

EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE RODOVIAS GEORREFERENCIADAS EM IMAGENS DIGITAIS

Marco Aurélio Oliveira da Silva¹
Aluir Porfírio Dal Poz²

¹ Universidade Estadual Paulista – Unesp – Mestrando do Programa de Pós Graduação em Ciências Cartográficas – mac_aurelio@pos.prudente.unesp.br

² Universidade Estadual Paulista – Unesp – Departamento de Cartografia – aluir@prudente.unesp.br

RESUMO

Este artigo apresenta uma metodologia para a extração automática de rodovias georreferenciadas, preexistentes em mapas digitais ou base de dados. A metodologia proposta baseia-se em duas etapas principais. Na primeira etapa, pontos salientes que descrevem a forma e a posição das rodovias georreferenciadas, bem como sua topologia, são extraídos automaticamente e transformados para o espaço imagem através das equações de colinearidade. A precisão dos pontos transformados para o espaço imagem é também estimada, haja visto sua importância na definição automática de alguns parâmetros do algoritmo de programação dinâmica. Na segunda etapa, os pontos salientes projetados na imagem são organizados para construir linhas poligonais descrevendo aproximadamente as rodovias, a partir das quais as rodovias são extraídas iterativamente. Em cada iteração, primeiramente novos vértices são interpolados linearmente entre os pares de vértices preexistentes das linhas poligonais e, após, estas são refinadas através do algoritmo de programação dinâmica. O processo converge quando os novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento das linhas poligonais descrevendo as rodovias. Os resultados obtidos mostram que o método é promissor, sendo que os eixos de rodovia são geralmente extraídos acuradamente.

Palavras-chave: Programação Dinâmica, Rodovias Georreferenciadas, Extração de Rodovias

AUTOMATED EXTRACTION OF GEOREFERENCED ROADS

ABSTRACT

This paper presents a methodology for the automatic georeferenced road extraction, pre-existent either in digital maps or data base. The proposed methodology is based on two main stages. In the first stage, salient points describing the shape and the position of the georeferenced roads, as well as your topology, are automatically extracted and transformed into image space by the collinearity equations. The precision of the points transformed into image space is also computed. The precision of the transformed points allows the automatic definition of some parameters of the dynamic programming algorithm. In the second stage, the salient points projected onto image are organized to build polygons coarsely describing the roads, from which the roads are iteratively extracted. In each iteration, firstly new vertices are linearly interpolated between the pair of pre-existent vertices of the polygons. The resulting polygons are refined by the dynamic programming algorithm. The process converges when the new inserted vertices do not contribute anymore with the refinement of the polygons describing the roads. The obtained results show that the method is promising, as the road axes are usually extracted accurately.

Keywords: *Dinamic Programming, Georeferenced Roads, Road Extraction*

1. INTRODUÇÃO

Tradicionalmente, a aquisição de dados espaciais para mapeamento e implementação ou atualização de SIG, vem sendo realizada por Fotogrametria (SOWMYA e TRINDER, 2000). No entanto, os processos fotogramétricos envolvidos, quando realizados manualmente, são extremamente morosos e trabalhosos, além de necessitar de um profissional especializado.

Com o advento de imagens no formato digital, pesquisadores das áreas de Fotogrametria e Visão Computacional têm se empenhado para a automação destes processos. As tarefas de caráter mais

geométrico, tais como, medição automática das marcas fiduciais e identificação automática de pontos homólogos, já se encontram operacionais em sistemas fotogramétricos digitais (AMINI et al., 2002; SILVA e DAL POZ, 2003). Tais operações possibilitaram a automação dos processos de orientação interior, orientação relativa, geração de MDT (Modelo Digital do Terreno), geração de ortofoto digital e identificação de pontos de passagem na fototriangulação. O mesmo avanço, ainda não foi obtido para as tarefas de caráter semântico, como a aquisição de informações espaciais. A fim de reduzir a complexidade, o processo de extração de feições é subdividido numa série de problemas específicos, como a extração de feições antrópicas (construções, rodovias, etc.) e feições naturais (vegetação, água, etc.). Mesmo assim, a necessidade de interpretação (reconhecimento) dos objetos na imagem, problema difícil de ser resolvido computacionalmente, é o principal obstáculo que dificulta a automação deste processo. Conseqüentemente, grande parte da pesquisa tem se dirigido às soluções semi-automáticas. Nestas soluções, o processo de aquisição de dados espaciais é dividido em duas etapas básicas, isto é: 1- reconhecimento do objeto, resolvido por um operador humano; e 2- delineamento da feição, resolvido automaticamente pelo algoritmo computacional.

Uma solução recente que tem surgido para auxiliar na automação do processo de extração de feições é a incorporação de informação georreferenciada a priori no modelo de extração. Esta informação corresponde aos dados georreferenciados obtidos de mapas digitais ou base de dados (GERKE et al., 2004; WILLRICH, 2002).

Particularizando o processo de extração de feições ao problema de extração de rodovias, pesquisas vêm sendo realizadas desde o início da década de setenta. Trabalhos pioneiros nesta área são apresentados em Bajcsy e Tavakoli (1976) e Quam (1978). As metodologias desenvolvidas podem ser classificadas de acordo com a necessidade ou não de interação do processo de extração com um operador humano, dando origem aos métodos automáticos e semi-automáticos (AMINI et al., 2002; BAUMGARTNER et al., 1999; DAL POZ e SILVA, 2002; LAPTEV et al., 2000; MENA, 2003).

Nas metodologias semi-automáticas o reconhecimento do objeto é realizado por um operador humano, através da definição de alguns pontos sementes, e as operações de cálculo ficam a cargo do computador. É possível identificar dois esquemas básicos de extração semi-automática de rodovias. Num primeiro, o operador necessita fornecer a posição e a direção da rodovia em um ponto inicial, a partir do qual o restante da rodovia é extraída. No geral, os algoritmos empregados baseiam-se na análise de perfis extraídos transversalmente ao eixo da rodovia (QUAM, 1978; VOSSELMAN e DE KNECHT, 1995), na análise de bordas anti-paralelas (NEVATIA e BABU, 1980; SILVA e DAL POZ, 2001; DAL POZ et al., 2000) e em teste ativo (GEMAN e JEDYNAK, 1996; DAL POZ e SILVA, 2003). Num segundo, o operador necessita fornecer alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. A linha poligonal inicial descrita pelos pontos sementes é refinada através de algoritmos baseados na otimização global por programação dinâmica (PD) (GRUEN e LI, 1997; DAL POZ, 2001a; VALE e DAL POZ, 2003), em *snakes* (KASS et al., 1987; GRUEN e LI, 1997; DAL POZ et al., 2000) e em redes neurais (DOUCETTE et al., 2001). Geralmente, nestas metodologias apenas informações geométricas e radiométricas de rodovias são incorporadas.

Para o problema ser resolvido automaticamente modelos bem mais complexos devem ser desenvolvidos. Neste caso, informações contextuais de rodovia também deverão ser consideradas. Um exemplo sofisticado é encontrado em Baumgartner et al. (1999), em que contexto, técnicas de agrupamento perceptivo e diferentes resoluções são usados para extrair a malha em imagens de alta resolução. Um método específico para imagens de baixa resolução é descrito em Wang e Trinder (2000). Em Dal Poz (2003) é apresentado um método automático para a extração de segmentos de rodovias em imagens de média e alta resolução de cenas rurais. Os segmentos de rodovia são extraídos a partir de quatro objetos semânticos, os quais representam localmente um fragmento aproximadamente reto de rodovia, e de um conjunto de regras para a conexão entre eles. No final do processo, cada segmento de rodovia é representado por uma seqüência de objetos semânticos justapostos.

Este trabalho propõe a extração automática de rodovias em imagens digitais, tendo por base o algoritmo de otimização de PD (DAL POZ, 2001a; VALE e DAL POZ, 2003) e dados externos provenientes de mapas digitais ou base de dados cartográficos, na forma de rodovias georreferenciadas. São duas as motivações para pesquisar uma solução desse tipo: 1- sua aplicação potencial na detecção automática de alterações; e 2- sua aplicação no refinamento geométrico de rodovias georreferenciadas.

A extração de rodovias georreferenciadas a partir do algoritmo de PD é apresentada na seção 2. Os resultados preliminares obtidos são apresentados na seção 3. A seção 4 finaliza o artigo com as principais conclusões.

2. EXTRAÇÃO AUTOMÁTICA DE RODOVIAS GEORREFERENCIADAS EM IMAGENS DIGITAIS

2.1 CONSIDERAÇÕES INICIAIS

O método de extração de rodovias usando PD consiste em resolver um modelo de rodovia através de uma estratégia de otimização global envolvendo o algoritmo de PD (DAL POZ et al., 2000).

Duas etapas básicas podem ser definidas para o processo de extração, isto é, a inicialização (ou reconhecimento) e o delineamento. Como o objetivo do método é a extração de rodovias, o processo de inicialização visa a identificação das rodovias a serem extraídas na imagem. A extração propriamente dita das feições identificadas é responsabilidade do processo de delineamento, o qual é realizado automaticamente.

Embora trate de uma metodologia desenvolvida originalmente para a extração semi-automática de rodovias, a inicialização pode ser semi-automática ou automática. No processo semi-automático, a inicialização é conduzida por um operador humano através da definição de alguns pontos sementes descrevendo as rodovias de forma grosseira. No processo de inicialização automática, os pontos sementes podem ser obtidos automaticamente (ZLOTNICK e CARNINE, 1992), a partir de fragmentos desconectados de rodovias extraídos automaticamente (BAUMGARTNER et al., 1999; DAL POZ, 2003), ou a partir de rodovias georreferenciadas presentes em base de dados ou mapas digitais (DAL POZ, 2001b; GERKE et al., 2004). Neste último caso, as rodovias georreferenciadas são utilizadas para os problemas de verificação e atualização automática da malha viária em imagens digitais.

A identificação automática de pontos sementes permite o desenvolvimento de métodos automáticos com a concepção de metodologias semi-automáticas. Neste caso, o processo de extração de rodovias, embora automático, é obtido através dos processos de inicialização e delineamento realizados independentemente.

Independentemente da forma com que os pontos sementes são obtidos, estes definem uma linha poligonal inicial a ser refinada através de uma estratégia iterativa. Em cada iteração, novos vértices aproximados são interpolados linearmente entre os pares de vértices preexistentes. A linha poligonal resultante é então refinada resolvendo o modelo de rodovia (geral ou modificado) através de PD. O processo converge quando os novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal descrevendo a rodovia.

2.2 MODELO DE RODOVIA

Conforme apresentado em Dal Poz et al. (2000), o modelo genérico de rodovia é formulado levando em conta propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia. Considerando que uma rodovia pode ser representada (Figura 1) por uma linha poligonal $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde $p_i = (x_i, y_i)$ é o i -ésimo vértice, o seguinte par de equações pode ser usado para modelar a entidade rodovia (DAL POZ et al., 2000),

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((Ep_1 - \beta \cdot Ep_2 + \gamma \cdot Ep_3) \cdot [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta S_i) = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (1)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, \quad i = 1, K, n-1 \quad (2)$$

onde:

- E : função objetivo (Equação 1), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) da linha poligonal que representa a rodovia;
- C_i : devido a sua definição (Equação 2), também é denominado injunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_i < T$;
- Ep_1, Ep_2 e Ep_3 : funções que modelam as propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$: ângulo de deflexão no vértice i (Figura 1);
- ΔS_i : distância entre os vértices $i-1$ e i (Figura 1); e
- β e γ : constantes positivas.

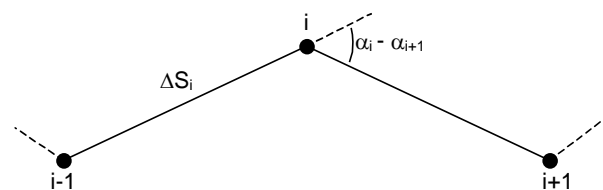


Figura 1 – Linha Poligonal representando a rodovia.

Como mostra a Equação 1, a função objetivo pode ser decomposta numa seqüência de funções dependendo apenas de três vértices sucessivos da linha poligonal representando a rodovia. Dessa

forma, apenas 6 variáveis (coordenadas cartesianas da terna p_{i-1} , p_i e p_{i+1}) da função objetivo estão relacionadas simultaneamente. É nesse caso que o algoritmo de programação dinâmica torna-se o mais indicado para resolver eficientemente o problema inerente de otimização (BALLARD e BROWN, 1982). A solução corresponde a uma linha poligonal representando a rodovia e é tal que maximiza a função objetivo. Cabe ressaltar que quando a imagem utilizada é de média ou de alta resolução, a rodovia extraída, geralmente, não corresponde exatamente ao eixo da rodovia.

Vale (2003) e Vale e Dal Poz (2003) resolveram este problema através de uma modificação no modelo de rodovia (função objetivo (Equação 1)), a fim de que o mesmo venha incorporar informações de borda. O princípio de bordas anti-paralelas (NEVATIA e BABU, 1980) é o princípio teórico básico para a definição do modelo de rodovia modificado. Segundo este princípio, nos pontos mais representativos das regiões de borda de rodovia, os vetores do gradiente são aproximadamente paralelos e de mesmo sentido para a mesma borda e aproximadamente paralelos e de sentido contrário para bordas opostas, sendo, também, em ambos os casos, aproximadamente ortogonais ao eixo da rodovia.

Vale e Dal Poz (2003) demonstraram que a função objetivo passa a ter a forma:

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

onde, w_i é a largura local da rodovia no ponto p_i .

Portanto, o número de incógnitas interrelacionadas simultaneamente na função objetivo modificada é sete, contra seis da versão original do método.

2.3 Solução para o Modelo de Rodovia Usando o Algoritmo de PD

A Figura 2 ilustra o princípio geral para a extração de rodovias através do algoritmo de otimização por PD. Devido à limitação de espaço e, também, à complexidade matemática inerente, não é possível descrever aqui o algoritmo de PD. Dessa forma, remete-se o assunto para a literatura específica, como Ballard e Brown (1982).

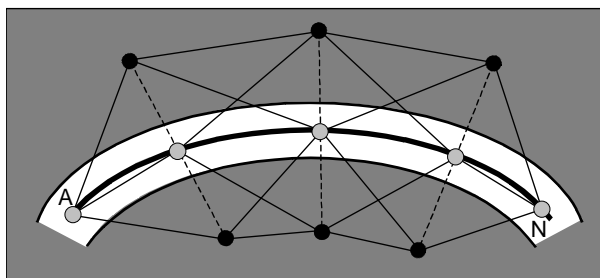


Figura 2 – Princípio do método.
Fonte: DAL POZ e AGOURIS (2000).

Como mostra a Figura 2, a rodovia a ser extraída pode ser descrita por uma linha poligonal de n vértices, sendo que, nem todos estão interrelacionados simultaneamente. Nesse caso, como já foi dito anteriormente, o algoritmo de PD é eficiente para resolver o problema de otimização.

O problema apresentado na Figura 2 consiste em encontrar o caminho ótimo entre os pontos A e N.

Os vértices definidores do caminho ótimo maximizam a função objetivo E (Equação 1 ou 3) e obedecem a injunção de desigualdade (Equação 2). No entanto, para a definição destes vértices, uma série de combinações são geradas e analisadas previamente a partir das posições aproximadas de cada vértice (pontos pretos na Figura 2).

As posições aproximadas são dadas pelas posições de pontos reamostrados ao longo de janelas de busca (linhas tracejadas na Figura 2), transversais ao eixo atual de rodovia. A linha poligonal inicial descrita pelos pontos sementes consiste no eixo atual de rodovia no início do processo de extração. A linha poligonal refinada nas demais iterações definem o eixo atual de rodovia para a iteração i , e assim por diante.

As janelas de busca são, então, estabelecidas em todos os pontos que definem o eixo atual de rodovia e as posições dos pontos desta janela são reamostradas como segue:

$$\begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_j = k \cdot r \cdot \begin{bmatrix} -b \\ a \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix}_p \quad (4)$$

no qual,

- $(x, y)_j$: coordenadas calculadas de pontos da janela de busca;
- $(x, y)_P$: coordenadas de um dado ponto P pertencente ao eixo atual de rodovia;
- k: varia de 1, ..., $\text{int}(m/r)$ para um lado da rodovia e de $-1, \dots, -\text{int}(m/r)$ para o outro lado da rodovia;
- m: dimensão da janela de busca para cada lado da rodovia;
- r: resolução da janela de busca. A fim de possibilitar uma precisão *sub-pixel*, esse valor é geralmente menor que 1 *pixel*; e
- $\hat{n}_o = (-b \ a)$: vetor normalizado perpendicular ao eixo atual de rodovia no ponto P.

O valor de m define o tamanho do espaço de busca em cada janela. Desta forma, defini-lo grande implica em uma grande quantidade de pontos a serem analisados. Dessa forma, um grande esforço computacional será exigido. Sendo n o número de vértices e n_p o número de possibilidades que cada vértice pode assumir dentro da janela de busca (Equação 5), o esforço computacional será da ordem de $O(n \cdot n_p^3)$ (GRUEN e LI, 1997). Portanto, a definição do parâmetro m é importante para evitar um grande esforço computacional e, ao mesmo tempo, garantir a convergência do algoritmo de PD.

$$n_p = \left[2 \cdot \text{int} \left(\frac{m}{r} \right) \right] + 1 \quad (5)$$

Várias estratégias podem ser definidas para a determinação do valor de m. Em Silva (2001), o valor de m é estabelecido como sendo igual a largura da rodovia (w) com 20% de tolerância, ou seja, $1,2w$. Uma outra estratégia que pode ser estabelecida consiste na definição de m em intervalos diferentes. Como o processo de extração é iterativo, a linha poligonal inicial é sucessivamente refinada. Portanto, intervalos com um maior valor de m são dados no início (por exemplo, m igual a $4w$), permitindo a obtenção de um grande raio de convergência. O valor de m vai sendo diminuído à medida que o eixo de rodovia vai sendo refinado.

Tais estratégias são características do processo de extração de rodovias não georreferenciadas, ou seja, nenhuma informação a priori das rodovias é conhecida, a não ser poucos pontos sementes. Quando da extração de rodovias georreferenciadas, problema típico dos processos de verificação e atualização automática da malha viária, as incertezas das rodovias existentes em uma base de dados ou mapa digital, podem ser utilizadas para a definição do valor m.

Assumindo que o nível de incerteza das rodovias georreferenciadas é de 0,3% (isto é, certeza de 99,7%), o valor de m é dado por:

$$m = 2,965 \cdot \sigma \cong 3 \cdot \sigma \quad (6)$$

no qual, σ consiste no desvio-padrão de um ponto georreferenciado do eixo de rodovia no espaço imagem. Em outras palavras, os pontos dos eixos de rodovias presentes na imagem estão, na hipótese de ausência de erros sistemáticos, em 99,7% das vezes a uma distância máxima de 3σ dos correspondentes pontos projetados a partir das rodovias georreferenciadas.

Como será mostrado mais adiante, o valor de σ é obtido através do processo de propagação de covariância na transformação de pontos georreferenciados para o espaço imagem.

O princípio do processo de otimização usando PD é ilustrado na Figura 3. Inicialmente são fornecidos vários pontos sementes, cujas localização e distribuição são grosseiras (Figura 3(a)). Ligando-se estes pontos, obtém-se a primeira aproximação para a rodovia, ou também, o eixo atual de rodovia para o início do processo iterativo de otimização. Na primeira iteração, entre cada par de pontos sementes é inserido um novo ponto através de interpolação linear (Figura 3(b)). As linhas tracejadas representam as janelas de busca. O procedimento de otimização através da PD gera uma nova aproximação para a rodovia (Figura 3(c)). O mesmo procedimento é realizado nas demais iterações. O processo converge quando numa determinada iteração todos os novos pontos inseridos são colineares aos pontos otimizados na iteração anterior. O resultado após a convergência é ilustrado na Figura 3(d).

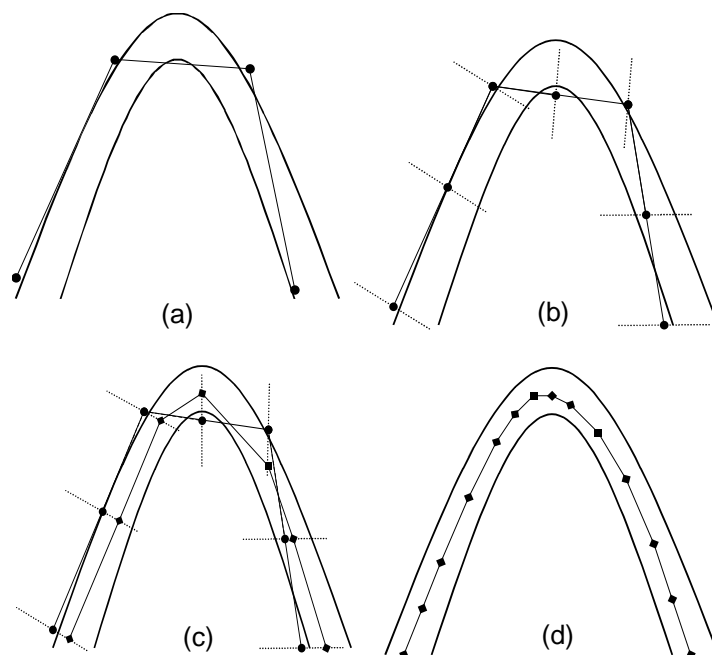


Figura 3 – Ilustração do processo de otimização. (a) Linha poligonal inicial; (b) Interpolação linear de novos vértices; (c) Resultado após a primeira otimização; e (d) Resultado após a convergência da otimização.

Fonte: DAL POZ e AGOURIS (2000).

2.4 Inicialização Automática do Processo de Extração de Rodovias Usando PD

O problema de inicialização automática do processo de extração é solucionado a partir de rodovias georreferenciadas presentes em mapas digitais ou base de dados. Neste caso, pontos que descrevem, acuradamente ou não, a forma e a posição das rodovias, bem como sua topologia, denominados pontos salientes, são extraídos automaticamente ao longo das rodovias georreferenciadas. Esses pontos são, então, transformados para o espaço imagem e os erros cometidos no processo de transformação são estimados. O acesso a precisão dos pontos transformados para o espaço imagem possibilita aumentar ainda mais o nível de automação do processo de extração, visto que, as dimensões das janelas de busca usadas no processo de otimização por PD são, também, determinadas automaticamente. Além disso, permite reduzir o custo computacional, visto que, tais informações possibilitam dimensionar adequadamente o espaço de busca.

Desta forma, o problema de inicialização automática pode ser dividido em três problemas secundários, isto é: 1- extração automática de pontos salientes; 2- transformação dos pontos salientes para o espaço imagem; e 3- propagação de covariância na transformação de pontos salientes para o espaço imagem.

Na seqüência são apresentadas as soluções para estes problemas.

2.4.1 Identificação Automática de Pontos Salientes

Os pontos salientes descrevem, geralmente de forma mais grosseira, a forma e a posição das rodovias georreferenciadas, bem como sua topologia. Dessa forma, para o caso da malha viária, dois grupos de pontos salientes são definidos. O primeiro grupo é formado pelos pontos de intersecção entre as rodovias. O segundo grupo é formado pelos pontos que descrevem grosseiramente a forma e a posição das rodovias georreferenciadas.

Os pontos salientes poderiam ser definidos pelos pontos de inflexão da curva definida pelos eixos de rodovias, e pelos pontos de rodovia mais distantes dos segmentos de reta definidos por pares de pontos de inflexão (Figura 4(a)). No entanto, a determinação numérica de pontos de inflexão a partir de uma curva digital não é geralmente um processo acurado. Uma outra possibilidade é a segmentação da curva representando a rodovia através de técnicas de poligonização, gerando uma linha poligonal que aproxima adequadamente a rodovia georreferenciada (Figura 4(b)). Além da fácil realização computacional destas técnicas, é possível saber qual é o máximo afastamento entre a curva original e a linha poligonal.

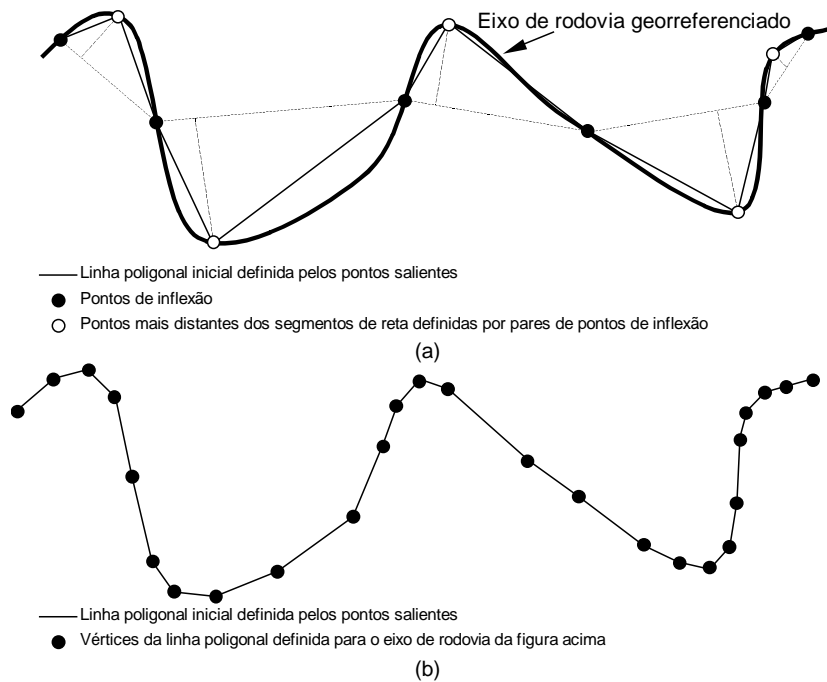


Figura 4 – Extração automática de pontos salientes a partir de rodovias georreferenciadas. (a) Pontos salientes definidos a partir dos pontos de inflexão para a curva definida pelo eixo de rodovia; e (b) Pontos salientes definidos pelos vértices da linha poligonal.

De acordo com Jain et al. (1995), uma linha poligonal consiste numa seqüência de segmentos de reta conectados. No problema de modelagem de contorno, uma linha poligonal modela uma lista de pontos com uma seqüência de segmentos de reta. As extremidades de cada segmento de reta são selecionadas numa lista de pontos de contorno e os vértices são definidos como sendo os pontos onde os segmentos de reta são conectados. Esta lista de pontos pode ser, por exemplo, uma cadeia de *pixels* conectados representando uma borda previamente extraída, como também, uma lista de pontos representando um eixo de rodovia (georreferenciado ou não).

A Figura 5 ilustra o processo de geração de uma linha poligonal por divisão recursiva. O princípio baseia-se na adição de vértices recursivamente a partir de uma aproximação inicial da linha poligonal (JAIN et. al, 1995).

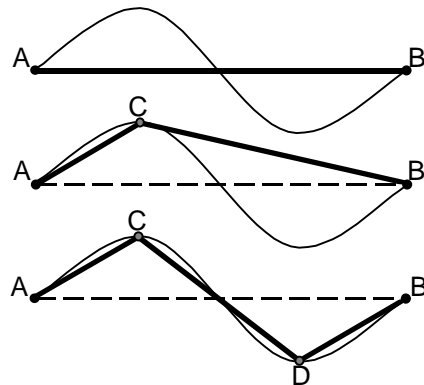


Figura 5 – Método de divisão recursiva.
Fonte: JAIN et al. (1995).

Considerando a curva mostrada na Figura 5, a aproximação inicial para a linha poligonal é o segmento de reta entre o primeiro e o último ponto da curva, indicados como A e B. Um vértice é inserido no ponto da curva mais afastado do segmento de reta, indicado como ponto C, desde que este afastamento esteja acima de um limiar pré-estabelecido (L). Desse modo, o algoritmo é aplicado recursivamente nos dois novos segmentos de reta e nos dois respectivos segmentos de curva (curvas AC e CB). Os pontos das curvas AC e CB mais afastados são encontrados e novos vértices são introduzidos, desde que atendam ao critério de afastamento mínimo. O algoritmo é encerrado quando não é possível introduzir novos vértices. É interessante ressaltar ainda que, quanto menor o valor de L, mais fiel será a representação da curva através da linha poligonal. Os pontos resultantes desse processo são denominados pontos salientes da curva. Neste caso, a curva representa uma rodovia georreferenciada. Como a linha poligonal resultante não necessita modelar acuradamente o eixo de

rodovia, um alto valor para L pode ser adotado, ficando poucos pontos salientes na linha poligonal resultante. A altura h para cada ponto saliente (x, y) é interpolada a partir das informações georreferenciadas.

2.4.2 Transformação de Pontos Salientes para o Espaço Imagem

Essa etapa é obtida a partir da transformação de pontos no sistema de projeção UTM com altura ortométrica (E, N, h) para o sistema digital da imagem (c, l).

A transformação requer uma série de transformações intermediárias entre sistemas do espaço objeto e, também, entre referenciais do espaço imagem. A Equação (7) apresenta um modelo global para a transformação de coordenadas UTM em digitais. A definição de um modelo matemático rigoroso requer que os efeitos provenientes do processo imageamento, tais como, distorção das lentes, refração atmosférica e, no caso de fotografias digitalizadas, deformação do filme, sejam considerados. Para tanto, as coordenadas oriundas de pontos do espaço objeto devem ser contaminadas por tais efeitos para localização acurada dos pontos correspondentes no sistema digital, conforme mostra a Equação 7. Vale ressaltar que esta equação é usual para o caso de imagens digitais obtidas por digitalização de fotografias com 4 marcas fiduciais. Portanto, algumas adaptações devem ser feitas na Equação 7 para outros casos.

$$\begin{aligned} c &= a_1 \cdot (x_0 + x + d_x k + d_x P + d_x R) + a_2 \cdot (y_0 + y + d_y k + d_y P + d_y R) + a_3 \\ l &= a_4 \cdot (x_0 + x + d_x k + d_x P + d_x R) + a_5 \cdot (y_0 + y + d_y k + d_y P + d_y R) + a_6 \end{aligned} \quad (7)$$

onde:

- (c, l): coordenadas digitais;
- a_i : parâmetros da transformação Afim;
- (x_0, y_0) : coordenadas do ponto principal;
- $(d_x k, d_y k, d_x P, d_y P, d_x R, d_y R)$: parcelas de distorção radial, distorção descentrada e refração atmosférica, respectivamente. A magnitude de cada um destes erros é dada por:

$$d_x k = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot x \quad (8)$$

$$d_y k = (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot y$$

$$d_x P = P_1 \cdot (r^2 + 2 \cdot x^2) + 2 \cdot P_2 \cdot x \cdot y \quad (9)$$

$$d_y P = P_2 \cdot (r^2 + 2 \cdot y^2) + 2 \cdot P_1 \cdot x \cdot y$$

$$d_x R = x \cdot \frac{\Delta r}{r} \quad (10)$$

$$d_y R = y \cdot \frac{\Delta r}{r}$$

- (x, y) : coordenadas fotogramétricas dadas pelas Equações de colinearidade, ou seja:

$$\begin{aligned} x &= -f \cdot \frac{r_{11}(X_L - X_{CP}) + r_{12}(Y_L - Y_{CP}) + r_{13}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})} \\ y &= -f \cdot \frac{r_{21}(X_L - X_{CP}) + r_{22}(Y_L - Y_{CP}) + r_{23}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})} \end{aligned} \quad (11)$$

Na Equação (11) f representa a distância focal calibrada, r_{ij} representa os elementos da matriz de rotação determinados em função dos ângulos de orientação exterior (κ, ϕ, ω), (X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}) corresponde as coordenadas do centro perspectivo no espaço objeto referidas a um sistema local e (X_L, Y_L, Z_L) representam as coordenadas de um ponto qualquer no Sistema Geodésico Local. Como apresenta as Equações 12 e 13, tais coordenadas são obtidas em função das coordenadas UTM (E, N, h).

$$\begin{aligned} X_L &= \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta X - \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta Y \\ Y_L &= -\text{sen}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta X - \text{sen}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta Y + \text{cos}(\varphi_0) \cdot \Delta Z \\ Z_L &= \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta X + \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta Y + \text{sen}(\varphi_0) \cdot \Delta Z \end{aligned} \quad (12)$$

onde:

- $(\Delta X, \Delta Y, \Delta Z)$: representa o deslocamento entre os sistemas geodésico cartesiano e o sistema geodésico cartesiano local (Equação 13);

$$\begin{aligned}\Delta X &= \left[(N'+h) \cdot \cos(\varphi_1 + b_2 \cdot D^2 + b_4 \cdot D^4 + b_6 \cdot D^6) \cdot \cos(\lambda_{mc} + b_1 \cdot D + b_3 \cdot D^3 + b_5 \cdot D^5) \right] - \\ &\quad \left[(N'+h) \cdot \cos(\varphi_0) \cdot \cos(\lambda_0) \right] \\ \Delta Y &= \left[(N'+h) \cdot \cos(\varphi_1 + b_2 \cdot D^2 + b_4 \cdot D^4 + b_6 \cdot D^6) \cdot \text{sen}(\lambda_{mc} + b_1 \cdot D + b_3 \cdot D^3 + b_5 \cdot D^5) \right] - \\ &\quad \left[(N'+h) \cdot \cos(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \right] \\ \Delta Z &= \left[(1-e^2) \cdot N'+h \right] \cdot \text{sen}(\varphi_1 + b_2 \cdot D^2 + b_4 \cdot D^4 + b_6 \cdot D^6) - \left[(1-e^2) \cdot N'+h_0 \right] \cdot \text{sen}(\varphi_0) \\ D &= \frac{E - 500.000}{0,9996}\end{aligned}\tag{13}$$

Nas equações 12 e 13, λ_{mc} é a longitude do meridiano central, $(\varphi_0, \lambda_0, h_0)$ corresponde a origem do Sistema Geodésico Local, N' é o raio de curvatura da seção primeira vertical, φ_1 é a latitude correspondente ao comprimento do arco meridiano determinada iterativamente em função da componente N do sistema UTM, e b_i corresponde aos coeficientes determinados em função de φ_1 .

O modelo matemático apresentado (Equação 7) realiza a transformação de pontos do sistema de projeção UTM para o sistema de coordenadas digital. Para tanto, a imagem deverá estar orientada interior e exteriormente. O processo de orientação interior (inversa neste caso, visto que o objetivo é determinar pontos na imagem digital bruta) é conduzido a partir da determinação dos parâmetros de transformação entre os sistemas fiducial e digital, levando-se também em conta os erros sistemáticos provenientes do processo de imageamento. A orientação exterior da imagem pode ser obtida através do processo fotogramétrico de Resseção Espacial. Como a determinação das janelas de busca usadas pelo algoritmo de PD baseia-se no critério estatístico dado pela Equação 6, que por sua vez é dependente de uma estimativa realística de erros cometidos na transformação dada pela Equação 7, esta deve adequar-se rigorosamente à realidade física inerente.

Os pontos salientes transformados para o espaço imagem passam agora a ser denominados pontos sementes, visto que, são usados como informações iniciais para a etapa de delineamento das rodovias.

2.4.3 Propagação de Covariância na Transformação de Pontos Salientes para o Espaço Imagem

A propagação de covariância permite obter a matriz variância-covariância (MVC) de quantidades (ou variáveis) obtidas a partir de outras quantidades conhecidas, incluindo a respectiva MVC. Tendo em vista que este assunto é bastante comum na literatura de Teoria da Estimção (por exemplo: Wolf e Ghilani, 1997; Gemael, 1994), apresenta-se diretamente a aplicação da técnica na estimativa do erro de projeção relacionado com o modelo matemático de transformação (Equação 7). Tem-se dessa forma:

$$\sum_{cl} = D \cdot \sum_{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, \kappa, \phi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, E, N, h} \cdot D^T\tag{14}$$

onde:

- D (2×22): matriz Jacobiana composta das derivadas parciais da Equação 7 em relação aos parâmetros envolvidos ($a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, \kappa, \phi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, E, N, h$) ficando:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial C}{\partial a_1} & \frac{\partial C}{\partial a_2} & \frac{\partial C}{\partial a_3} & \frac{\partial C}{\partial a_4} & \frac{\partial C}{\partial a_5} & \frac{\partial C}{\partial a_6} & \frac{\partial C}{\partial x_0} & \frac{\partial C}{\partial y_0} & \frac{\partial C}{\partial k_1} & \frac{\partial C}{\partial k_2} & \frac{\partial C}{\partial k_3} & \frac{\partial C}{\partial L} \\ \frac{\partial L}{\partial a_1} & \frac{\partial L}{\partial a_2} & \frac{\partial L}{\partial a_3} & \frac{\partial L}{\partial a_4} & \frac{\partial L}{\partial a_5} & \frac{\partial L}{\partial a_6} & \frac{\partial L}{\partial x_0} & \frac{\partial L}{\partial y_0} & \frac{\partial L}{\partial k_1} & \frac{\partial L}{\partial k_2} & \frac{\partial L}{\partial k_3} & \frac{\partial L}{\partial L} \\ \frac{\partial C}{\partial P_1} & \frac{\partial C}{\partial P_2} & \frac{\partial C}{\partial \kappa} & \frac{\partial C}{\partial \phi} & \frac{\partial C}{\partial \omega} & \frac{\partial C}{\partial X_{CP}} & \frac{\partial C}{\partial Y_{CP}} & \frac{\partial C}{\partial Z_{CP}} & \frac{\partial C}{\partial E} & \frac{\partial C}{\partial N} & \frac{\partial C}{\partial H} \\ \frac{\partial L}{\partial P_1} & \frac{\partial L}{\partial P_2} & \frac{\partial L}{\partial \kappa} & \frac{\partial L}{\partial \phi} & \frac{\partial L}{\partial \omega} & \frac{\partial L}{\partial X_{CP}} & \frac{\partial L}{\partial Y_{CP}} & \frac{\partial L}{\partial Z_{CP}} & \frac{\partial L}{\partial E} & \frac{\partial L}{\partial N} & \frac{\partial L}{\partial H} \end{bmatrix}; e\tag{15}$$

- $\sum_{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6, x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2, \kappa, \phi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}, E, N, h}$ (22 x 22): MVC dos parâmetros envolvidos na Equação 7, dada por:

$$\Sigma = \begin{bmatrix} \sum_{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \sum_{x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \sum_{\kappa, \phi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \sum_{E, N, h} \end{bmatrix}. \quad (16)$$

Na MVC acima, tem-se ainda:

- $\sum_{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6}$ (6 x 6): MVC dos parâmetros da transformação afim, obtida no processo de ajustamento para a correção da deformação do filme;
- $\sum_{x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2}$ (7 x 7): MVC diagonal composta das variâncias dos parâmetros de calibração;
- $\sum_{\kappa, \phi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}}$ (6 x 6): MVC dos parâmetros de orientação exterior, obtida no processo de resseção espacial; e
- $\sum_{E, N, h}$ (3 x 3): MVC das coordenadas de um ponto da rodovia georreferenciada.

Devido a complexidade dos modelos matemáticos, as derivadas parciais $\frac{\partial C}{\partial E}, \frac{\partial C}{\partial N}, \frac{\partial C}{\partial H}, \frac{\partial L}{\partial E}, \frac{\partial L}{\partial N}, \frac{\partial L}{\partial H}$ podem ser mais facilmente determinadas por derivação numérica. As demais derivadas são facilmente obtidas na forma analítica.

A matriz \sum_{cl} (2 x 2) possui em sua diagonal as variâncias das coordenadas digitais de um dado ponto p(L, C) obtido pela Equação 7. Estas variâncias permitem: 1- definição automática da dimensão das janelas de busca, possibilitando garantir a convergência do processo de extração automática com um mínimo de esforço computacional; e 2- a verificação da malha viária, pois, tais informações possibilitam a realização de uma análise de consistência das rodovias georreferenciadas extraídas.

3. RESULTADOS E ANÁLISE

O método de extração de rodovias georreferenciadas usando PD encontra-se implementado em linguagem C++. As implementações originais resultam dos trabalhos desenvolvidos por DAL POZ (2000) e VALE (2003). O programa produzido compõe-se de dois módulos. No primeiro módulo, a função objetivo dada pela Equação 1 é utilizada. Neste caso, o processo de extração permite apenas a obtenção de um eixo de rodovia aproximado. No segundo módulo, a função objetivo utilizada é a dada pela Equação 3, a qual permite o refinamento do eixo de rodovia aproximado.

Os experimentos foram realizados a partir de rodovias georreferenciadas e duas imagens aéreas compreendendo tais rodovias na escala 1:8000. Estas imagens possuem dimensões de 2000 x 2012 *pixels*, sendo que as rodovias aparecem nessas imagens com aproximadamente 10 *pixels* de largura.

Os resultados obtidos foram analisados visual e numericamente. Na análise visual, os resultados obtidos (eixos extraídos, pontos salientes transformados para o espaço imagem, janelas de busca definidas automaticamente, etc.) são sobrepostos sobre a imagem, sendo analisados visualmente por um operador humano. Na análise numérica, os resultados obtidos são analisados a partir de comparação entre duas entidades: rodovia extraída e rodovia de referência. A rodovia de referência consiste numa linha poligonal representando o eixo central da rodovia, o qual é considerado correto (eixo digitalizado por um operador humano, por exemplo). A rodovia extraída consiste numa linha poligonal representando o eixo "central" da rodovia extraído pela metodologia proposta. Quatro parâmetros de qualidade são definidos em função dos eixos extraídos e de referência (WIEDEMANN e HINZ, 1999): 1- Completeza (COM): razão entre a soma dos comprimentos dos eixos extraídos e dos eixos de referência; 2- Correteza (CORR): razão entre a soma dos comprimentos dos eixos que foram extraídos corretamente e do comprimento de tudo que foi extraído; 3- Desvio Médio (e): distância média entre as rodovias extraídas e as correspondentes de referência; e 4- Erro Médio Quadrático (EMQ): raiz quadrada da soma quadrática das distâncias entre as rodovias extraídas e as correspondentes de referência.

A Figura 6 mostra os resultados obtidos para a imagem 1. A Figura 6(a) apresenta a rodovia georreferenciada utilizada para o processo de inicialização automática. Os pontos salientes, dados pelos vértices da linha poligonal definida para a rodovia georreferenciada, são apresentados na Figura 6(b). A

Figura 6(c) apresenta a linha poligonal inicial, definida pelos pontos salientes, transformada para o espaço imagem. Como pode ser notado na Figura 6, a linha poligonal já se encontra sobre a rodovia, no entanto, não coincide com o eixo de rodovia correto.

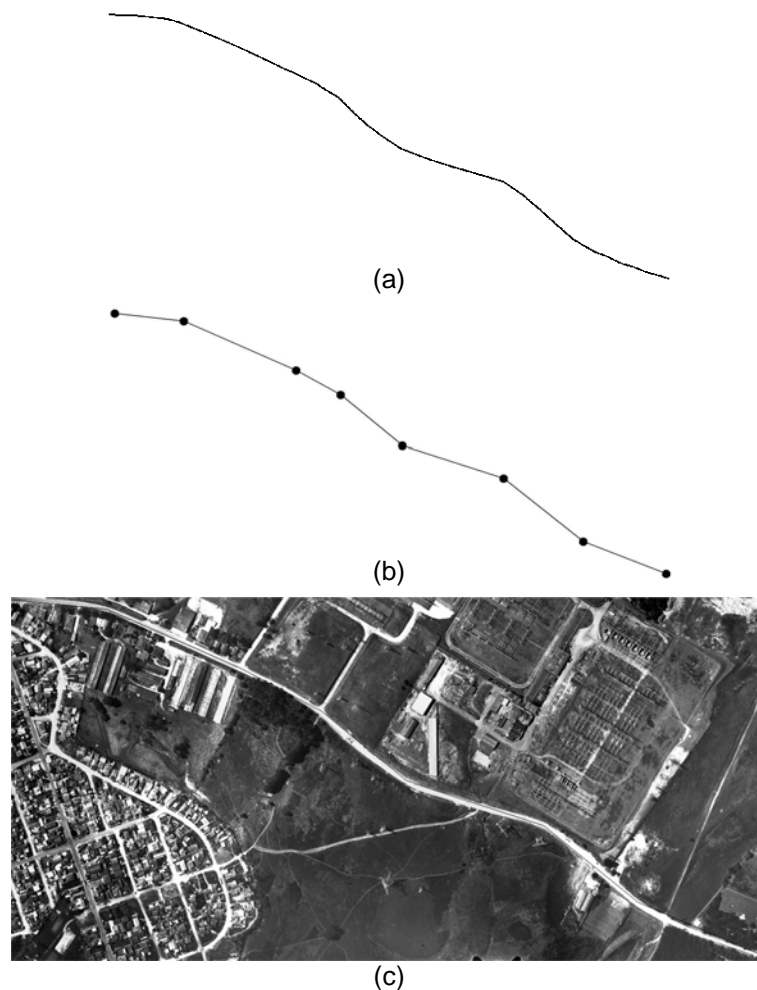


Figura 6 – Resultados obtidos para a inicialização automática do algoritmo de PD. (a) Rodovia georreferenciada; (b) Pontos Salientes definidos pela poligonação; e (c) Rodovia georreferenciada transformada para o espaço imagem.

Os limites das janelas de busca, definidos com base na Equação 6, são apresentados na Figura 7. Como pode ser visto na figura, a área de pesquisa definida é suficiente para a extração da rodovia usando PD. A definição automática das dimensões das janelas de busca permite otimizar o processo de extração, visto que, evita a análise do algoritmo numa grande quantidade de pontos (Figura 7).



Figura 7 – Limites definidos pelas janelas de busca.

A Figura 8 apresenta os resultados obtidos para o processo de extração. A análise visual do resultado mostra que o método obteve um bom desempenho para toda rodovia. Verifica-se que a maior

parte do eixo extraído encontra-se bem compatível com o eixo central da rodovia. Alguns pequenos problemas podem ser vistos nos extremos e no meio do eixo extraído, onde este se aproxima de uma das bordas da rodovia. Tais problemas podem ser atribuídos às irregularidades presentes nas bordas da rodovia, como por exemplo, a ausência de uma das bordas devido às saídas para outras rodovias.



Figura 8 – Resultado obtido para a imagem – 1.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de qualidade obtidos para este experimento.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade para a rodovia presente na imagem – 1.

Rodovia	COM	CORR	E	EMQ
Segmento 1	1,00	0,83	1,2	1,4

Observando-se a Tabela 1 verifica-se, a partir do parâmetro de qualidade de completeza, que todo o eixo de rodovia foi extraído, sendo que, 83% do eixo encontra-se bastante compatível com o eixo de rodovia correto. O restante, isto é, 17%, consiste nas regiões problemáticas mencionadas na análise visual. O valor do EMQ é 1,4 *pixels*, o que equivale a aproximadamente 1/7 da largura da rodovia.

A Figura 9 apresenta os resultados obtidos para a imagem – 2. O eixo de rodovia georreferenciado é apresentado na Figura 9(a). A linha poligonal definida para o eixo de rodovia georreferenciado é apresentada na Figura 9(b). Os pontos salientes dados pelos vértices da linha poligonal são também apresentados. O eixo georreferenciado transformado para o espaço imagem é apresentado na Figura 9(c). Para esta imagem, o eixo também se encontra sobre a rodovia, mas está deslocado em relação ao eixo de rodovia correto.

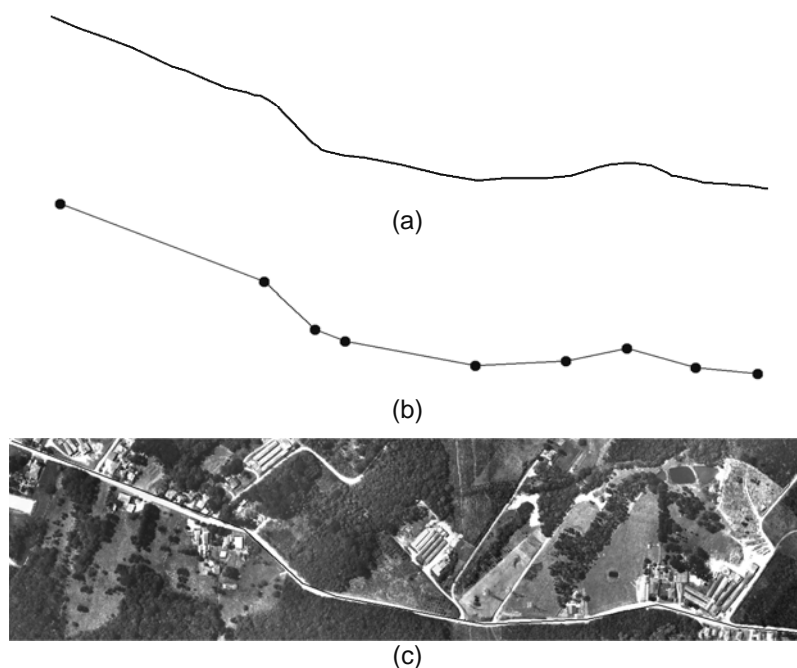


Figura 9 – Resultados obtidos para a inicialização automática do algoritmo de PD. (a) Rodovia georreferenciada; (b) Pontos Salientes definidos pela poligonação; e (c) Rodovia georreferenciada transformada para o espaço imagem.

Os limites das janelas de busca, definidos com base na Equação 6, são apresentados na Figura 10. Como pode ser visto, apenas os pontos sobre a rodovia, ou muito próximos a ela são analisados, o que permite um processamento otimizado do método de extração.

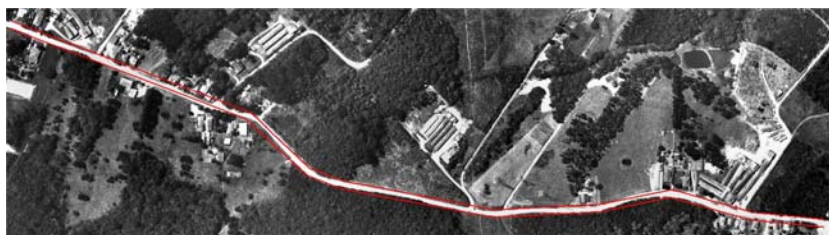


Figura 10 – Limites definidos pelas janelas de busca.

A Figura 11 apresenta os resultados obtidos pelo processo de extração. A análise visual dos resultados mostra o bom desempenho do método. Como no experimento anterior, verifica-se que o eixo extraído encontra-se, em grande parte, bastante compatível com o eixo central da rodovia. Estes resultados já eram esperados, visto que a rodovia apresenta, em grande parte, largura constante e bordas bem definidas. Além disso, pode ser notado que a ausência de uma das bordas em diversos locais da imagem não interferiram no funcionamento do método. Alguns pequenos problemas no eixo extraído são encontrados em locais de mudança de largura da rodovia. Nestes locais, pode-se verificar que o eixo extraído se aproxima de uma das bordas da rodovia.



Figura 11 – Resultado obtido para a imagem – 2.

A Tabela 2 apresenta os parâmetros de qualidade para o processo de extração, os quais estão compatíveis com a avaliação visual discutida acima.

Tabela 2 – Parâmetros de qualidade para a rodovia presente na imagem – 2.

Rodovia	COM	CORR	E	EMQ
Segmento 1	1,00	0,86	1,0	1,3

De acordo com a Tabela 2, verifica-se, a partir do parâmetro de qualidade completude, que todo o eixo de rodovia foi extraído, sendo que, 86% do eixo encontra-se bastante compatível com o eixo de rodovia correto. Conforme já foi mencionado na análise visual, o eixo extraído apresenta alguns problemas, pois, em alguns locais, se aproxima de uma das bordas da rodovia. Esses segmentos problemáticos equivalem a 14% da rodovia extraída. O valor do EMQ é 1,3 *pixels*, o que equivale também a aproximadamente 1/7 da largura da rodovia.

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este artigo apresentou uma metodologia para a extração automática de rodovias georreferenciadas existentes em base de dados ou mapas digitais. Como foi visto, o método opera em duas etapas básicas, isto é: 1- inicialização a partir da projeção para o espaço imagem de pontos salientes extraídos automaticamente ao longo de rodovias georreferenciadas; além disso, a precisão das coordenadas projetadas para o espaço imagem são estimadas, possibilitando a definição automática de alguns parâmetros do algoritmo de PD; e 2- os pontos salientes projetados na imagem definem um polígono inicial e aproximado, sob o qual as rodovias são extraídas iterativamente pelo algoritmo de PD.

O método foi avaliado a partir de duas imagens, sendo que as principais conclusões são: 1- para o processo de inicialização automática do processo de extração de rodovias usando PD, verificou-se que, além de eliminar a necessidade de interação do operador humano com o processo de extração, visto que este é, agora, realizado automaticamente, permite otimizar o processo de extração, pois as janelas de busca são definidas de acordo com as incertezas da base de dados; e 2- para o processo de extração de rodovias, verificou-se que o método de PD apresenta ótimo desempenho, principalmente para o caso em que as rodovias apresentam bons contrastes, bordas bem definidas e larguras regulares. Através das análises visual e numérica, verificou-se que o eixo de rodovia extraído encontra-se, quase por inteiro,

compatível com o eixo correto de rodovia. Verificou-se também, a partir dos experimentos conduzidos, que a acurácia do processo de extração foi de aproximadamente 1/7 da largura da rodovia.

Para trabalhos futuros o mesmo método pode ser utilizado em sistemas para a verificação ou atualização automática da malha viária. Uma outra aplicação interessante do método seria o "re-georreferenciamento" das rodovias. Neste processo, as rodovias georreferenciadas são localizadas e extraídas numa imagem que permita o refinamento geométrico das mesmas e, em seguida, transformadas novamente para a projeção de mapa.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AMINI, J.; SARADJIAN, M. R.; BLAIS, J. A. R.; LUCAS, C.; AZIZI, A. Automatic road-side extraction from large scale images. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, v. 4, p. 95-107, 2002.
- BAJCSY, R., TAVAKOLI, M. Computer recognition of roads from satellite pictures. **IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics**, v. 6, n. 9, p. 76-84, 1976
- BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. New Jersey: Prentice Hall, 1982.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, H., ECKSTEIN, W., EBNER, H. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, n. 7, p. 777-785, 1999.
- DAL POZ, A. P. **Reconhecimento e delineamento automático de segmentos de rodovia através de agrupamentos de objetos semânticos**. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2003, Curitiba. Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CD-ROM). 2003.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. **Active testing and edge analysis for road centerline extraction**. In: Photogrammetric Computer Vision ISPRS Commission III, Symposium 2002, Austria. International Archives of the Photogrammetry, Graz, Austria, p. 44-47, 2002.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. Road segment delineation using active testing principle and edge-based post-processing strategy. **Geomatica**, v. 57, n. 4, p. 399-409, 2003.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S. **Metodologias para a Extração Semi-Automática de Rodovias em Imagens Digitais**. In: IV Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário, 2000, Florianópolis-SC. Anais do IV Congresso Brasileiro de Cadastro Técnico Multifinalitário (CD-ROM), 2000.
- DAL POZ, A. P. **Processo automático para reconhecer rodovias georreferenciadas de uma fotografia aérea digitalizada**. 2000. 225 p. Relatório FAPESP de Pós-Doutorado, Universidade de Maine, EUA, 2000.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. **Extração semi-automática de rodovias usando programação dinâmica**. In: II Workshop Brasileiro de Geoinformática, São Paulo-SP, p. 3-9, 2000.
- DOUCETTE, P., AGOURIS, P., STEFANIDIS, A., MUSAVI, M. Self-organized clustering for road extraction in classified imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 55, p. 347-358, 2001.
- GEMAN, D., JEDYNAK, B., 1996. An active testing model for tracking roads in satellite images. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 18, n. 1, p. 1-14, 1996.
- GEMAEL, C. **Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas**. Curitiba: Ed. UFPR, 1994. 319p.
- GERKE, M.; BUTENUTH, M. ; HEIPKE, C. WILLRICH, F. Graph-supported verification of road databases. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 58, p. 152-165, 2004.
- GRUEN, A., LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.
- JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNK, B. G. **Machine Vision**. New York: McGraw-Hill, 1995. 549 p.
- KASS, M., WITKIN, A. TERZOPOULOS, D. **Snakes: Active contour models**. In: 1ST. INT. CONF. COMPUTER VISION, 1987, London, Proceedings of the First International Conference on Computer Vision, London, England, p. 259-268, 1987.
- LAPTEV, I., MAYER, H., LINDBERG, T., ECKSTEIN, W., STEGER, C., BAUMGARTNER, A. Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes. **Machine Vision and Applications**, v. 12, n. 1, p. 22-31, 2000.
- MENA, J. B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification. **Pattern Recognition**, v. 24, p. 3037-3058, 2003.
- NEVATIA, R.; BABU, K. R. Linear feature extraction and description. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 13, p. 257-269, 1980.
- QUAM, A. **Road tracking and anomaly detection in aerial imagery**. In: Proceedings of the DARPA Image Understanding Workshop, p. 51-55, 1978.
- SILVA, M. A. O.; DAL POZ, A. P. **Extração Semi-Automática de Rodovias Usando Análise de Bordas e um Template Adaptativo**. In: XX Congresso Brasileiro de Cartografia, 2001, Porto Alegre-RS. Anais do XX Congresso Brasileiro de Cartografia (CD-ROM), 2001.

SILVA, M. A. O; DAL POZ, A. P. Detecção e reconstrução automática de junções de rodovia em imagens digitais de cenas rurais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, v. 9, n. 2, p. 263-281, 2003.

SILVA, M. A. O. **Extração semi-automática de rodovias combinando o princípio de bordas anti-paralelas com um novo modelo de correlação da superfície intensidade**. 2001. 146 p. Relatório FAPESP de Pesquisa de Iniciação Científica, 2001.

SOWMYA, A; TRINDER, J. Modelling and representation issues in automated feature extraction from aerial and satellite images. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 55, n. 1, pp. 34-47, 2000.

VALE, G. M. **Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.

VALE, G. M.; DAL POZ, A. P. **Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica**. In: III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas, 2003, Curitiba. Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CD-ROM). 2003.

VOSSelman, G.; DE KNECHT, J. **Road tracing by profile matching and Kalman filtering**. In: Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, pp. 265-274, 1995.

WANG, Y., TRINDER, J. **Automatic road network extraction by hierarchical grouping**. Proc. ASPRS 2000 Annual Conference, Washington, DC, 2000.

WIEDEMANN, C.; HINZ, S. **Automatic extraction an evaluation of road networks from satellite imagery**. International Archives for Photogrammetry, v. 32, 1999.

WILLRICH, F. **Quality control and updating of road data by GIS-driven road extraction from imagery**. In: Proceedings of the Joint International Symposium on Geospatial Theory, Processing, and Applications, Ottawa, Canada, 2002. International Archives of Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, P. 4, p. 761-767, 2002.

WOLF, P. R. e GUILANI, C. D., **Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS**, New York, 1997. 564 p.

ZLOTNICK, A; CARNINE, P. D. Finding road seeds in aerial images. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, vol. 57, n. 2, p. 243-260, 1992.

6. AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) sob a forma de auxílio financeiro, e pela Empresa Esteio Engenharia e Aerolevantamentos S. A. através do fornecimento de dados para a realização dos experimentos.