

EXTRAÇÃO DE FEIÇÕES RODOVIÁRIAS EM IMAGENS DIGITAIS: METODOLOGIAS DESENVOLVIDAS PELO GP-F&VC

Road extraction from digital images: methodologies developed by the GP-

F&VC

ALUIR PORFÍRIO DAL POZ

Departamento de Cartografia – FCT/UNESP

Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP

aluir@prudente.unesp.br

RESUMO

Pesquisas diversas em extração de feições vem sendo realizadas nos últimos 6 anos pelo Grupo de Pesquisa em Fotogrametria e Visão Computacional (GP-F&VC). Várias metodologias para a extração semi-automática de rodovias foram desenvolvidas, incluindo técnicas sequenciais e de otimização. O GP-F&VC também vem desenvolvendo metodologias automáticas para a extração de rodovias. Este trabalho apresenta um panorama das pesquisas desenvolvidas pelo GP-F&VC sobre extração de feições rodoviárias em imagens digitais, juntamente com exemplos de resultados obtidos pelas metodologias desenvolvidas.

Palavras-chaves: Extração de rodovia, Programação dinâmica, *Snakes*, Correlação, Teste ativo.

ABSTRACT

Several kinds of research in road extraction have been carried out in the last 6 years by the Photogrammetry and Computer Vision Research Group (GP-F&VC - *Grupo de Pesquisa em Fotogrametria e Visão Computacional*). Several semi-automatic road extraction methodologies have been developed, including sequential and optimization techniques. The GP-F&VC has also been developing fully automatic methodologies for road extraction. This paper presents an overview of the GP-F&VC research in road extraction from digital

images, along with examples of results obtained by the developed methodologies.

Keywords: Road extraction, Dynamic programming, Snakes, Correlation, Active testing.

1 INTRODUÇÃO

O problema de extração de feições em imagens digitais vem sendo alvo de intensa investigação desde a década de 1960. Mais recentemente, também se intensificaram as pesquisas com dados de varredura a laser, fato decorrente do amadurecimento do sistema que integra sensor laser com o GPS (*Global Positioning System*) e o IMU (*Inertial Measurement Unit*). Várias pesquisas em extração de feições vem sendo realizadas, nos últimos 6 anos, por pesquisadores que atuam no Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas da UNESP - Campus de Presidente Prudente, em especial os do Grupo de Pesquisa em Fotogrametria e Visão Computacional (GP-F&VC). O GP-F&VC realiza principalmente pesquisas em extração automática e semi-automática de feições rodoviárias em imagens aéreas e de satélite.

Os métodos semi-automáticos, embora sejam dependentes do auxílio de um operador, realizam toda a tarefa de delineamento do traçado da rodovia, que normalmente é demorada e cansativa. O algoritmo de delineamento pode ser sequencial, caso em que o operador necessita fornecer a posição e a direção em um ponto inicial, ou global, quando o operador necessita fornecer pontos sementes distribuídos esparsa e grosseiramente ao longo da rodovia. Duas metodologias com concepção sequencial foram desenvolvidas. Numa dessas metodologias (Dal Poz, 2001a, 2001b, Dal Poz e Silva, 2002, 2003, Mendes et al., 2004), um ponto do eixo de rodovia, previamente extraído, é linearmente extrapolado, resultando numa posição aproximada. Esta posição é corrigida através da correlação entre perfis de tons de cinza, extraídos transversalmente ao eixo da rodovia. Esta estratégia é então repetida até que todo o eixo da rodovia em consideração seja delineado. Noutra metodologia (Dal Poz et al., 2000, Dal Poz, 2001a, Dal Poz e Vale, 2003, Vale e Dal Poz, 2003, 2004), o princípio de teste ativo é utilizado para extrair aproximadamente o eixo central da rodovia, cuja estratégia baseia-se numa exploração sequencial e local da imagem. Posteriormente, o princípio de bordas anti-paralelas é utilizado para refinar iterativamente o eixo de rodovia extraído previamente. Também foram desenvolvidas duas metodologias de concepção global. Ambas as metodologias baseiam-se na modelagem da rodovia através de funções de energia, cujas soluções são dadas pelo algoritmo de otimização por programação dinâmica (Dal Poz et al., 2000, Dal Poz e Agouris, 2001, Dal Poz e Vale, 2003, Vale e Dal Poz, 2003, 2004) e pela solução da equação diferencial de Euler-Lagrange

de 4ª ordem (Oliveira, 2003). Este último caso é conhecido como solução de contorno ativo ou *snakes*.

O GP-F&VC também vem desenvolvendo uma metodologia totalmente automática para a extração de rodovias (Dal Poz et al., 2004, 2005). Os métodos automáticos tentam evitar totalmente a intervenção humana durante o processo de extração. Basicamente, estes métodos requerem a integração de informação contextual e de conhecimento *a priori* do objeto rodovia. A metodologia desenvolvida pelo grupo extrai toda a malha viária em duas etapas. Numa primeira etapa são extraídos segmentos de rodovia. Na sequência, as segmentos de rodovia são usadas para gerar uma descrição completa da malha viária, consistindo basicamente em conectar as segmentos de rodovia e em reconstruir os cruzamentos de rodovias.

Além das metodologias brevemente descritas acima, outras foram desenvolvidas a partir delas. Um exemplo relevante é a que extrai automaticamente rodovias georreferenciadas usando programação dinâmica (Silva, 2005). Além da aplicação natural desta metodologia na atualização automática da malha viária, também pode ser aplicada no refinamento geométrico e na correção de erros sistemáticos de rodovias preexistentes numa base de dados.

Este trabalho apresenta um panorama das pesquisas desenvolvidas e em desenvolvimento pelo GP-F&VC sobre extração de feições rodoviárias em imagens digitais, incluindo-se ainda alguns exemplos de resultados obtidos pelas metodologias desenvolvidas. A Seção 2 apresenta as metodologias semi-automáticas. As metodologias automáticas são apresentadas na Seção 3. O artigo é finalizado na Seção 4 com a apresentação de algumas considerações finais.

2 METODOLOGIAS SEMI-AUTOMÁTICAS

Os modelos e estratégias para a extração de rodovia dependem em essência dos seguintes fatores: 1) Tipo de cena: rural ou urbana; 2) Resolução da imagem: alta-resolução (pixels menores que 0,7 m ou rodovias com largura superior a 7 pixels), média-resolução (pixels no intervalo [0,7 m; 2,0 m] ou rodovias com larguras entre 4 pixels e 6 pixels) e baixa-resolução (pixels maiores que 2,0 m ou rodovias com larguras entre 1 pixel e 3 pixels); e 3) Uso de dados externos: mapas preexistentes e pontos segmentos fornecidos por um operador.

As metodologias semi-automáticas são caracterizadas pela interferência de um operador, que reconhece a rodovia de interesse e mede sobre as mesmas alguns pontos segmentos necessários para a inicialização do processo de extração. Portanto, a tarefa de delineamento geométrico, que normalmente é demorada e cansativa, fica a cargo do algoritmo computacional. O algoritmo de delineamento pode ser sequencial, caso em que o operador necessita fornecer a

posição e a direção em um ponto inicial, ou global, quando o operador necessita fornecer pontos sementes distribuídos esparsa e grosseiramente ao longo da rodovia.

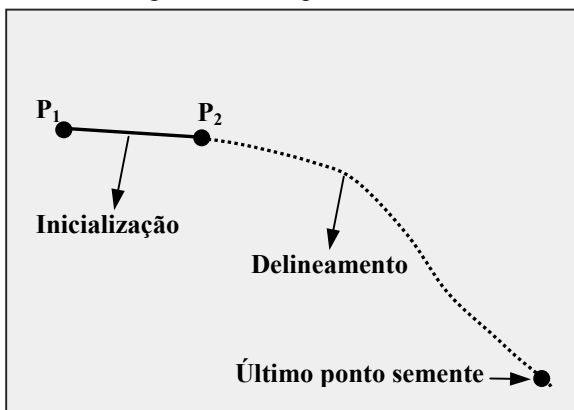
2.1 Controle Sequencial

O GP-F&VC desenvolveu duas metodologias com controle sequencial. Uma dessas metodologias baseia-se em técnicas de correlação e a outra nos princípios de teste ativo e análise de bordas anti-paralelas.

2.1.1 Delineador Baseado em Técnicas de Correlação

Como mostra a figura 1 (Mendes, 2005), o método é inicializado através de dois pontos sementes (P1 e P2), medidos em um trecho aproximadamente reto da rodovia. O delineamento combina técnicas de extrapolação linear e correlação entre perfis de tons de cinza extraídos transversalmente à rodovia. Um outro ponto semente é usado para informar onde o processo de delineamento deve parar.

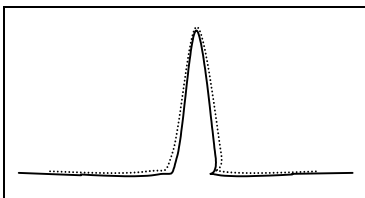
Figura 1 - Princípio do método.



Os dois pontos iniciais permitem definir um segmento de inicialização, ao longo do qual são extraídos vários perfis transversais de tons de cinza. A partir destes perfis é calculado um perfil médio, denominado perfil modelo. O delineamento do trecho desconhecido da feição linear inicia no ponto P2, através da extrapolação linear desse ponto a um pequeno passo adiante, resultando numa posição aproximada. Esta posição é refinada através de uma técnica de correlação, valendo-se de um novo perfil de tons de cinza extraído transversalmente ao pequeno segmento extrapolado. Este último perfil é denominado perfil medido e deve ser um pouco maior para possibilitar a aplicação da técnica de correlação. O perfil modelo é representado pela linha

pontilhada e o perfil medido pela linha cheia (figura 2). O objetivo do processo de correlação é encontrar a melhor correspondência entre ambos os perfis.

Figura 2 - Princípio do processo de correlação.



Como mostra a figura 2, o refinamento do ponto extrapolado é realizado através de um procedimento de correlação unidimensional, valendo-se de alguma função de correlação. Em Mendes (2005), utilizou-se a função erro quadrático, que tem como característica desejável o fornecimento da posição de melhor correlação com maior exatidão, sendo expressa matematicamente por:

$$S(j) = \frac{1}{2.n_{\text{mod}} + 1} \sum_{i=1}^{i=2.n_{\text{mod}}+1} (A(i) - B(i + j))^2 \quad (1)$$

onde:

- A é um vetor com $2.n_{\text{mod}} + 1$ elementos representando o perfil modelo, sendo n_{mod} o número de pontos amostrados em cada lado da feição linear;
- B é um vetor com $2.n_{\text{med}} + 1$ elementos representando o perfil medido, sendo n_{med} o número de pontos amostrados em cada lado da feição linear;
- $0 \leq j \leq 2.(n_{\text{med}} - n_{\text{mod}})$ é um contador que permite a realização das $2.(n_{\text{med}} - n_{\text{mod}}) + 1$ possíveis comparações entre ambos os perfis.

A posição de melhor correlação entre ambos os perfis é encontrada quando o coeficiente de correlação $S(j)$ for mínimo. A posição corrigida do eixo da rodovia é dada pelas coordenadas do elemento do perfil medido correspondente ao ponto central do perfil modelo (figura 2).

Figura 3 - Exemplo de resultado obtido pelo método em uma imagem de baixa-resolução.



A estratégia descrita é repetida até que o ponto de parada seja alcançado. Um exemplo é mostrado na figura 3, na qual se pode ver uma imagem de baixa resolução com uma rodovia em forma linear. O método é inicializado na parte superior por dois pontos e o processo de delineamento é finalizado com um ponto localizado na borda inferior da imagem.

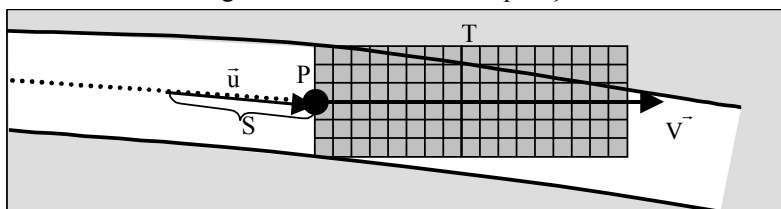
2.1.2 Delineador Baseado em Teste Ativo e Análise de Bordas

Esta metodologia (Dal Poz e Silva, 2002, 2003) tem o mesmo princípio básico da metodologia descrita na subseção anterior, diferenciando-se pelos mecanismos empregados nas etapas de extrapolação e extração de um ponto do eixo de rodovia. A extrapolação de um ponto do eixo de rodovia um passo adiante é realizada através de uma estratégia conhecida como *teste ativo*. A estratégia de teste ativo pode ser definida como o processo em que uma imagem é explorada sequencialmente para extrair informações que possibilitem a

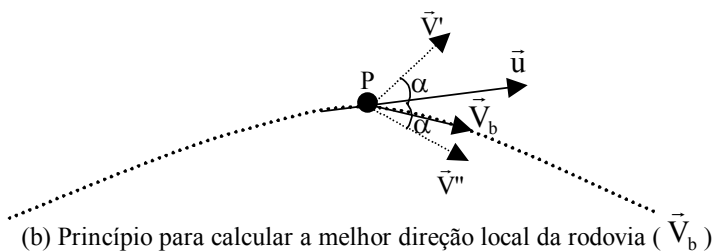
identificação de um ou mais objetos, cujos modelos encontram-se armazenados em uma biblioteca de objetos (por exemplo, rodovias, viadutos, edifícios etc.) (Dal Poz e Silva, 2003). O ponto extrapolado é então usado por um modelo de bordas para obter uma posição mais acurada para o mesmo ponto. Em caso de falha, o modelo de trajetória é novamente usado para mover o ponto extrapolado mais um passo adiante, onde nova tentativa de extração é realizada pelo modelo de bordas. No caso das falhas excederem um limiar pré-definido, o processo de extração é interrompido. As causas para ocorrência de falhas são várias, como, por exemplo: grandes obstáculos ou sombras, baixo contraste da rodovia em relação as adjacências e, até mesmo, o final da rodovia.

A solução para a extrapolação, inspirada no princípio de teste ativo, é bastante robusta, pois permite analisar as informações situadas adiante do último ponto extraído, possibilitando um melhor tratamento das irregularidades presentes na rodovia e nas adjacências. O princípio desta solução pode ser visto na Figura 4.

Figura 4 – Processo de extrapolação.



(a) Definição do *template* T



(b) Princípio para calcular a melhor direção local da rodovia (\vec{V}_b)

O cálculo da melhor direção local no último ponto extraído (P) é realizado através do *template* T (Figura 4(a)). Este *template* é uma matriz de m linhas e n colunas. A fim de que T coincida localmente com a rodovia, o lado menor (m) é escolhido aproximadamente igual à largura média da rodovia, previamente fornecida pelo operador, e o lado maior (n) é tomado duas ou três vezes maior que m. Os n.m elementos de T são reamostrados através de algum interpolador de tons de cinza. T pode girar em torno do ponto P.

A melhor direção local (\vec{V}_b) é calculada em duas etapas. Na primeira etapa é calculada a direção aproximada (\vec{u}) através do ajustamento de uma linha reta ao conjunto (S) dos últimos pontos extraídos (Figura 4(a)). A melhor direção local (\vec{V}_b) é calculada na segunda etapa através da rotação de T em pequenos passos, α graus no sentido anti-horário e o mesmo arco no sentido horário, tendo o vetor \vec{u} como origem. Para calcular a direção em que ocorre a melhor coincidência local de T com a rodovia, uma medida de similaridade deve ser definida. Em Dal Poz et al. (2000) foi proposta uma medida de similaridade (M) refletindo duas propriedades básicas da entidade rodovia, isto é: 1- uma rodovia geralmente aparece na imagem mais clara que as adjacências; e 2- é localmente homogênea. Define-se, então:

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T^2(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(x_i, y_j) - T_M]^2} \quad (2)$$

onde,

- $T(m \times n)$ é uma matriz (*template*) de níveis de cinza reamostrados;
- (x_i, y_j) , $i = 1, \dots, m$ e $j = 1, \dots, n$, são os elementos de T;
- T_M é o nível de cinza médio de T.

A posição de melhor coincidência de T com a rodovia ocorre quando M for máxima, cuja orientação é a melhor direção local da rodovia (\vec{V}_b). Tomando-se \vec{V}_b como um vetor unitário, o ponto P(x,y) pode ser extrapolado *dt pixels* adiante, como segue:

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = dt \vec{V}_b + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (3)$$

O ponto extrapolado P'(x',y') é usado pelo modelo de bordas para extrair um novo ponto do eixo da rodovia. O princípio deste modelo é bastante simples, consistindo na extração de pontos de borda de rodovia ao longo de uma seção transversal ao vetor \vec{V}_b , tomada em P'. Os pontos de borda de rodovia assim obtidos são usados para interpolar uma posição acurada para o eixo de rodovia. Sempre que o modelo de bordas falhar, isto é, quando pontos de borda de rodovia não forem extraídos, o *template* T é transladado para P' e um novo cálculo de \vec{V}_b é realizado, seguido de um novo passo de extrapolação através

da equação 3. A figura 5 mostra um resultado obtido usando uma imagem gerada artificialmente.

Figura 5 - Resultado obtido com dados artificiais.



2.2 Controle Simultâneo

Estes métodos trabalham com alguma forma de modelagem simultânea do contorno da feição linear, tendo por base alguns pontos sementes grosseira e esparsamente distribuídos ao longo da mesma. Alguma função matemática, conhecida como função custo ou de energia, é necessária para viabilizar o delineamento da feição linear de interesse. Duas soluções baseadas neste conceito, conhecidas como snakes (ou contorno ativo) e programação dinâmica, se popularizaram nas mais variadas comunidades científicas ligadas a problemas de análise de imagem. Estas técnicas são apresentadas a seguir, dentro do contexto de extração de feições rodoviárias, juntamente com exemplos ilustrativos.

2.2.1 Snakes

Snakes ou contorno ativo é um modelo deformável de segunda ordem, com parametrização unidimensional (o comprimento s da curva) e com 2 graus de liberdade de deformação, isto é, as coordenadas planas da curva $x(s)$ e $y(s)$ (Oliveira, 2003). Sendo ζ uma curva plana que age como um modelo deformável sobre uma imagem digital, representada por uma função vetorial $v(s) = (x(s), y(s))$ que mapeia o parâmetro s pertencente ao intervalo $[a, b]$ para os pontos $(x(s), y(s))$ na imagem digital, a energia de deformação da *snakes* é expressada por (Oliveira, 2003):

$$E(v) = \int_a^b (w_1(s)|v_s(s)|^2 + w_2(s)|v_{ss}(s)|^2) ds + \int_a^b w(s)P(v(s)) ds = \lambda E_{\text{int}}(v) + (1 - \lambda) E_{\text{ext}}(v) \quad (4)$$

onde,

- E_{int} é a energia interna da *snakes*;
- E_{ext} é a energia externa da *snakes*;

- λ é o parâmetro que controla a importância relativa dos termos E_{int} e E_{ext} ;
- v_s é a primeira derivada da função v em relação ao parâmetro s ; v_s é conhecido como termo de 1ª ordem e é responsável pelo controle da suavidade da *snakes*;
- v_{ss} é a segunda derivada da função v em relação ao parâmetro s ; v_{ss} é conhecido como termo de 2ª ordem e é responsável pelo controle de rigidez da *snakes*;
- $P(v(s))$ é uma função penalidade;
- $w_1(s)$ e $w_2(s)$ são respectivamente os pesos dos termos de 1ª e 2ª ordem;
- $w(s)$ é o peso da função penalidade.

O primeiro termo (ou primeira integral) da equação 4 está relacionado com a energia interna $E_{\text{int}}(v)$ da *snakes*, responsável pelo controle dos parâmetros de elasticidade e rigidez da curva, através dos termos de primeira e de segunda ordem, respectivamente, cujos pesos $w_1(s)$ e $w_2(s)$ controlam a importância relativa de ambos os termos. O termo de primeira ordem sugere um comportamento da *snakes* segundo uma membrana elástica, onde as forças aplicadas sobre o contorno geram deformações que deixam de existir quando estas forças são removidas. O termo de segunda ordem sugere um comportamento semelhante a uma haste ou placa fina, onde a rigidez inerente evita que a *snakes* se dobre. De uma forma geral, à medida que a razão $w_1(s)/w_2(s)$ varia de zero ao infinito, a curva *snakes* varia de uma *spline* cúbica a uma linha poligonal.

O parâmetro λ , proveniente dos pesos $w_1(s)$, $w_2(s)$ e $w(s)$, é o parâmetro de balanceamento entre as energias interna e externa. O parâmetro λ assume valores no intervalo $[0;1]$. Quando $\lambda \approx 1$, o modelo produz soluções pouco sensíveis aos ruídos da imagem e, do contrário, quando o valor de λ for próximo ou igual a zero, o modelo produz uma solução que é eficiente na captura das feições de interesse a serem extraídas, mas ao mesmo tempo torna-se também muito vulnerável aos ruídos da imagem.

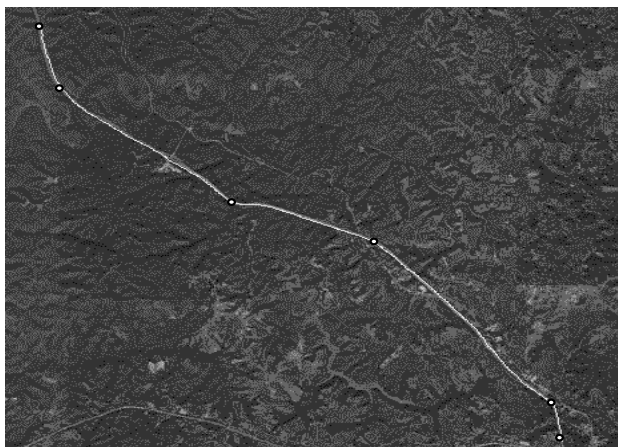
O termo $w(s)P(v(s))$ é responsável pela atração da curva *snakes* por parte da feição de interesse utilizando a energia da imagem, isto é, a energia externa ($E_{\text{ext}}(v)$). $E_{\text{ext}}(v)$ depende do tipo de feição a ser extraída. Quando a feição a ser extraída tem característica de linha, adota-se a soma dos quadrados

dos níveis de cinza $G(x(s), y(s))$ dos pontos $v(s)$, multiplicada por uma constante w_{line} , que é positiva para linhas claras e negativa para linhas escuras, isto é (considerando $G(x(s), y(s))$ contínua):

$$E_{line}(v) = \int_a^b P_{line}(v(s)) ds = w_{line} \int_a^b G^2(x(s), y(s)) ds \quad (5)$$

A solução da equação 4 é a função vetorial $v(s)$ que a minimiza. A figura 6 mostra um exemplo da aplicação da metodologia a uma imagem de baixa-resolução. Esta imagem mostra uma rodovia de aproximadamente 1 a 2 pixels de largura, podendo então ser modelada como uma feição linear. O resultado e os pontos sementes utilizados são mostrados na imagem.

Figura 6 - Exemplo da aplicação da curva *snakes*.



2.2.2 Programação Dinâmica

Programação dinâmica é uma metodologia para resolver problemas de otimização, sendo vantajosa quando a função custo envolvida no problema apresentar poucas variáveis interrelacionadas simultaneamente. Como esta metodologia depende de uma aproximação inicial e grosseira da feição linear, é necessário que um operador forneça alguns pontos sementes ao longo da mesma. Este procedimento dá origem a uma linha poligonal inicial, a ser refinada iterativamente.

Apresenta-se a seguir os princípios de uma metodologia específica para a extração de rodovias em imagens de baixa-resolução, como imagens SPOT com 10 m de resolução geométrica (Dal Poz et al., 2000). Entretanto, esta

metodologia pode ser aplicada para extração de outras feições lineares, desde que estas sejam, pelo menos, geometricamente suaves.

Um modelo genérico de rodovia pode ser formulado com base em propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia. Considerando que uma rodovia pode ser representada (Figura 7) 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,

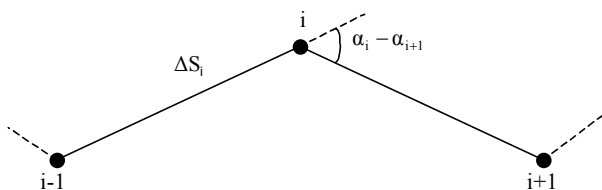
$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((Ep_1 - \beta Ep_2 + \gamma Ep_3) [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta S_i) = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (6)$$

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, \quad i = 1, \dots, n-1 \quad (7)$$

onde:

- E : corresponde à função objetivo (equação 6), 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 7), também é denominada de injunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema, pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_i < T$, sendo T um limiar;
- Ep_1 , Ep_2 e Ep_3 : parâmetros representando propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$: ângulo de deflexão no vértice i (Figura 7);
- ΔS_i : distância entre os vértices $i-1$ e i (Figura 7); e
- β e γ : são constantes positivas.

Figura 7 - Linha poligonal representando a rodovia.



O que torna a função objetivo passível de ser resolvida eficientemente pelo algoritmo de programação dinâmica é sua estrutura que, como mostra sua forma matemática (equação 6), pode ser expressa na forma de uma soma de componentes dependendo apenas de três vértices sucessivos da linha poligonal descritora da rodovia. Em outras palavras, apenas 6 variáveis (coordenadas planas de três vértices vizinhos) estão inter-relacionados simultaneamente. Assim, o algoritmo de otimização por programação dinâmica pode ser usado

para resolver o problema de forma seqüencial, sem a necessidade de considerar todas as variáveis envolvidas no problema. Esta estratégia garante a obtenção do máximo global da função objetivo (equação 6), com um custo computacional bastante atrativo. Assim, a linha poligonal ótima corresponde ao máximo da função objetivo. Detalhes do algoritmo de programação dinâmica estão fora do escopo deste trabalho, mas podem ser encontrados, por exemplo, em Vale (2003).

Figura 8 - Resultados obtidos com uma imagem de baixa-resolução.



A figura 8 mostra o resultado obtido a partir da aplicação da metodologia acima a uma imagem aérea de baixa-resolução.

3 METODOLOGIAS AUTOMÁTICAS

O GP-F&VC desenvolveu duas metodologias para a extração automática de rodovias. Uma dessas metodologias não utiliza nenhuma informação externa. Uma outra utiliza as rodovias presentes numa base de dados para extraí-las numa imagem.

3.1 Extração Automática de Rodovias sem o Uso de Dados Externos

Esta metodologia (Dal Poz et al., 2004, 2005) resolve o problema de extração automática de rodovias em imagens digitais de média- e alta- resolução em duas etapas principais. Na primeira etapa são extraídas sementes de rodovia, tratando-se de uma representação fragmentada da malha viária. Basicamente são usados conhecimentos de caráter geométrico e radiométrico sobre a malha

viária. Portanto, é nesta etapa que a malha viária é reconhecida, necessitando ainda de complementação. Estratégias de complementação automática são então usadas na segunda etapa do método, compreendendo a conexão entre sementes de rodovia e a reconstrução de cruzamentos de rodovia.

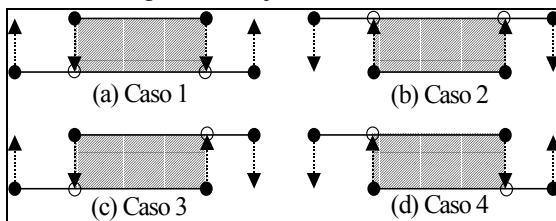
3.1.1 Extração de Sementes de Rodovia

A extração de sementes de rodovia baseia-se num conjunto de quatro objetos semânticos de rodovia e num outro conjunto de regras de conexão entre objetos semânticos. Cada semente de rodovia é composta de uma sequência de objetos semânticos de rodovia conectados, sendo que geometricamente cada sequência desse tipo pode ser estruturada como uma cadeia de quadriláteros justapostos.

Os objetos semânticos são definidos a partir de segmentos de reta opostos, aproximadamente paralelos, de duas linhas poligonais compatíveis com bordas de rodovia. O processo de extração de linhas poligonais baseia-se em várias etapas sequenciais, isto é: a detecção e o afinamento de bordas, a geração de listas ordenadas de pixels de borda e a geração propriamente dita de linhas poligonais. Devido à limitação de espaço e, também, ao fato destas etapas serem básicas em processos de extração de feições, remete-se os assuntos inerentes à literatura específica, como, por exemplo, Jain et al. (1995).

A figura 9 mostra os quatro objetos semânticos encontrados em qualquer segmento de rodovia. Na construção de um objeto semântico, o segmento de reta inferior é denominado *base* e o superior *candidato*. Para cada um dos quatro casos, os pontos extremos de ambos os segmentos de reta (pequenos círculos pretos na figura 9) são projetados ortogonalmente de um para outro, sendo que dois pontos projetados são locados (pequenas circunferências na figura 9) entre os pontos extremos do segmento oposto. Por exemplo, na figura 9(a) os pontos extremos do segmento de reta candidato são projetados ortogonalmente em dois pontos do segmento de reta base. O inverso ocorre com o caso 2 (figura 9(b)). Já em relação aos casos 3 e 4, respectivamente ilustrados na figura 9(c) e na figura 9(d), os pontos projetados são locados de forma alternada, isto é um no segmento base e o outro no candidato e vice-versa. Em todos os casos, dois pontos extremos dos segmentos base e/ou candidato e dois pontos projetados nos segmentos base e/ou candidato, são combinados para formar quadriláteros bastante próximos da forma de um retângulo. Os quadriláteros definidos nos quatro objetos semânticos são visualizados na figura 9 como áreas hachuradas. O eixo de cada quadrilátero, definido pelos dois pontos médios dos pares de vértices do quadrilátero que definem lados transversais à rodovia, coincide com um pequeno segmento de eixo de rodovia.

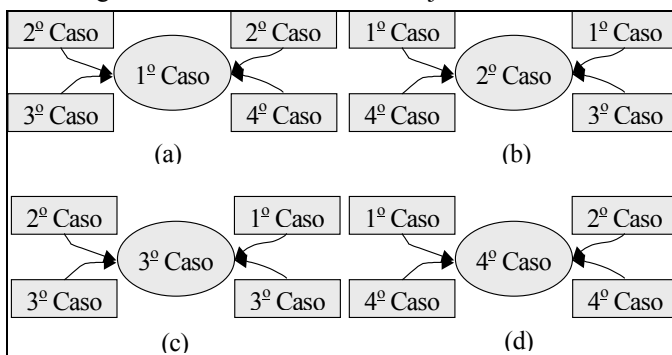
Figura 9 - Objetos semânticos.



A grande dificuldade da metodologia para construção de objetos semânticos é a identificação de pares de linhas poligonais que delimitam regiões compatíveis com rodovia. A construção dos quatro objetos semânticos baseia-se num conjunto de regras relacionadas com conhecimentos *a priori* sobre rodovia (Dal Poz et al., 2005).

A figura 10 mostra quais são as possíveis conexões à direita e à esquerda dos objetos semânticos. Todas estas possíveis conexões devem ser analisadas sob o ponto de vista de encaixe geométrico dos objetos semânticos mostrados na figura 9. A figura 10(a) mostra que se um objeto semântico do 1º caso for extraído, espera-se extrair os objetos semânticos dos 2º e 3º casos à esquerda. O 2º caso pode ser encontrado novamente à direita, juntamente com o 4º caso. O 2º caso se conecta à esquerda com os 1º e 4º casos e à direita com os 1º e 3º casos. Nota-se que os 3º e 4º casos se auto conectam tanto a direita quanto à esquerda.

Figura 10 - Conexões entre os objetos semânticos.

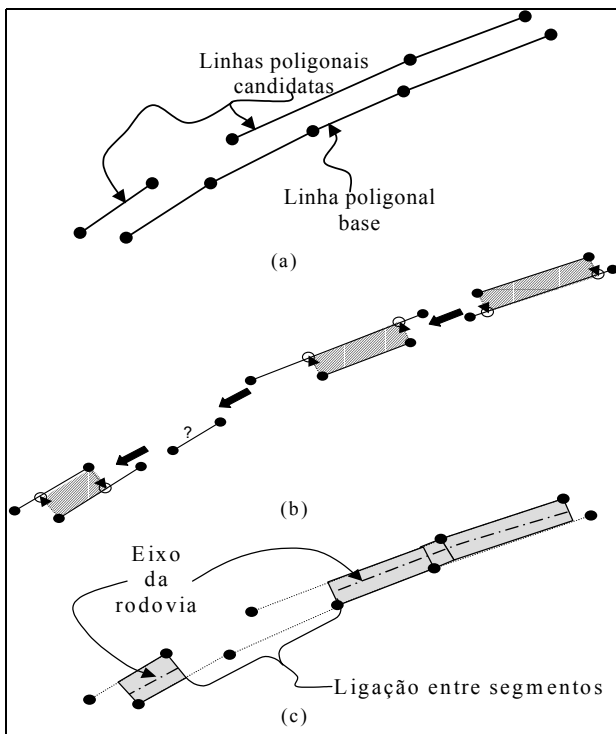


A extração automática de sementes de rodovia, através da conexão de objetos semânticos, baseia-se então na combinação entre pares de linhas poligonais previamente extraídas. À medida que os objetos semânticos vão sendo extraídos, os mesmos são conectados, possibilitando a formação de uma

cadeia de quadriláteros justapostos, denominada segmento de rodovia ou, também, semente de rodovia.

A figura 11 mostra um exemplo ilustrativo, bastante simples, onde se tem uma linha poligonal base compatível com duas linhas poligonais candidatas (figura 11(a)). O processo de extração e agrupamento de objetos semânticos é mostrado nas figura 11(b) e 11(c), respectivamente. Supondo que a linha poligonal base (figura 11(a)) é combinada da direita para a esquerda, dois objetos semânticos são gerados pela combinação com a primeira linha poligonal candidata (figura 11(b)). A conexão destes dois objetos semânticos gera uma primeira semente de rodovia (figura 11(c)) que, por sua vez, pode ser segmentada em três quadriláteros justapostos. Os vértices dos quadriláteros permitem a definição do eixo da rodovia. A combinação da linha poligonal base com a 2ª candidata (figura 11(a)) permite gerar uma segunda semente de rodovia, constituída apenas de um quadrilátero (figura 11(c)).

Figura 11 - Exemplo ilustrativo de extração de sementes de rodovia. (a) Linhas poligonais base e candidatas; (b) Extração de objetos semânticos; e (c) Sementes de rodovia.



3.1.2 Complementação da Malha Viária

A complementação da malha viária visa reconstruir as conexões entre as sementes de rodovia, tanto ao longo das rodovias quanto nos cruzamentos delas.

O problema de conexão entre sementes ao longo das rodovias pode ser resolvido a partir da análise dos quadriláteros extremos das sementes de rodovia. Na realização desta tarefa, o procedimento básico é selecionar uma semente de rodovia e buscar à vante e à ré outras sementes de rodovia que podem ser seqüencialmente integradas, resultando em segmentos de rodovia maiores, só desconectados nos cruzamentos de rodovia. A primeira semente deve ser a maior possível, procedimento que reduz a probabilidade de se iniciar com uma falsa semente. Após a seleção da primeira semente, o processo de conexão busca à vante e à ré por sementes que satisfaçam os seguintes critérios: 1- tomando uma semente como referência, seleciona-se uma outra semente, com a condição de que uma de suas extremidades (ou quadriláteros extremos) seja a mais próxima de uma das extremidades da semente de referência; e 2- estas extremidades devem também ser suficientemente próximas e colineares. Sempre que uma conexão válida for detectada, o espaço entre ambas as sementes é preenchido através da inserção de um quadrilátero de dimensões adequadas. Isto significa que a rodovia é assumida como reta no espaço compreendido entre duas sementes, selecionadas com base nos dois critérios acima.

A estratégia brevemente descrita tem duas dificuldades básicas. Uma primeira está relacionada com a presença de falsos positivos que podem ser aceitos pelos critérios de conexão. Neste caso, quando houver mais de uma candidata a uma conexão, a semente correta é aquela que melhor concorda com as características locais da rodovia na imagem. A segunda dificuldade ocorre com os cruzamentos de rodovia, visto que duas sementes de rodovia não podem ser simplesmente conectadas ao longo de regiões de cruzamentos de rodovia. Assim, a verificação de evidência da presença de cruzamentos de rodovias é necessária durante a realização do processo de conexão.

A metodologia desenvolvida para a extração de cruzamentos de rodovia baseia-se nos resultados gerados pela metodologia de conexão de sementes de rodovia. Primeiramente os eixos de rodovia são usados para calcular posições aproximadas para os cruzamentos de rodovia, denominadas pontos de referência de cruzamentos de rodovia. A posição de cada ponto de referência é calculada com base em dois critérios, um geométrico e outro radiométrico. Pelo critério geométrico, inicialmente são calculadas todas as possíveis intersecções entre eixos de rodovia não colineares, cujas extremidades estejam suficientemente próximas. Deste processo resultam agrupamentos de pontos, a partir dos quais são calculados os centros geométricos, isto é, os pontos de referência de cruzamentos de rodovia. O critério radiométrico é, em essência, uma verificação

de consistência entre o nível de cinza médio de uma vizinhança do ponto de referência e o nível de cinza esperado para um ponto de rodovia.

Os pontos de referência permitem a identificação dos quadriláteros extremos de sementes conectadas de rodovia, mais próximos dos respectivos cruzamentos de rodovia. Estes quadriláteros são elementos importantes na definição de cruzamentos de rodovias, já que estes podem ser genericamente definidos como áreas irregulares, limitadas por bordas e por quadriláteros mais próximos de cruzamentos de rodovia. Assim, o objetivo da metodologia de extração de cruzamentos de rodovias é extrair polígonos delimitando as respectivas áreas de cruzamento, conforme definição acima. A figura 12 apresenta um exemplo da aplicação da metodologia automática para a extração automática da malha viária a uma imagem de média-resolução.

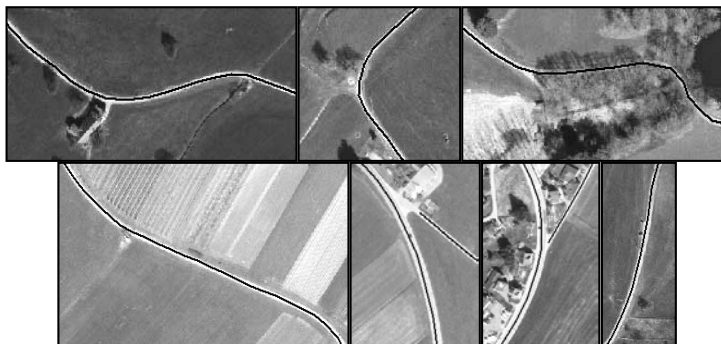
Figura 12 - Resultado obtido com uma imagem de média resolução.



3.2 Extração Automática de Rodovias Georreferenciadas

Em Silva (2005) foi proposta uma solução para o problema de extração automática da malha viária georreferenciada em imagens aéreas digitais. O método baseia-se na metodologia para a extração de rodovias baseada no algoritmo de programação dinâmica (Subseção 2.2.2). Neste caso, o processo de extração é inicializado automaticamente através de rodovias georreferenciadas numa base de dados preexistente. Primeiramente são extraídos automaticamente pontos salientes descrevendo grosseiramente a forma, a posição, e a topologia das rodovias georreferenciadas. Os pontos salientes são então projetados na imagem de entrada, possibilitando a geração de pontos sementes para a inicialização automática da metodologia. A figura 13 mostra um exemplo da aplicação desta metodologia a uma imagem de alta-resolução.

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



4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este artigo apresentou uma visão geral dos principais métodos para a extração de feições, desenvolvidos e em desenvolvimento pelo GP-F&VC. Os resultados obtidos pelas diferentes metodologias vêm sendo avaliados através de procedimentos numéricos desenvolvidos no GP-F&VC (Maia, 2003). A percepção atual sobre o estágio de desenvolvimento de metodologias para a extração algorítmica de feições cartográficas, é de que ainda não se chegou a soluções que possam claramente substituir os correspondentes procedimentos manuais. Portanto, é provável que o problema de extração automática de feições ainda permaneça, por um bom número de anos, como um dos grandes desafios a resolver em Fotogrametria. A tendência atual do GP-F&VC é direcionar as pesquisas para extração da malha viária em ambiente urbanos, com a combinação de dados de vários sensores, incluindo aqueles provenientes de varredura a laser e imagens multiespectrais, aéreas e de satélite.

5 AGRADECIMENTOS

Todas as pesquisas desenvolvidas pelo GP-F&VC tiveram intenso apoio da FAPESP, CAPES e CNPq.

6 REFERÊNCIAS

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

- programming optimization and a cooperative road follower*. The Photogrammetric Journal of Finland, v. 17, n. 2, 2001a. p. 13-22.
- DAL POZ, A. P. *Extração semi-automática de rodovias através de uma metodologia cooperativa*. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 7, n. 1, 2001b. p. 41-52.
- DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. *Um algoritmo de otimização global para a extração de rodovias em imagens digitais*. Revista Brasileira de Cartografia, n. 53, 2001. p. 65-72.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. *Active testing and edge analysis for road centreline extraction*. In: ISPRS Commission III Symposium 'Photogrammetric Computer Vision', Graz, Austria. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, 2002. p. 44-47.
- DAL POZ, A. P. VALE, G. M. *Dynamic programming approach for semi-automated road extraction from medium- and high-resolution images*. In: Ebner, H.; Heipke, C.; Mayer, H.; Pakzad, K. (Orgs.). Hannover, Alemanha, v. 34, 2003. p. 87-92.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. *Road segment delineation using active testing principle and an edge-based post-processing strategy*. Journal of Geomatica, v. 57, n. 4, 2003. p. 399-410.
- DAL POZ, A. P.; VALE, G. M.; ZANIN, R. B. *Automated road segment extraction by grouping road objects*. In: XXTH ISPRS CONGRESS, 2004, Istanbul, Turquia. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, v. 34, 2004. p. 436-439.
- DAL POZ, A. P.; ZANIN, R. B.; VALE, G. M. *Automated Extraction of Road Network from Medium- and High-resolution Images*. Pattern recognition and image analysis, v. 15, n. 4, 2005 (In Press).
- JAIN, R.; KASTURI, R.; SCHUNCK, B.G. *Machine Vision*. MIT Press and McGraw-Hill, New York, USA, 1995.
- MAIA, J. L. *Avaliação de rodovias extraídas computacionalmente em imagens digitais*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT/Unesp, Campus de Presidente Prudente, 2003. 105p.
- MENDES, T. S. G.; FAZAN, A. J.; DAL POZ, A. P. *Delineamento de estradas vicinais usando técnicas de correlação de imagem*. Boletim de Ciências Geodésicas, v. 10, n. 2, 2004. p. 159-176.
- MENDES, T. S. G. *Extração Semi-automática de Feições em Imagens Digitais Usando Técnicas de Correlação e o Princípio de Teste Ativo*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT/Unesp, Campus de Presidente Prudente, 2005. 107p.

- OLIVEIRA, R. M. S. *Extração de rodovias usando Snakes*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT/Unesp, Campus de Presidente Prudente, 2003. 82p.
- SILVA, M. A. O. *Verificação Automática da Malha Viária Georreferenciada em Imagens Digitais*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT/Unesp, Campus de Presidente Prudente, 2005. 114p.
- VALE, G. M. *Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica*. Dissertação de Mestrado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas, FCT/Unesp, Campus de Presidente Prudente, 2003. 115p.
- VALE, G. M.; DAL POZ, A. P. *Metodologia modificada de programação dinâmica para a extração acurada do eixo de rodovia em imagens digitais*. Revista Brasileira de Cartografia, v. 55, n. 1, 2003. p. 11-20.
- VALE, G. M.; DAL POZ, A. P. *Dynamic programming approach for road centerline extraction from digital images*. Journal of Geomatica, v. 58, n. 4, 2004. p. 287-295.

(Recebido em agosto/05. Aceito em outubro/05.)