASPRS Annual Conference**, Washington-DC, EUA, CD-ROM, 2000.

DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. Road segment delineation using active testing principle and an edge-based post-processing strategy. **Journal of Geomatics**, v. 57, n. 4, p. 399-410, 2003.

DAL POZ, A. P.; VALE, G. M.; ZANIN, R. B. Automated road segment extraction by grouping road objects. In: **XXTH ISPRS Congress**, v. 34, Istanbul, Turquia. p. 436-439, 2004..

DAL POZ, A. P.; ZANIN, R. B.; VALE, G. M.. Automated Extraction of Road Network from Medium- and High-resolution Images. **Pattern recognition and image analysis**, v. 16, n. 2, p. 239-248, 2006.

GALLIS, R. B. A. **Extração semi-automática da malha viária em imagens aéreas digitais de áreas rurais utilizando otimização por programação dinâmica no espaço objeto**. 2006. 177p. Tese de Doutorado - FCT/Unesp, Presidente Prudente-SP.

GALVANIN, E. A. S. **Extração automática de contornos de telhados de edifícios em um modelo digital de elevação, utilizando inferência bayesiana e campos aleatórios de Markov**. 2007. 165p. Tese de Doutorado - FCT/Unesp, Presidente Prudente-SP.

ISHIBASHI, R. **Extração de segmentos de rodovia em imagens de resoluções variadas usando o princípio de bordas paralelas**. 2008. 134p. Dissertação de Mestrado - FCT/Unesp, Presidente Prudente-SP.

JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B. G. **Machine Vision**. MIT Press and McGraw-Hill, 1995.

Mendes, T. S. G. **Extração Semi-automática de Feições em Imagens Digitais Usando Técnicas de Correlação e o Princípio de Teste Ativo**. 2005. 107p. Dissertação de Mestrado - FCT/Unesp, Presidente Prudente-SP.

RUTZINGER, M.; HÖFLE, B.; GEIST, T.; STÖTTER, J. Object-based building detection based on airborne laser scanning with GRASS GIS environment. In: **UDMS 2006**, Aalborg, Dinamarca, CD-ROM, 2006.

SILVA, M. A. O. **Verificação Automática da Malha Viária Georreferenciada em Imagens Digitais**. 2005. 114p. Dissertação de Mestrado - FCT/Unesp, Presidente Prudente-SP.

VALE, G. M. **Complementação automática da malha viária rural e suburbana usando uma estratégia de otimização global**. 140p. 2007. Tese de Doutorado - FCT/Unesp, Presidente Prudente-SP.

VALE, G. M. **Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica**. 2003. 115p. Dissertação de Mestrado - FCT/Unesp, Presidente Prudente-SP.