

VERIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DA MALHA VIÁRIA GEORREFERENCIADA EM IMAGENS DIGITAIS

Automated Verification of Georeferenced Road Network in Digital Images

Marco Aurélio Oliveira da Silva¹
Aluir Porfírio Dal Poz²

^{1,2}**Universidade Estadual Paulista**
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 – Presidente Prudente, SP
mac_aurelio@pos.prudente.unesp.br; aluir@prudente.unesp.br

¹**Gisplan – Tecnologia da Geoinformação**
Av. Armando Lombardi, 800, sala 311, 22640-020 – Rio de Janeiro, RJ

RESUMO

Este trabalho propõe uma solução para o problema de verificação automática da malha viária georreferenciada em imagens aéreas digitais. A metodologia proposta baseia-se em duas etapas, isto é: 1- Extração automática de rodovias georreferenciadas; e 2- Análise de consistência das rodovias extraídas. Na primeira etapa, uma metodologia para a extração de rodovias baseada no algoritmo de programação dinâmica é utilizada para extrair automaticamente rodovias georreferenciadas. A metodologia de extração é inicializada com alguns pontos medidos automaticamente ao longo da malha viária georreferenciada e projetados no espaço imagem. A precisão dos pontos projetados é também estimada, possibilitando a realização automática das janelas de busca utilizadas pelo algoritmo de programação dinâmica. Na segunda etapa, a análise de consistência visa verificar a compatibilidade entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias georreferenciadas projetadas no espaço imagem. O critério de verificação é baseado num modelo de erro que basicamente captura as incertezas das rodovias georreferenciadas. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia proposta é promissora, visto que pode automatizar boa parte da cansativa tarefa de verificação da malha viária, ficando apenas uma pequena parte para ser complementada por um operador. Ficou também mostrado que a metodologia tem o potencial para ser usada em aplicações como a correção de erros sistemáticos e o refinamento geométrico da malha viária georreferenciada.

Palavras chaves: Programação Dinâmica, Extração de Rodovias, Rodovias Georreferenciadas, Análise de Consistência.

ABSTRACT

This paper proposes a solution for the problem of automatic verification of georeferenced road network in digital aerial images. The proposed methodology is based on two basic stages, i.e.: 1- Automatic extraction of georeferenced roads; and 2- Consistence analysis of extracted roads. In the first stage, a road extraction methodology based on the dynamic programming algorithm is used to automatically extract georeferenced roads. The extraction methodology is initialized with a few points automatically measured along the georeferenced road network and projected into the image-space. The precision of the projected points is also computed, making possible the automatic computation of the search windows used by the dynamic programming algorithm. In the second stage, the consistency analysis aims at checking the compatibility between the extracted roads and the corresponding georeferenced roads projected into the image-space. The checking criterion is based on an error model that basically embodies the uncertainties of the georeferenced roads. The obtained results have shown that the proposed methodology is promising, as it can automatize the most part of arduous and time-consuming road network verification task, leaving only a little part to be complimented by an operator. It was also shown that the methodology has the potential to be used in applications like the georeferenced road network's systematic error correction and geometric refinement.

Keywords: Dynamic Programming, Road Extraction, Georeferenced Roads, Consistence Analysis.

1. INTRODUÇÃO

Devido à utilização cada vez mais freqüente de Sistema de Informação Geográfica (SIG), e, principalmente, à necessidade de dados atualizados e acurados para muitas aplicações específicas destes SIGs, sistemas para a atualização automática da malha viária vêm sendo desenvolvidos no meio acadêmico. Um exemplo digno de nota é o projeto ATOMI (*Automated Reconstruction of Topographic Objects from Aerial Images using Vectorized Map Information* – Reconstrução Automática de Objetos Topográficos a partir de Imagens Aéreas Usando Informação de Mapa Vetorizado). Trata-se de uma cooperação entre o Escritório Federal de Topografia da Suíça e o Instituto de Geodésia e Fotogrametria, tendo como objetivo atualizar dados vetoriais de mapas digitalizados na escala 1:25000 (WILLRICH, 2002).

O problema de atualização cartográfica consiste basicamente na verificação dos dados georreferenciados e na extração de novos objetos, os quais são incorporados à base de dados cartográficos (HEIPKE, 2004). Neste artigo, o interesse recai sobre o problema de verificação de dados georreferenciados, mais especificamente, da malha viária georreferenciada. De uma forma geral, o problema de verificação visa checar a existência da malha viária georreferenciada em imagens digitais. Trata-se nesse contexto de um problema relevante, pois tem uma série de aplicações com alto grau de automação.

Dependendo da solução de verificação adotada, tanto a geometria quanto os atributos dos dados georreferenciados podem ser refinados. Este refinamento inclui o melhoramento da acurácia planimétrica, a adição de informação altimétrica aos dados planimétricos, a modificação ou a exclusão de dados preexistentes, a adição de novos atributos etc. (BALTASAVIAS, 2004; HEIPKE, 2004). Além disso, é ainda possível estabelecer medidas de qualidade para os dados georreferenciados comparando-os com os resultados obtidos no processo de verificação (WILLRICH, 2002; GERKE et al., 2004). Outra possibilidade é a detecção e correção de erros sistemáticos e grosseiros da malha viária georreferenciada (SILVA, 2005).

As metodologias existentes podem ser categorizadas segundo duas estratégias básicas.

A primeira estratégia baseia-se na análise da região ao longo das rodovias georreferenciadas projetadas na imagem. Nesta análise, medidas de homogeneidade, contraste, colinearidade, paralelismo e proximidade, podem ser utilizadas para comprovar a existência das rodovias georreferenciadas na imagem. De um ponto de vista, esta estratégia é bastante interessante, pois identifica áreas do mapa que necessitam ser atualizadas. No entanto, como de fato apenas é verificada a presença da rodovia na imagem, sem extraí-la, não é possível refinar a malha viária na base de dados cartográficos. Em Baumgartner et al. (1996) é proposta uma metodologia que opera segundo os princípios acima. O método proposto baseia-se na análise de perfis estabelecidos

transversalmente aos eixos de rodovias georreferenciadas projetadas na imagem. Um eixo de rodovia georreferenciado é classificado como verificado se o mesmo está compreendido entre bordas de rodovias detectadas ao longo de uma seqüência de perfis.

Na segunda estratégia, a malha viária georreferenciada é utilizada para inicializar um método de extração de rodovias. Diferente da primeira, esta estratégia permite refinar a malha viária georreferenciada, visto que, as rodovias georreferenciadas são “retraçadas” na imagem. Várias estratégias baseadas nesse princípio foram propostas mas, em essência, consistem em comparar as rodovias extraídas na imagem com as correspondentes rodovias georreferenciadas projetadas na imagem. O critério de comparação geralmente consiste em percorrer a rodovia georreferenciada projetada a fim de verificar as distâncias locais em relação às correspondentes rodovias extraídas na imagem. Os segmentos de rodovia georreferenciada projetada, cujas distâncias não excedem em dado limiar, são considerados verificados. As metodologias propostas se diferenciam principalmente pelas estratégias de extração utilizadas. Por exemplo, Klang (1998) e Fortier et al. (2001) utilizaram *snakes* para extrair as rodovias georreferenciadas na imagem. Agouris et al. (2000) também utilizaram *snakes*, mas com uma inovação. Basicamente, os autores adicionaram um terceiro termo de energia aos convencionais termos de energia interna e externa da curva *snakes*. Esse terceiro termo captura as incertezas associadas com as rodovias georreferenciadas. Em Dal Poz e Agouris (2000) e Dal Poz (2001) é utilizado o algoritmo de Programação Dinâmica (PD) para extrair automaticamente as rodovias georreferenciadas.

Este artigo apresenta uma metodologia para a verificação automática da malha viária em imagens aéreas. Embora a metodologia proposta baseie-se no princípio proposto em Dal Poz e Agouris (2000) e Dal Poz (2001), dois diferenciais importantes são propostos: o preciso dimensionamento do espaço de solução do método de extração baseado em PD e a verificação de compatibilidade entre as rodovias georreferenciadas projetadas e as correspondentes extraídas na imagem, baseada em critérios estatísticos. Na seção 2, a metodologia proposta para a verificação automática da malha viária georreferenciada é apresentada. Os resultados experimentais são apresentados na seção 3. A seção 4 finaliza o artigo com as principais conclusões.

2. VERIFICAÇÃO AUTOMÁTICA DA MALHA VIÁRIA GEORREFERENCIADA EM IMAGENS DIGITAIS

O problema de verificação automática da malha viária é resolvido neste trabalho em duas etapas básicas, isto é: 1- Extração automática de rodovias georreferenciadas usando PD; e 2- Análise de consistência estatística entre as rodovias georreferenciadas projetadas e as correspondentes rodovias extraídas na etapa anterior.

2.1 Extração Automática de Rodovias Georreferenciadas

A extração de rodovias usando PD consiste em resolver sequencialmente um modelo matemático de rodovia através do próprio algoritmo de PD (DAL POZ et al., 2000). A seguir são apresentados detalhes essenciais sobre o modelo matemático de rodovia utilizado e sobre sua solução usando PD. Maior ênfase será dada à inicialização automática do processo de extração de rodovias georreferenciadas.

2.1.1 Modelo Matemático de Rodovia

Conforme foi apresentado em Dal Poz et al. (2000), o modelo genérico de rodovia é formulado levando em conta propriedades radiométricas e geométricas do objeto rodovia. 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 (Figura 1), o seguinte par de equações pode ser usado para modelar a entidade rodovia,

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

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

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

no qual, E é o modelo matemático de rodovia, podendo ser decomposto em sub-funções E_i dependendo apenas de três pontos consecutivos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) da linha poligonal que representa a rodovia; C_i , devido sua definição, pode ser chamada de injeção de desigualdade, pois permite limitar o espaço de busca, visto que E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam a condição $C_i < T$; Ep_1, Ep_2 e Ep_3 são funções que modelam as propriedades radiométricas e geométricas do objeto rodovia; β e γ são pesos para as funções Ep_2 e Ep_3 ; $\alpha_i - \alpha_{i+1}$ corresponde ao ângulo de deflexão no vértice i (Figura 1); e ΔS_i é a distância entre os vértices $i-1$ e i (Figura 1).

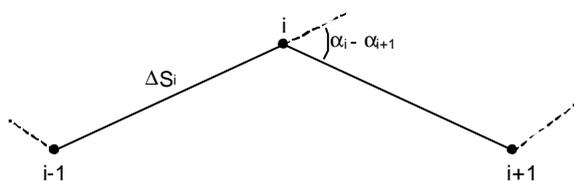


Figura 1 – Linha Poligonal representando a rodovia.

Este modelo de rodovia é resolvido sequencialmente através do algoritmo de PD, tendo-se como solução final, uma linha poligonal representando o eixo de rodovia extraído, sendo que, a solução obtida deve corresponder ao máximo da função E . Uma deficiência do modelo matemático dado pela Equação 1 é a possibilidade do mesmo gerar eixos de rodovia com baixa

qualidade posicional. Vale e Dal Poz (2003) melhoraram este modelo matemático utilizando-se do princípio de anti-parallelismo de bordas de rodovia, pelo qual dois vetores do gradiente, tomados em pontos de bordas opostas ao longo de uma mesma seção transversal de rodovia, são paralelos e de sentidos opostos (Nevatia e Babu, 1980). O modelo matemático modificado força os pontos p_i a descrever acuradamente o eixo de rodovia, possuindo a seguinte forma:

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

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

Vale ressaltar que o número de incógnitas interrelacionadas simultaneamente no modelo modificado de rodovia é sete, contra seis da versão original.

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

O princípio geral para a extração de rodovias através do algoritmo de PD é apresentado pela Figura 2.

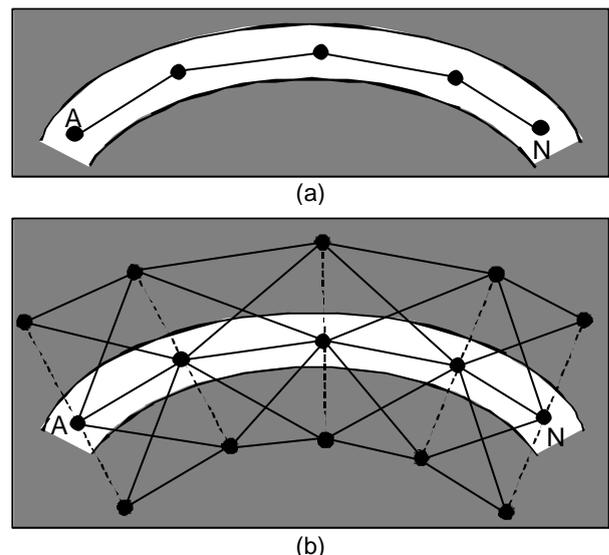


Figura 2 – Princípio do método. (a) Descrição da rodovia por uma linha poligonal; e (b) Problema de otimização para a extração do eixo de rodovia. (Fonte: Dal Poz e Agouris (2000)).

Como mostra a Figura 2(a), a rodovia a ser extraída pode ser descrita por uma linha poligonal de n vértices. A Figura 2(b) mostra que existem várias linhas poligonais, entre A e N, candidatas a representar otimamente o eixo de rodovia. A Equação 1 ou 3 mostra que apenas três vértices sucessivos estão interrelacionados simultaneamente. É exatamente nesse caso que o algoritmo de PD pode ser eficientemente utilizado para resolver o problema de otimização. Detalhes do algoritmo de PD estão fora do escopo deste trabalho, recomendando-se Ballard e Brown (1982) para um estudo compreensivo da técnica.

O problema apresentado na Figura 2(b) 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 injeção de desigualdade (C_i). No entanto, para a determinação do caminho ótimo, primeiramente é necessário estabelecer o espaço de busca do problema.

O estabelecimento do espaço de busca se dá a partir da reamostragem de pontos ao longo de janelas de busca (linhas tracejadas na Figura 2(b)), estabelecidas transversalmente 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:

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

na qual, $(x, y)_J$ são as coordenadas calculadas de pontos da janela de busca; $(x, y)_P$ são as coordenadas de um dado ponto P pertencente ao eixo atual de rodovia; k varia de 1, ..., $\text{int}(m/r)$ para o lado esquerdo da rodovia e de -1, ..., $-\text{int}(m/r)$ para o lado direito da rodovia; m consiste na dimensão da janela de busca para cada lado da rodovia; r é a resolução da janela de busca, sendo que, para possibilitar uma precisão *sub-pixel*, esse valor é geralmente menor que 1 *pixel*; e $(-b, a)$ são os componentes do vetor normalizado, perpendicular ao eixo atual de rodovia no ponto P.

O valor de m define o tamanho do espaço de busca. Assim, quanto maior for m, maior será a quantidade de pontos a serem avaliados e, conseqüentemente, o esforço computacional cresce numa proporção direta. Sendo n o número de vértices na linha poligonal atual e n_p (Equação 5) o número de possibilidades que cada vértice pode assumir dentro da janela de busca, o esforço computacional será da ordem de $n \cdot n_p^3$ (GRUEN e LI, 1997). Portanto, a definição do parâmetro m é importante para o funcionamento eficiente do algoritmo de PD.

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

Várias estratégias podem ser usadas 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 (DAL POZ et al., 2000). Como o processo de extração é iterativo, a linha poligonal inicial é sucessivamente refinada. 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 processo de extração converge.

Tais estratégias são inerentes a processos de extração de rodovias não georreferenciadas, ou seja, onde 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 mesmas podem ser utilizadas para a definição do valor m.

Assumindo que o nível de incerteza das rodovias georreferenciadas é de 0,3%, o valor de m é dado por:

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

na qual, σ consiste no desvio-padrão de um ponto georreferenciado do eixo de rodovia transformado para o 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 na subseção 2.1.3.3, o valor de σ é obtido através do processo de propagação de covariância na transformação de pontos georreferenciados para o espaço imagem.

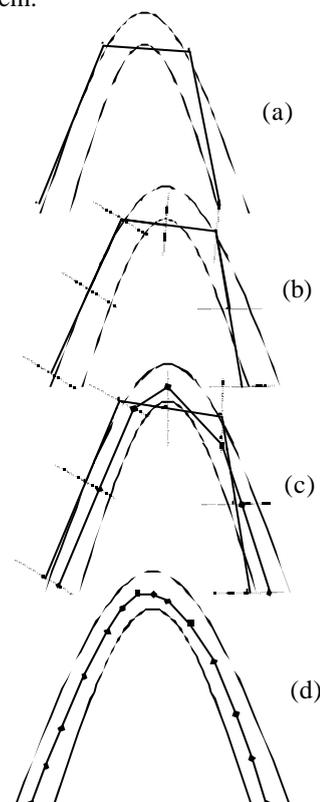


Figura 3 – Ilustração do processo de otimização. (a) Linha poligonal inicial; (b) Interpolação linear de novos vértices; (c) Resultado após a otimização; e (d) Resultado após a convergência da otimização (Fonte: Dal e Agouris, 2000).

O princípio do processo de otimização usando

PD é ilustrado na Figura 3. Inicialmente são fornecidos vários pontos sementes, cujas localizações 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).

2.1.3 Inicialização Automática do Processo de Extração de Rodovias Usando PD

O problema de inicialização automática do processo de extração é solucionado a partir de informações extraídas de rodovias georreferenciadas. Os 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. Na seqüência,

esses pontos são transformados para o espaço imagem e os erros cometidos neste processo são estimados. Estes erros permitem 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. Logo, o problema de inicialização automática é 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.

2.1.3.1 Extração Automática de Pontos Salientes

A fim de possibilitar uma descrição com um detalhamento adequado da posição, forma e topologia da malha viária georreferenciada, dois grupos de pontos salientes são selecionados. 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.

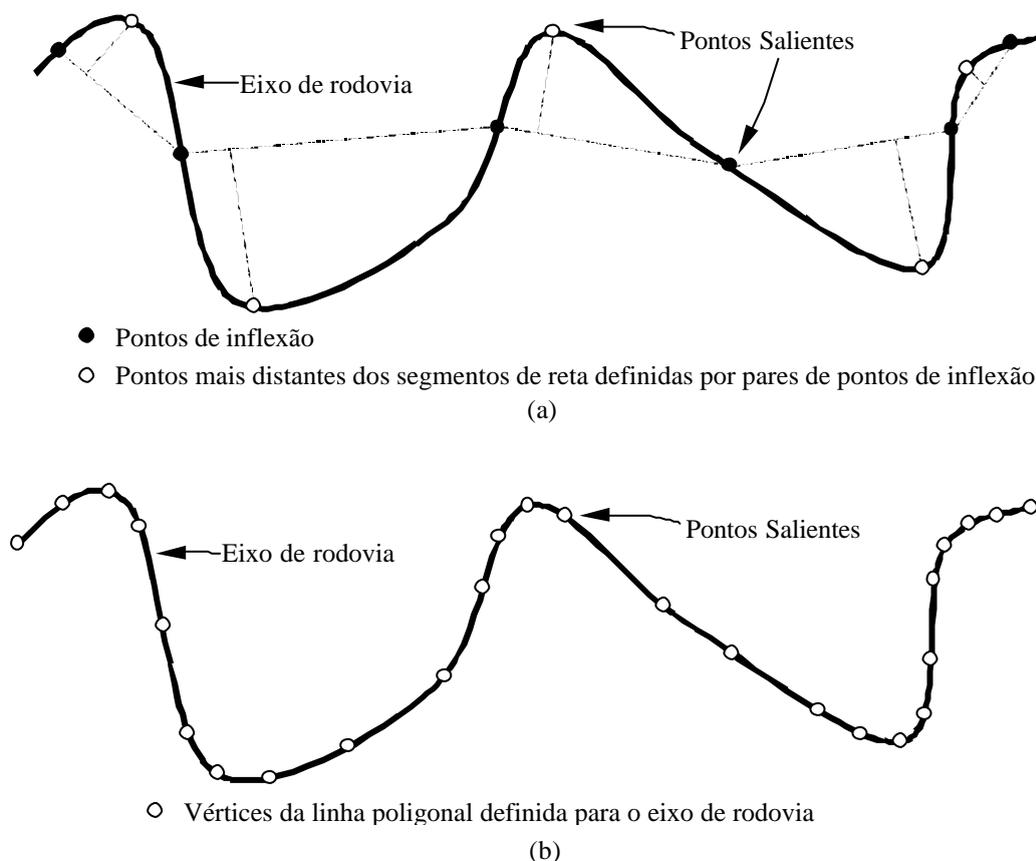


Figura 4 – Extração automática de pontos salientes a partir de rodovias georreferenciadas. (a) Pontos salientes definidos a partir dos pontos de inflexão da curva definida pelo eixo de rodovia; e (b) Pontos salientes definidos pelos vértices da linha poligonal.

Como mostra a Figura 4(a), 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 vizinhos. No entanto, a determinação numérica de pontos de inflexão a partir de uma curva digital não é simples. 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.

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 a definição de uma linha poligonal por divisão recursiva. O princípio baseia-se na adição de vértices recursivamente a partir de uma curva inicial (JAIN et. al, 1995).

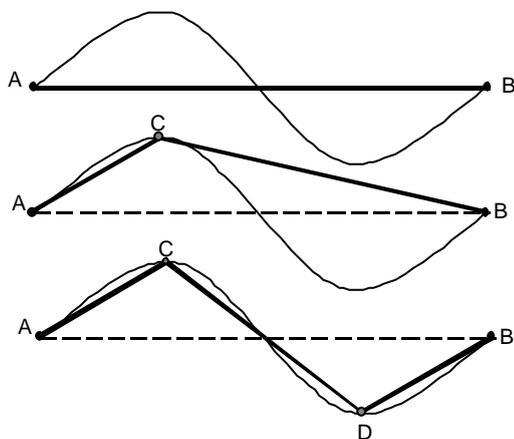


Figura 5 – Método de divisão recursiva (Fonte: Jain et al. (1995)).

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. Se o método de divisão recursiva fosse aplicado a uma rodovia georreferenciada, o resultado seria um conjunto de pontos segmentos, cuja densidade dependeria da forma da curva original e do limiar L. 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 (E, N) é interpolada a partir das informações georreferenciadas.

2.1.3.2 Transformação de Pontos Salientes para o Espaço Imagem

A transformação de pontos salientes no sistema UTM com altura ortométrica (E, N, h) para o sistema de imagem (c, l), requer uma série de transformações intermediárias entre sistemas do espaço objeto e espaço imagem. A Equação 7 sintetiza todas as transformações entre referenciais necessárias, bem como considera todos os erros sistemáticos que afetam a imagem digital. 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. O modelo matemático utilizado é dado por,

$$c = a_1 \cdot (x_0 + x_{er}) + a_2 \cdot (y_0 + y_{er}) + a_3 \quad (7)$$

$$l = a_4 \cdot (x_0 + x_{er}) + a_5 \cdot (y_0 + y_{er}) + a_6$$

no qual, (c, l) são as coordenadas de imagem; a_i são os parâmetros da transformação Afim; (x_0, y_0) são as coordenadas do ponto principal; (x_{er}, y_{er}) são as coordenadas fotogramétricas (x, y) (Equação 8) adicionadas de erros sistemáticos (distorção radial $(\delta r_x, \delta r_y)$, distorção descentrada $(\delta p_x, \delta p_y)$ e refração atmosférica $(\delta r_a_x, \delta r_a_y)$) (Equação 9).

$$x = -f \frac{r_{11}(X_L - X_{CP}) + r_{12}(Y_L - Y_{CP}) + r_{13}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})} \quad (8)$$

$$y = -f \frac{r_{21}(X_L - X_{CP}) + r_{22}(Y_L - Y_{CP}) + r_{23}(Z_L - Z_{CP})}{r_{31}(X_L - X_{CP}) + r_{32}(Y_L - Y_{CP}) + r_{33}(Z_L - Z_{CP})}$$

$$x_{er} = x + \delta r_x + \delta p_x + \delta r_a_x \quad (9)$$

$$y_{er} = y + \delta r_y + \delta p_y + \delta r_a_y$$

Tendo em vista que o objetivo da Equação 7 é obter as coordenadas imagem afetadas de erros sistemáticos, as parcelas de distorção radial $(\delta r_x, \delta r_y)$, de distorção descentrada $(\delta p_x, \delta p_y)$ e de refração atmosférica $(\delta r_a_x, \delta r_a_y)$ devem ser introduzidas nas coordenadas fotogramétricas (x,y). Isso é necessário porque o pro-

cesso de verificação automática é realizado na imagem digital bruta. Como se sabe, as coordenadas fotogramétricas dadas pelas equações de colinearidade estão isentas de erros sistemáticos. No entanto, as equações para a determinação das distorções das lentes (δr_x , δr_y , δp_x , δp_y) (ver equações 10) são determinadas a partir das coordenadas fotogramétricas brutas, ou seja, sem correção de erros sistemáticos e, neste ponto, não se dispõe destes valores. Além disso, as coordenadas fotogramétricas usadas para o cálculo da refração fotogramétrica (δr_{ax} , δr_{ay}) devem estar afetadas somente desse erro sistemático, as quais também não estão disponíveis. Dessa forma, comete-se um erro de aproximação caso os erros sistemáticos sejam determinados em função das coordenadas fotogramétricas isentas de erros. Entretanto, como este trabalho prevê a utilização de câmaras fotogramétricas, este erro pode ser negligenciado, devido à pequena magnitude das distorções das lentes. No caso de câmaras digitais, esta aproximação pode ocasionar um erro significativo, principalmente, por causa da ordem de grandeza da distorção radial. Para que o rigor matemático seja atendido, é necessário o uso de métodos iterativos para a determinação das coordenadas fotogramétricas brutas, tal como, o método de Newton-Raphson. Este método parte de uma solução aproximada, ou seja, coordenadas fotogramétricas isenta de erros (MACHADO et al., 2004).

$$\begin{aligned} dr_x &= (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot x \\ dr_y &= (k_1 \cdot r^2 + k_2 \cdot r^4 + k_3 \cdot r^6) \cdot y \\ dp_x &= P_1 \cdot (r^2 + 2x^2) + 2 \cdot p_2 \cdot x \cdot y \\ dp_y &= P_2 \cdot (r^2 + 2y^2) + 2 \cdot p_1 \cdot x \cdot y \\ dra_x &= x \cdot e_{45} \cdot \left(\frac{r^2}{f^2} + 1 \right) \\ dra_y &= y \cdot e_{45} \cdot \left(\frac{r^2}{f^2} + 1 \right) \\ r &= \sqrt{x^2 + y^2} \end{aligned} \quad (10)$$

Nas equações 10, k_1 , k_2 , k_3 , P_1 e P_2 são os parâmetros de distorção das lentes e e_{45} é dado pela equação de Saastamoinen (ver Lugnani (1987)).

A terna (X_L , Y_L , Z_L) (Equação 8) representa as coordenadas de um ponto qualquer no sistema geodésico cartesiano local. Como mostram as equações 11 e 12, tais coordenadas são obtidas em função das coordenadas UTM (E , N , h) com altura ortométrica.

$$\begin{aligned} X_L &= -\text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta X + \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta Y \\ Y_L &= -\text{sen}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta X - \dots \\ &\quad \text{sen}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta Y + \text{cos}(\varphi_0) \cdot \Delta Z \\ Z_L &= \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \cdot \Delta X + \dots \\ &\quad \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \cdot \Delta Y + \text{sen}(\varphi_0) \cdot \Delta Z \end{aligned} \quad (11)$$

$$\begin{aligned} \Delta X &= \left[(N' + h) \cdot \text{cos}(\varphi_1 + b_2 D^2 + b_4 D^4 + b_6 D^6) \cdot \dots \right. \\ &\quad \left. \text{cos}(\lambda_{mc} + b_1 D + b_3 D^3 + b_5 D^5) \right] - \dots \\ &\quad \left[(N' + h) \cdot \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{cos}(\lambda_0) \right] \\ \Delta Y &= \left[(N' + h) \cdot \text{cos}(\varphi_1 + b_2 D^2 + b_4 D^4 + b_6 D^6) \cdot \dots \right. \\ &\quad \left. \text{sen}(\lambda_{mc} + b_1 D + b_3 D^3 + b_5 D^5) \right] - \dots \\ &\quad \left[(N' + h) \cdot \text{cos}(\varphi_0) \cdot \text{sen}(\lambda_0) \right] \\ \Delta Z &= \left[(1 - e^2) \cdot N' + h \right] \cdot \dots \\ &\quad \text{sen}(\varphi_1 + b_2 D^2 + b_4 D^4 + b_6 D^6) - \dots \\ &\quad \left[(1 - e^2) \cdot N' + h_0 \right] \cdot \text{sen}(\varphi_0) \end{aligned} \quad (12)$$

$$D = \frac{E - 500.000}{0,9996}$$

Nas equações 11 e 12, (ΔX , ΔY , ΔZ) representa o deslocamento entre os sistemas geodésico cartesiano e o sistema geodésico cartesiano local; λ_{mc} é a longitude do meridiano central; (φ_0 , λ_0 , h_0) corresponde a origem do sistema geodésico cartesiano local; N' e N'_0 correspondem ao raio de curvatura da seção primeira vertical para o ponto sendo transformado e para a origem do sistema local, respectivamente; 'e' é a primeira excentricidade do elipsóide; 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 .

Como foi visto, o modelo matemático dado pela 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. 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. Embora as terminologias de pontos sementes e salientes tenham em comum a função de dar uma aproximação inicial para a malha viária, ambos os conjuntos de pontos são definidos em espaços diferentes. Os que realmente são usados na inicialização do processo de extração são os pontos sementes, que são definidos no espaço onde ocorrerá a extração, isto é, o espaço imagem. Essa denominação é usual em análise de imagem, pois estes pontos servem de sementes para a extração do objeto de interesse, no caso, rodovias.

2.1.3.3 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) e 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:

$$S_{cl} = D.S.D^T \quad (13)$$

na qual:

- D (2 x 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:

$$D = \begin{bmatrix} \frac{\partial C}{\partial a_1} & \frac{\partial C}{\partial a_2} & \frac{\partial C}{\partial a_3} & \frac{\partial C}{\partial a_4} & \frac{\partial C}{\partial a_5} & 0 \\ \frac{\partial L}{\partial a_1} & \frac{\partial L}{\partial a_2} & \frac{\partial L}{\partial a_3} & \frac{\partial L}{\partial a_4} & \frac{\partial L}{\partial a_5} & \sum_{x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2} \\ \frac{\partial C}{\partial a_6} & \frac{\partial C}{\partial x_0} & \frac{\partial C}{\partial y_0} & \frac{\partial C}{\partial k_1} & \frac{\partial C}{\partial k_2} & \frac{\partial C}{\partial k_3} \\ \frac{\partial L}{\partial a_6} & \frac{\partial L}{\partial x_0} & \frac{\partial L}{\partial y_0} & \frac{\partial L}{\partial k_1} & \frac{\partial L}{\partial k_2} & \frac{\partial L}{\partial k_3} \\ \frac{\partial C}{\partial P_1} & \frac{\partial C}{\partial P_2} & \frac{\partial C}{\partial \kappa} & \frac{\partial C}{\partial \phi} & \frac{\partial C}{\partial \omega} & \frac{\partial C}{\partial X_{CP}} \\ \frac{\partial L}{\partial P_1} & \frac{\partial L}{\partial P_2} & \frac{\partial L}{\partial \kappa} & \frac{\partial L}{\partial \phi} & \frac{\partial L}{\partial \omega} & \frac{\partial L}{\partial X_{CP}} \\ \frac{\partial C}{\partial Y_{CP}} & \frac{\partial C}{\partial Z_{CP}} & \frac{\partial C}{\partial E} & \frac{\partial C}{\partial N} & \frac{\partial C}{\partial H} & 0 \\ \frac{\partial L}{\partial Y_{CP}} & \frac{\partial L}{\partial Z_{CP}} & \frac{\partial L}{\partial E} & \frac{\partial L}{\partial N} & \frac{\partial L}{\partial H} & \sum_{E, N, h} \end{bmatrix} \quad (14)$$

- S (22 x 22): MVC dos parâmetros envolvidos na Equação 7, dada por:

$$S = \begin{bmatrix} \sum_{a_1, a_2, a_3, a_4, a_5, a_6} & 0 \\ 0 & \sum_{x_0, y_0, k_1, k_2, k_3, P_1, P_2} \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \sum_{\kappa, \phi, \omega, X_{CP}, Y_{CP}, Z_{CP}} & 0 \\ 0 & \sum_{E, N, h} \end{bmatrix} \quad (15)$$

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 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 imagem de um dado ponto p(L, C) obtido pela Equação 7. Por sua vez, estas variâncias permitem obter o desvio-padrão resultante (s) de cada ponto p(L, C).

2.2 Análise de Consistência das Rodovias Extraídas

A análise de consistência tem por objetivo analisar a compatibilidade estatística entre as rodovias extraídas na primeira etapa do método e as correspondentes rodovias georreferenciadas, transformadas ponto a ponto através da Equação 7. O erro resultante em cada ponto transformado para o sistema de coordenadas de imagem (L, C) é estimado com auxílio da Equação 13. A análise de consistência é conduzida em dois passos básicos, ou seja: 1- Determinação das distâncias locais entre as rodovias extraídas e as correspondentes georreferenciadas transformadas; e 2 Classificação dos segmentos das rodovias extraídas segundo a compatibilidade com as correspondentes rodovias georreferenciadas transformadas.

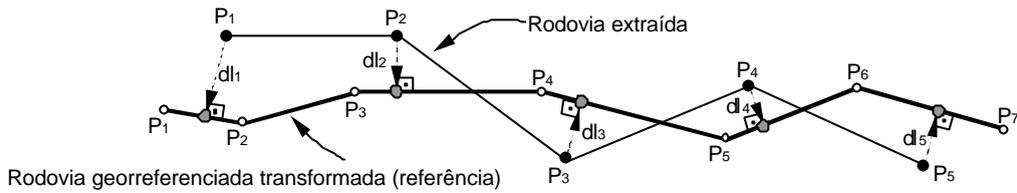


Figura 6 – Distância local entre a rodovia extraída e a georreferenciada transformada.

Como mostra a Figura 6, a primeira etapa é realizada a partir da determinação da distância entre os pontos da rodovia extraída e a curva de referência correspondente definida pela rodovia georreferenciada transformada.

Definindo-se o segmento de reta r a partir dos pontos $P_i(c_i, l_i)$ e $P_{i+1}(c_{i+1}, l_{i+1})$, e expressando-o na forma $a_i \cdot c + b_i \cdot l + d = 0$, a distância local (dl_i) de $P_j(c_j, l_j)$ a r é dada por (Figura 7):

$$dl_j = \frac{|a_i \cdot c_j + b_i \cdot l_j + d|}{\sqrt{a_i^2 + b_i^2}} \quad (16)$$

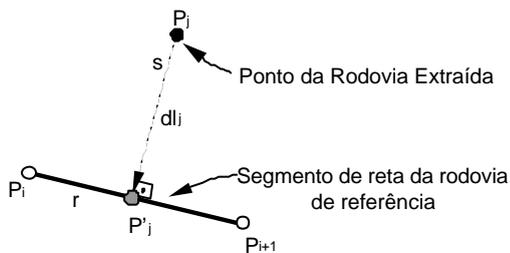


Figura 7 – Distância de um ponto da rodovia extraída a um segmento de reta da rodovia de referência.

A distância local (dl_j) determinada acima, ainda necessita ser validada, ou seja, deve-se verificar se o ponto $P'_j(c'_j, l'_j)$, projeção ortogonal de P_j em r , pertence realmente ao segmento de reta $\overline{P_i, P_{i+1}}$. P_j e P'_j definem a reta s que é perpendicular a r (Figura 7). Dessa forma, sendo $a_i \cdot c - l + b_i = 0$ e $-\frac{1}{a_i} \cdot c - l + b_j = 0$ as respectivas equações das retas r e s , as coordenadas de P'_j são dadas por:

$$P'_j = \begin{bmatrix} c'_j \\ l'_j \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} -a_i & 1 \\ 1/a_i & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} b_i \\ b_j \end{bmatrix} \quad (17)$$

Determinadas as coordenadas de P'_j , as mesmas podem ser validadas como segue:

$$\begin{aligned} c_i &\leq c'_j \leq c_{i+1} \\ l_i &\leq l'_j \leq l_{i+1} \end{aligned} \quad (18)$$

Caso as coordenadas de P'_j não satisfaçam a condição de validação, o valor de i é incrementado e uma nova determinação é feita. Este processo é realiza-

do para todos os pontos da rodovia extraída, a fim de que o deslocamento local em todos os pontos seja encontrado.

Na segunda etapa é realizado um teste de compatibilidade entre as rodovias extraídas e as correspondentes rodovias georreferenciadas transformadas, tendo por base as distâncias ponto a ponto entre estes dois grupos de rodovias e um critério de verificação.

O critério de verificação baseia-se na verificação de pertinência das rodovias extraídas em faixas de tolerância construídas em torno das correspondentes rodovias georreferenciadas transformadas (Figura 8). Estas faixas de tolerância são construídas de modo que a probabilidade de conter as respectivas rodovias georreferenciadas verdadeiras é de 99,7%. Isto é, os vértices verdadeiros destas feições devem ser encontrados a distâncias não superiores a três vezes os respectivos erros de projeção. Sendo dl_i a distância calculada entre um ponto i da rodovia extraída e um ponto m da correspondente rodovia georreferenciada transformada, para que o ponto i seja considerado verificado deve se ter que,

$$dl_i \leq 3 \cdot \sigma_m \quad (19)$$

onde, σ_m é o desvio-padrão do ponto m da rodovia georreferenciada projetada.

O critério dado pela Equação 19 é aplicado para todos os pontos das rodovias extraídas, gerando segmentos verificados e não verificados. A figura 8 mostra um caso ilustrativo, onde a rodovia extraída é segmentada em três segmentos, sendo dois não verificados e um verificado. Vale ressaltar que os limites dessas faixas de tolerâncias são simétricos em relação às respectivas rodovias georreferenciadas transformadas, mas a largura varia de acordo com o erro de projeção local.

A classificação de segmentos de rodovias como não verificados pode ocorrer devido a quatro hipóteses, quais sejam:

- 1- Os segmentos de rodovia foram extraídos erroneamente ou com baixa qualidade pelo método de extração;
- 2- Os segmentos de rodovia correspondem a trechos afetados por algum tipo de desatualização, como, por exemplo, mudança de traçado;
- 3- As rodovias georreferenciadas apresentam erros grosseiros e/ou sistemáticos; e
- 4- Problemas na orientação da imagem.

Estas hipóteses mostram que o problema de verificação pode ser explorado de várias formas, como na detecção e correção de erros sistemáticos.

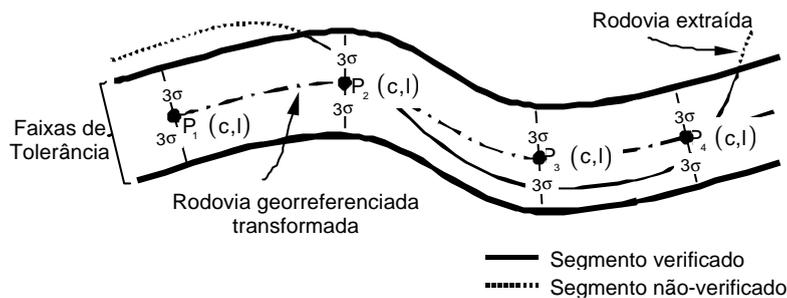


Figura 8 – Definição das faixas de tolerância e classificação do eixo da rodovia extraída segundo a compatibilidade com o correspondente eixo da rodovia georreferenciada transformada.

3. RESULTADOS EXPERIMENTAIS

Nesta seção são apresentados os resultados obtidos com o processo proposto de verificação automática da malha viária. Os resultados obtidos em cada etapa do método são analisados visual e numericamente. A análise em separado das duas etapas do método se justifica porque o resultado final da verificação pode ser melhor entendido a partir da análise dos resultados da primeira etapa do método.

Para possibilitar a análise visual, os resultados obtidos em ambas as etapas (eixos de rodovia extraída, pontos salientes transformados para o espaço imagem, janelas de busca definidas automaticamente etc.) são sobrepostos na imagem.

Já a análise numérica é realizada de forma diferente para cada etapa. Para a etapa de análise de consistência são calculadas as porcentagens de verificação e não verificação. Referente a primeira etapa, uma comparação numérica é realizada entre as rodovias de referência e as correspondentes extraídas via PD. As rodovias de referência são extraídas através da digitalização manual dos respectivos eixos. Além desses dois grupos de feições, também é necessário conhecer a largura média da rodovia (w_m). Cada rodovia extraída é classificada segundo sua distância em relação à correspondente rodovia de referência. Três tipos de segmentos de rodovia foram definidos para esta classificação, quais sejam (MAIA, 2003): 1- Segmentos extraídos com ótima qualidade: um segmento é considerado como extraído com ótima qualidade se a distância entre os pontos da rodovia extraída e a de referência for menor ou igual a $w_m/4$; 2- Segmentos extraídos com boa qualidade: um segmento é considerado como extraído com boa qualidade se a distância entre os pontos da rodovia extraída e a de referência estiver dentro do intervalo $]w_m/4, w_m/2]$; e 3- Segmentos extraídos com péssima qualidade: um segmento é dado como extraído com péssima qualidade se a distância entre os pontos da rodovia extraída e a de referência for maior que $w_m/2$. Os parâmetros utilizados para a análise de qualidade das rodovias extraídas são definidos na forma que segue: 1- Completeza: razão entre as somas dos comprimentos dos eixos de rodovia extraídos dos tipos 1 e 2 e dos comprimentos dos correspondentes eixos de referência;

2- Correção: razão entre as somas dos comprimentos dos eixos de rodovia que foram extraídos corretamente (tipo 1) e dos comprimentos dos eixos extraídos dos tipos 1 e 2; 3- Desvio Médio: distância média entre os eixos de rodovia extraídos e os correspondentes de referência; e 4- Erro Médio Quadrático: raiz quadrada da soma quadrática das distâncias entre os eixos de rodovia extraídos e os correspondentes de referência.

De forma a avaliar a potencialidade da metodologia desenvolvida, um experimento foi conduzido a partir de uma imagem aérea e de um mapa digital das rodovias existentes nesta imagem. A imagem aérea, a qual apresenta uma pequena região da Suíça, foi tomada na escala 1:9200 e faz parte de um projeto demonstrativo do sistema fotogramétrico *Leica Photogrammetry Suite (LPS)*. A partir deste projeto, tornou-se possível a elaboração de um mapa digital de rodovias na escala 1:2000. Este mapa apresenta acurácia planimétrica de 0,6 m e altimétrica de 0,8 m.

Para a realização do experimento, primeiramente um deslocamento de 5 pixels foi aplicado às coordenadas de imagem das rodovias existentes no mapa digital, o que equivale a um deslocamento de -3,5 m e 3,5 m nas coordenadas N e E do sistema de projeção UTM. Neste caso, espera-se que grande parte das rodovias não sejam verificadas, uma vez que o erro introduzido pode ser interpretado como erro sistemático no mapa digital. Este experimento visa não somente demonstrar a potencialidade do método na verificação automática da malha viária, mas também demonstrar que o método também pode ser uma poderosa ferramenta para detectar e eliminar erros sistemáticos na malha viária preexistente.

Nas Figuras 9 – 11 são apresentados detalhes da etapa de inicialização do processo de extração automática de rodovias georreferenciadas. Na Figura 9, as linhas poligonais que modelam os eixos de rodovias georreferenciadas já transformadas para o espaço imagem via Equação 7 são apresentadas, sendo que os vértices destas linhas poligonais, conforme apresentado anteriormente, correspondem aos pontos salientes extraídos automaticamente. Na Figura 9(a), toda a imagem original, com as linhas poligonais superpostas, é apresentada reduzidamente. Uma janela ampliada da imagem original é apresentada na Figura 9(b), onde se pode observar melhor alguns detalhes. Como uma descrição grosseira dos eixos de rodovia já é suficiente para inicializar o

método de extração de rodovias por PD, adotou-se um limiar relativamente alto de 5σ para a poligonização, sendo $\sigma = 0,6$ m. Esse procedimento permite uma boa simplificação da descrição inicial dos eixos de rodovia. Como mostra a Figura 9(a), verifica-se que, no geral, os

eixos de rodovia iniciais se encontram geralmente fora das rodovias ou coincidentes com uma de suas bordas. Exemplos de trechos dos eixos de rodovia iniciais, posicionados fora dos limites da rodovia, são apresentados em detalhes pela Figura 10.

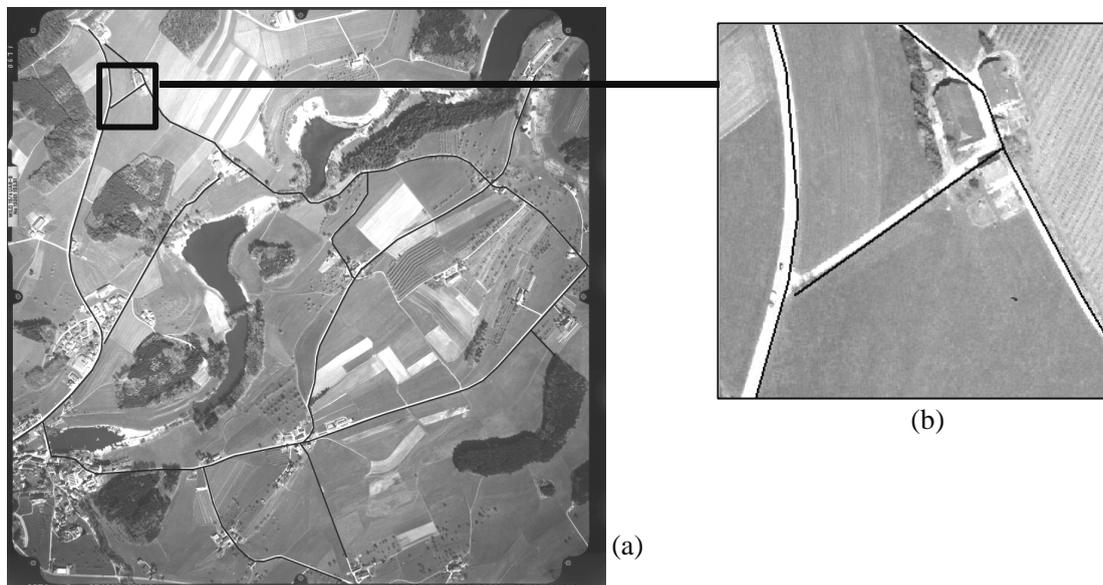


Figura 9 – Inicialização do método de extração de rodovias georreferenciadas. (a) Imagem original reduzida; e (b) Janela selecionada na imagem original.

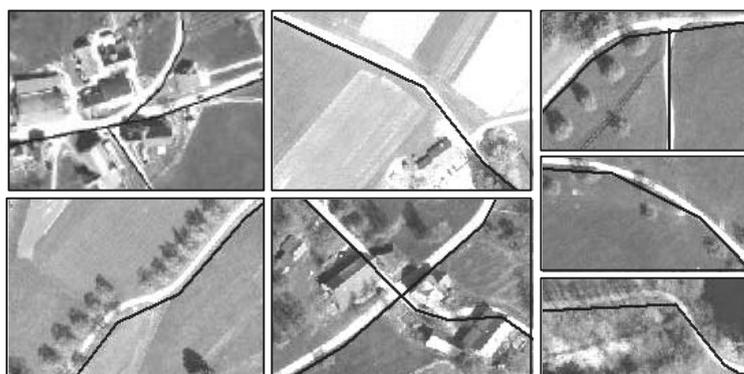


Figura 10 – Exemplos de trechos em que os eixos de rodovia iniciais se encontram fora das rodovias ou coincidentes com uma das bordas.



Figura 11 – Limites definidos pelas janelas de busca para uma pequena janela de imagem.

A Figura 11 apresenta os limites definidos pelas janelas de busca determinados com base na Equação 6, para a mesma janela de imagem selecionada na Figura 9. Em grande parte, como já era esperado, a área de pesquisa definida encontra-se fora da rodovia. Neste passo é importante que ao menos uma parte da rodovia faça parte da área de pesquisa. Dessa forma, durante o processo de extração, o eixo de rodovia inicial, a cada iteração, é refinado e deslocado para sua posição correta.

Os resultados obtidos para o processo de extração são apresentados nas Figuras 12 – 14.

A análise visual dos resultados mostra que o método, no geral, obteve um desempenho satisfatório para todas as rodovias. Verifica-se que os eixos de rodovia extraídos foram refinados geometricamente e, no geral, foram deslocados para suas posições corretas, ou seja, para o centro das rodovias (Figura 12). Dessa forma, verifica-se que os erros sistemáticos foram pratica-

mente eliminados. Algumas partes dos eixos de rodovia extraídos são apresentadas em detalhes na Figura 13.

Como mostra a Figura 14, alguns problemas também foram encontrados nos eixos de rodovia extraídos. Verifica-se nesta figura que a presença de junções ou mudanças bruscas na largura das rodovias fez com que o eixo extraído tangencie uma das bordas. Pode ser notado também que a presença de obstáculos não permitiu, em algumas situações, que o eixo de rodovia fosse extraído na posição correta.

O bom desempenho do método de extração é confirmado pela análise numérica dos resultados. Através desta análise verificou-se que 77,6% da malha viária foi extraída com ótima qualidade, 15,5% foi extraída com boa qualidade e 6,9% foi extraída com péssima qualidade. Os segmentos de rodovia classificados como de baixa qualidade (6,9%) resultaram principalmente da presença de irregularidades ao longo das rodovias, tais como obstruções causadas por sombras e árvores.

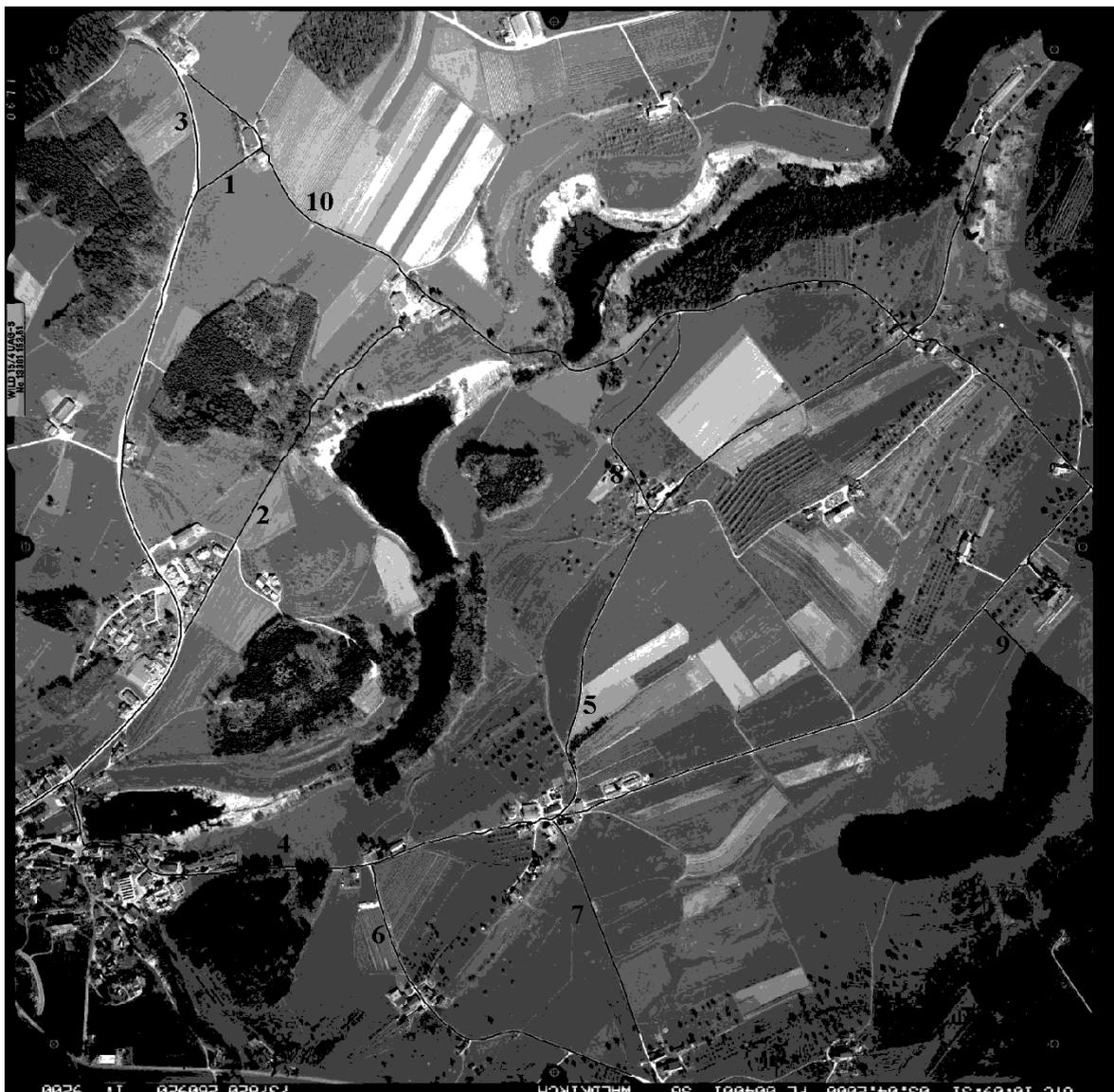


Figura 12 – Eixos de rodovia extraídos.



Figura 13 – Visão detalhada de alguns trechos dos eixos de rodovia extraídos.



Figura 14 – Visão detalhada de alguns problemas encontrados nos eixos de rodovia extraídos.

A Tabela 1 apresenta os parâmetros de qualidade para as rodovias extraídas. Como mostra a tabela, verifica-se pelo parâmetro completudeza para o pior caso, rodovia 2, que 74% foi extraída adequadamente. O parâmetro correção mostra que 78,4% destes 74% corresponde à extração correta da rodovia. Pode ser notado também que a acurácia da extração foi de 1,4 *pixels*, o

que corresponde a aproximadamente 1/4 da largura da rodovia. Para as rodovias restantes, verifica-se que os parâmetros de completudeza e correção são superiores a 91,7% e 74,5%, respectivamente. Pode ser notado ainda que a acurácia da extração foi superior a 1/5 da largura da rodovia.

Tabela 1 – Parâmetros de qualidade para as rodovias extraídas.

Rodovia	Completeza (%)	Correção (%)	Desvio Médio (<i>pixel</i>)	Erro Médio Quadrático (EMQ) (<i>pixel</i>)	EMQ/ w_m
1	100,0	79,8	0,6	0,8	1/9
2	74,0	78,4	0,9	1,4	1/4
3	91,7	90,9	1,6	2,6	1/5
4	94,3	83,6	1,2	1,8	1/5
5	90,0	83,4	0,8	1,2	1/6
6	100,0	96,3	0,6	0,9	1/8
7	100,0	82,8	0,5	0,7	1/8
8	100,0	85,0	0,5	0,7	1/7
9	100,0	80,7	0,7	0,8	1/7
10	95,9	74,5	0,8	1,3	1/5

Tabela 2 - Verificação obtida por rodovia.

Rodovia	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Verificação (%)	0	8	6	2	5	78	100	47	100	70

A Tabela 2 mostra o nível de verificação obtido por rodovia. Nota-se que 50% das rodovias tiveram um baixo nível de verificação, cujos valores ficaram abaixo de 8%. Duas rodovias (20%) de pequena extensão tiveram verificação de 100%. A verificação das demais rodovias (30%) situou-se entre 47% e 78%. Quanto a malha como um todo, obteve-se um nível de verificação de 37%. Esse baixo nível de verificação já era esperado, tendo em vista que foram introduzidos erros sistemáticos de 5 pixels. Esse erro equivale à aproximadamente 5s, valor próximo do limiar de 3s adotado para classificar os segmentos de rodovia em verificados ou não. Isso significa que um erro sistemático maior poderia levar a um nível bem mais baixo de verificação.

4. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma metodologia para a verificação automática da malha viária em imagens digitais. O preciso dimensionamento do espaço de busca do algoritmo de otimização via PD e o uso de critério estatístico na análise de consistência, são os dois diferenciais dessa metodologia em relação às metodologias de verificação existentes.

A fim de possibilitar uma avaliação da metodologia apresentada, um experimento foi conduzido a partir de uma imagem aérea na escala 1:9200 e um mapa digital com qualidade geométrica compatível com a escala 1:2000. Foram introduzidos nesses dados erros sistemáticos para mostrar a potencialidade do método em detectar e corrigir esses tipos de erros. A análise dos resultados obtidos na primeira etapa do método mostrou que praticamente todos os erros sistemáticos foram corrigidos. De fato, 77,6% da malha viária foi extraída com ótima qualidade, 15,5% foi extraída com boa qualidade e apenas 6,9% foi extraída com péssima qualidade. Algumas irregularidades presentes ao longo das rodovias, tais como junções, obstruções e mudanças abruptas de largura, foram a causa direta dos 6,9% da malha viária extraída com péssima qualidade.

Referente à segunda etapa do método, encontrou-se a alta taxa (63%) de não verificação das rodovias extraídas, o que era esperada dada a presença de erros sistemáticos nos dados e a correção dos mesmos na primeira etapa do método. A taxa de não verificação das rodovias extraídas depende da magnitude dos erros sistemáticos nos dados. A magnitude dos erros sistemáticos introduzidos corresponde na imagem a 5s. Como o limiar usado na análise de consistência era de 3s, erros sistemáticos com maior magnitude certamente implicariam numa não verificação bem maior. De qualquer forma, o alto índice de não verificação obtido (63%) é uma indicação clara de que a malha viária georreferenciada está desatualizada ou apresenta problemas de qualidade geométrica. Como neste caso se sabe que a malha viária georreferenciada está atualizada, basta georreferenciar a malha viária extraída na imagem para gerar uma nova malha viária georreferenciada, livre dos problemas geométricos dos dados originais.

A partir do experimento conduzido algumas conclusões mais gerais podem ser apresentadas. Para a etapa de extração automática de rodovias georreferenciadas: 1- verificou-se que a estratégia desenvolvida para a inicialização automática do processo de extração de rodovias é bastante eficiente, pois, além de eliminar a necessidade de interação do operador com o processo de extração, permite, também, otimizá-lo, visto que as janelas de busca são definidas de acordo com as incertezas das rodovias georreferenciadas; 2- verificou-se que o método de extração por PD mostrou-se robusto quanto à presença de erros sistemáticos, haja visto que apenas 6,9% dos eixos extraídos foram classificados como de péssima qualidade; e 3- verificou-se que a metodologia desenvolvida para a verificação automática de rodovias georreferenciadas pode ser utilizada em várias aplicações cartográficas, como na detecção automática de alterações e na correção de erros sistemáticos na malha viária georreferenciada.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi apoiado pela CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) sob a forma de bolsa de estudo e pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo) sob a forma de auxílio financeiro.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S.; STEFANIDIS, A. *Uncertainty in Image-Based Change Detection*. In: Accuracy 2000, Amsterdam, 2000. Proceedings of Accuracy 2000, Amsterdam, 2000.

BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. *Computer Vision*. New Jersey: Prentice Hall, 1982.

BALTASAVIAS, E. P. Object extraction and revision by image analysis using existing geodata and knowledge: current status and steps towards operational systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v. 58, p. 129-151, 2004.

BAUMGARTNER, A.; STEGER, C.; MAYER, H.; ECKSTEIN, W.; EBNER, H., *Update of road in GIS from aerial imagery: verification and multi-resolution extraction*. In: International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing 1 (Part 3/1), p. 53-58, 1996.

DAL POZ, A. P. *Detecção Automática de Alteração na Malha Viária*. In: XX Congresso Brasileiro de Cartografia, 2001, Porto Alegre-RS. Anais do XX Congresso Brasileiro de Cartografia (CD-ROM), 2001.

DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. *Georeferenced road extraction and formulation of hypotheses for new road segments*. In: SPIE'S 14TH Annual International Symposium on Aerospace/Defense Sensing, Simulation, and Controls - Conference 'Automated Geo-Spatial Image and Data Exploitation', Orlando-FL, EUA, 2000.

- 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.
- FORTIER, M. F. A.; ZIOU, D.; ARMENAKIS, C.; WANG, S. Automated correction and updating of roads databases from high-resolution imagery. *Canadian Journal of Remote Sensing*, v. 27, n. 1, p. 76-89, 2001.
- GEMAEL, C. *Introdução ao Ajustamento de Observações: Aplicações Geodésicas*. Curitiba: Ed. UFPR, 1994. 319 p.
- 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.
- HEIPKE, C. Some Requirements for geographic information systems: a photogrammetric point of view. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, v. 70, n. 2, p. 185-195, 2004.
- JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNK, B. G. *Machine Vision*. New York: McGraw-Hill, 1995. 549 p.
- KLANG, D. *Automatic Detection of Changes in Road Databases Using Satellite Imagery*. In: Proceedings of International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing, v. 32/4, P. 4, p. 293-298, 1998.
- LUGNANI, J. B. *Introdução à Fototriangulação*. Ed. UFPr, 1987. 134 p.
- MACHADO, A. M. L.; MITISHITA, E A.; SANTOS Jr, R. L. S. *Estudo de Caso: Correção de erros sistemáticos em câmaras digitais não métricas*. In: I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Geoinformação – I SIMGEO, 2004, Recife-PE. Anais do I SIMGEO, 2004. CD-ROM.
- MAIA, J. L. *Metodologia para avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais*. 2003. 116 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.
- NEVATIA, R.; BABU, K. R. Linear feature extraction and description. *Computer Graphics and Image Processing*, v. 13, p. 257-269, 1980.
- 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.
- SILVA, M. A. O. *Verificação Automática da Malha Viária Georreferenciada em Imagens Digitais*. 2005. 114 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2005.
- 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.
- 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.; GUILANI, C. D., *Adjustment Computations: Statistics and Least Squares in Surveying and GIS*, New York, 1997. 564 p.