

## Extração automática da malha viária em imagens de média e alta resolução de cenas rurais

Aluir Porfírio Dal Poz  
Rodrigo Bruno Zanin  
Giovane Maia do Vale

Universidade Estadual Paulista - UNESP  
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas  
R. Roberto Simonsen, 305 - 19060-900 - Presidente Prudente - SP, Brasil  
{aluir, zanin, gmvale}@prudente.unesp.br}

**Abstract.** This paper presents an automatic methodology for road network extraction from medium- and high-resolution images. It is based on two steps. In the first step road seeds are extracted using a set of four road objects and another set of connection rules among road objects. Each road object is a local representation of an approximately straight road segment. In the second step, two strategies for road network completion are applied in order to generate the complete road network. The first strategy is based on two basic perceptual grouping rules, i.e., proximity and collinearity rules, which allow the sequential reconstruction of gaps between every pair of disconnected road seeds. The second strategy for road completion aims at reconstructing road crossings. Firstly, the road centrelines are used to find reference points for road crossings, which are approximate positions for them. Then, these points are used to extract polygons representing the contours of road crossings. This paper presents the proposed methodology and experimental results.

**Palavras-chave:** road seeds, perceptual grouping, road crossing, sementes de rodovia, agrupamento perceptivo, cruzamento de rodovia.

### 1. Introdução

A aquisição de informações espaciais através de técnicas fotogramétricas tem sido tradicionalmente realizada pela extração manual de feições cartográficas em imagens com escalas no intervalo entre 1:3.000 e 1:90.000 (Sowmya e Trinder, 2000). Embora esta estratégia seja eficiente sob o ponto de vista de acurácia e confiabilidade, é também bastante morosa e dispendiosa. Isto certamente impõe limites na densidade, resolução e ciclos de revisão de informações espaciais que podem ser extraídas pelos atuais sistemas fotogramétricos digitais. Estes sistemas vêm permitindo o desenvolvimento de novas técnicas automáticas e semi-automáticas para a aquisição e atualização de informações espaciais, diminuindo cada vez mais a dependências de um operador humano.

No contexto acima, a extração da malha viária tem sido um importante tópico de pesquisa. Provavelmente, algumas metodologias semi-automáticas já podem ser incorporadas em sistemas fotogramétricos operacionais. A situação é bem diferente em relação aos métodos automáticos, que estão ainda longe de uma estado maduro para se tornarem tecnologias de aquisição de informações espaciais.

A maior parte das metodologias encontradas na literatura é de concepção semi-automática. Neste caso, cabe ao operador a realização das tarefas de alto nível (por exemplo, o reconhecimento da feição rodovia e fornecimento de alguns pontos sementes) e ao algoritmo computacional a realização do delineamento geométrico, que normalmente é cansativa e morosa. Estratégias baseadas em contorno ativo ou *snakes* (Kass et al. 1987, Neuenschwander et al., 1997, Gruen e Li, 1997, Agouris et al., 2000) e em otimização por programação dinâmica (Merlet e Zerubia, 1996, Gruen e Li, 1997, Dal Poz e Vale, 2003) são exemplos de metodologias semi-automáticas.

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. Um exemplo sofisticado é encontrado em Baumgartner et al. (1999), em que contexto, técnicas de agrupamento perceptivo e diferentes resoluções são usados para extrair a malha viária em imagens de alta resolução. Um outro método para a extração automática da malha viária, mas específico para imagens de baixa resolução, é descrito em Wang e Trinder (2000). Basicamente, o método usa técnicas de detecção e extração de linhas para encontrar as candidatas às rodovias e conhecimento *a priori* sobre malha viária para eliminar as falsas rodovias.

Este artigo tem por motivação o grande desafio atual de desenvolvimento de metodologias eficientes para a aquisição de informações a partir de imagens aéreas e de satélite, o que aliás vem ganhando cada vez mais importância pela crescente disponibilidade de imagens, principalmente de satélite. Assim, neste artigo é proposta (Seção 2) uma metodologia para a extração automática da malha viária em imagens de média (pixels de 0,7-2,0 metros) e alta (pixels < 0,7 m) resolução de cenas rurais. Na Seção 3 são apresentados e discutidos os resultados experimentais. As principais conclusões e perspectivas futuras são apresentadas na Seção 4.

## **2. Metodologia para a Extração Automática da Malha Viária**

A metodologia proposta para a extração automática da malha viária em imagens digitais de média e alta resolução baseia-se em duas etapas sequenciais. 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.

### **2.1 Extração de Sementes de Rodovia**

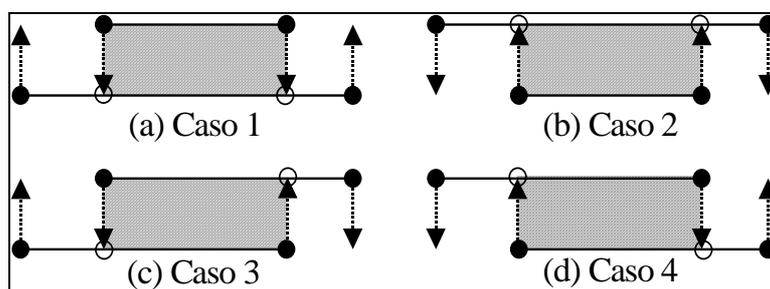
A extração de sementes de rodovia baseia-se num conjunto de quatro objetos semânticos de rodovia e num outro conjunto de regras de conexão entre objetos semânticos. Cada semente de rodovia é composta de uma seqüência de objetos semânticos de rodovia conectados, sendo que geometricamente cada seqüência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

#### **2.1.1 Extração de Objetos Semânticos**

Os objetos semânticos, aqui propostos, 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, i.e.: 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 1** 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 1**) são projetados ortogonalmente de um para outro, sendo que dois pontos projetados são locados (pequenas circunferências na

**Figura 1**) entre os pontos extremos do segmento oposto. Por exemplo, na **Figura 1(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 1(b)**). Já em relação aos casos 3 e 4, respectivamente ilustrados na **Figura 1(c)** e na **Figura 1(d)**, os pontos projetados são locados de forma alternada, i.e. 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 1** 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.



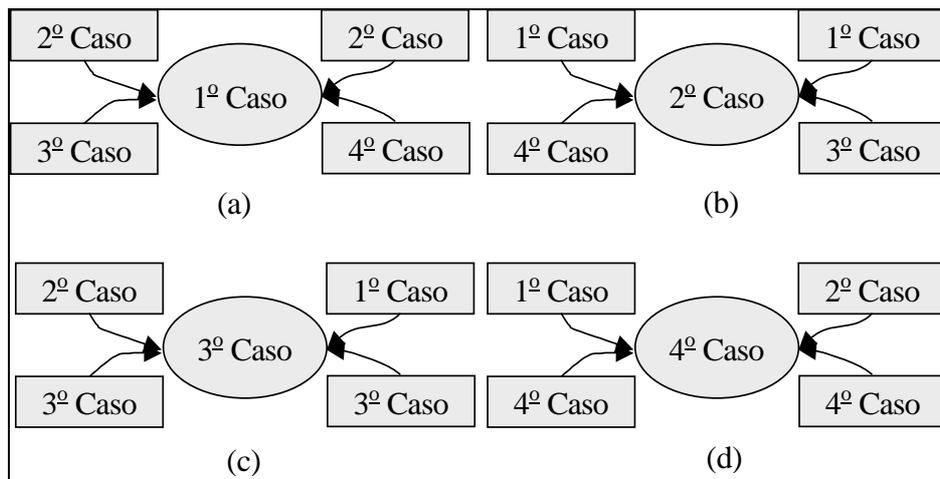
**Figura 1** - Objetos semânticos

A grande dificuldade da metodologia para construção de objetos semânticos é a identificação de pares de linhas poligonais que delimitam regiões compatíveis com rodovia. Várias propriedades geométricas e radiométricas de rodovia são utilizadas, como, por exemplo: rodovias são geometricamente suaves, a largura de rodovia não varia muito, os pixels de rodovia são radiometricamente homogêneos etc.. Detalhes de como as propriedades de rodovia são integradas na estratégia de construção de objetos semânticos são apresentados em Dal Poz et al. (2004).

### 2.1.2 Extração de Sementes de Rodovia através da Conexão de Objetos Semânticos

Cada objeto semântico pode ser considerado como uma representação local para a maior parte reta de um segmento de rodovia. O problema que se tem em mãos é, dada uma grande quantidade de linhas poligonais previamente extraídas de uma imagem, entre as quais não se conhece nenhuma inter-relação, como formar e agrupar os objetos semânticos para se ter as sementes de rodovia. A **Figura 2** mostra quais são as possíveis conexões à direita e à esquerda dos objetos semânticos. Todas estas possíveis conexões são entendidas a partir da análise dos objetos semânticos mostrados na **Figura 1**. A **figura 2(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.

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.



**Figura 2 - Conexões entre os objetos semânticos**

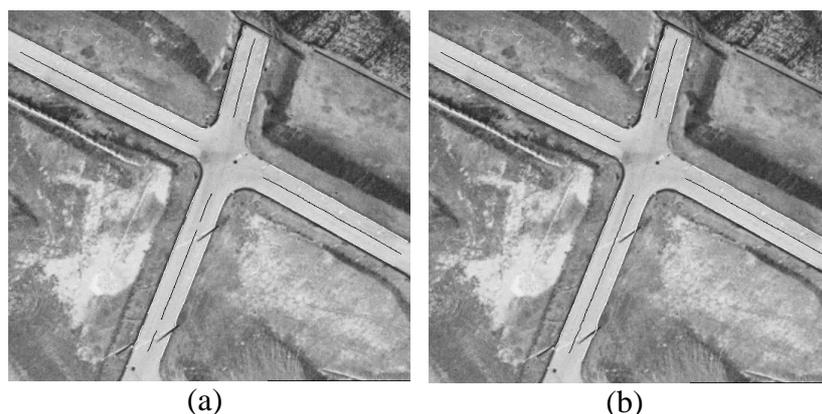
## 2.2 Complementação da Malha Viária

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

### 2.2.1 Conexão entre Sementes ao longo das Rodovias

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, apenas 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 próxima subseção apresenta uma metodologia para detectar e reconstruir cruzamentos de rodovia.

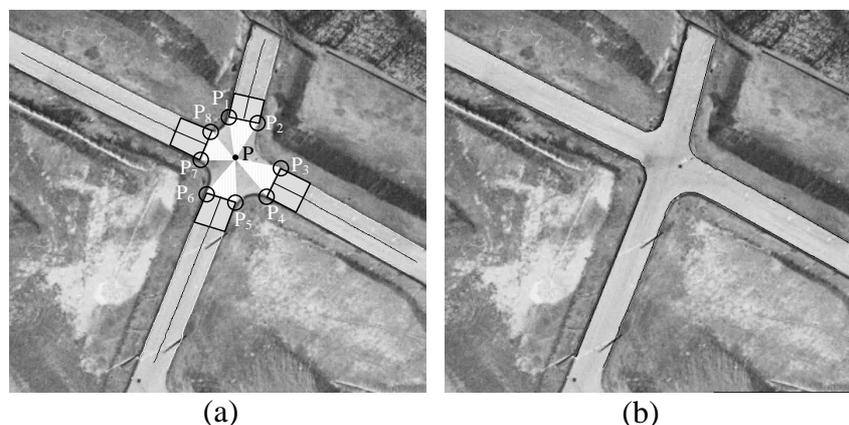


**Figura 3** - Exemplo de resultado de conexão. (a) Antes da conexão; (b) Após a conexão.

A **Figura 3** mostra um exemplo de aplicação do processo de conexão aos resultados gerados pela metodologia de extração de sementes de rodovia. Sobre as figuras são sobrepostas linhas poligonais representando as bordas de rodovia e eixos de rodovia. A **Figura 3(a)** mostra que a presença de postes ao longo das margens da rodovia, que se estende mais verticalmente, provocou falhas na extração, resultando em três sementes desconectadas de rodovia. A **Figura 3(b)** mostra que estas três sementes foram corretamente conectadas.

### 2.2.2 Reconstrução dos Cruzamentos de Rodovia

A metodologia desenvolvida para a extração de cruzamentos de rodovia baseia-se nos resultados gerados pela metodologia de conexão de rodovia, isto é, as sementes conectadas e os respectivos eixos.



**Figura 4** - Exemplo de extração cruzamento de rodovia. (a) Elementos para a detecção e a extração de cruzamentos de rodovia; (b) Cruzamento de rodovia extraído.

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. Um exemplo é mostrado na **Figura 4(a)**, onde o ponto de referência (P) é calculado a partir de um agrupamento de quatro pontos, resultantes da intersecção de quatro pares de

eixos não colineares. 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.

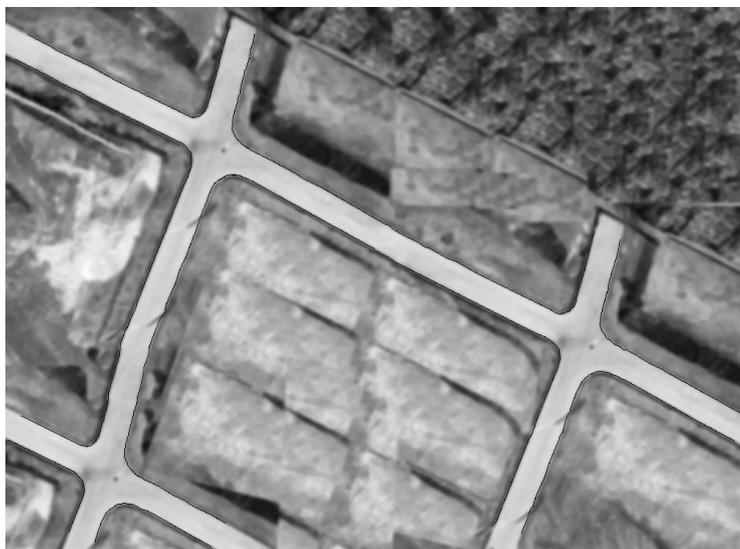
Os pontos de referência permitem a identificação dos quadriláteros extremos de sementes conectadas de rodovia, mais próximos dos respectivos cruzamentos de rodovia (**Figura 4(b)**). Estes quadriláteros são elementos importantes na definição de cruzamentos de rodovias, já que estes podem ser genericamente 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. Conforme mostra a **Figura 4(a)**, parte do problema pode ser resolvido através da organização de triângulos definidos pelo vértice comum P e pelos lados dos quadriláteros mais próximos de P. No exemplo da **Figura 4(a)**, o cruzamento de rodovia é representado pelo polígono definido pelos segmentos de reta  $P_1P_2$ ,  $P_3P_4$ ,  $P_5P_6$  e  $P_7P_8$ , e as linhas poligonais que conectam os vértices  $P_8$  e  $P_1$ ,  $P_2$  e  $P_3$ ,  $P_4$  e  $P_5$ , e  $P_6$  e  $P_7$ . A **Figura 4(b)** mostra o resultado final obtido após a aplicação da metodologia de extração de cruzamentos de rodovia aos resultados mostrados na **Figura 3(b)**.

#### 4. Resultados Experimentais

A avaliação da metodologia proposta foi realizada com base em várias imagens aéreas de média e alta-resolução. Neste artigo são apresentados os resultados obtidos com duas imagens aéreas, sendo uma de alta resolução e outra de média resolução. Os resultados obtidos serão analisados visual e numericamente. A análise visual baseia-se na observação dos resultados sobrepostos sobre a imagem de entrada. Entretanto, uma análise quantitativa pode ser realizada empregando-se parâmetros de qualidade (Wiedmann e Hinz, 1999). Estes parâmetros são definidos a partir de dois tipos de entidades: 1- linhas poligonais representando os eixos centrais das rodovias, extraídas automaticamente; e 2- como no item 1, só que extraídas manualmente por um operador. Estas últimas linhas poligonais são consideradas corretas. Os seguintes parâmetros de qualidade são utilizados na análise dos resultados: 1- *erro médio*, definido como a distância média entre as linhas poligonais extraídas automática e manualmente; 2- *completeza*, isto é, a razão entre a soma dos comprimentos das linhas poligonais extraídas automaticamente e a soma dos comprimentos das correspondentes linhas poligonais extraídas manualmente; e 3- *correção*, definida como a razão entre a soma dos comprimentos das linhas poligonais extraídas automaticamente de forma correta e a soma dos comprimentos de todas as linhas poligonais extraídas automaticamente. Os parâmetros de completeza e correção variam no intervalo [0; 1], sendo 1 (100%) o valor ótimo.

A **Figura 5** apresenta os resultados obtidos com a imagem (745 x 1007 pixels) de alta resolução, cujas as rodovias possuem largura média de 33 pixels e interceptam-se em 'X'. Neste experimento, o método gera inicialmente cadeias de quadriláteros justapostos (isto é, as sementes de rodovia) para os dez ramos da malha viária. Na sequência, o método inicia a complementação da malha viária. Assim, a conexão dos sementes de rodovia gera segmentos maiores, os quais concorrem nos três cruzamentos da malha viária. Finalmente, estes cruzamentos são reconstruídos, possibilitando a reconstrução completa da malha viária. Os parâmetros de qualidade mostram que a metodologia teve um bom desempenho com esta imagem. De fato, tanto o parâmetro de completeza quanto o de correção foram de 100%. O erro médio foi da ordem de 3 pixels, isto é, algo em torno de 10% da largura média da rodovia. À princípio, este valor para o erro médio pode ser considerado alto, mas é justificado pela dificuldade do operador em vetorizar o eixo de rodovia em imagens de alta resolução. É

bom lembrar que o eixo de rodovia é uma entidade virtual, diferente de uma borda que é visível na imagem.



**Figura 5** - Resultados obtidos com a imagem de alta resolução

A **Figura 6** apresenta os resultados obtidos com a imagem (398x598 pixels) de média resolução, onde as rodovias manifestam-se como faixas estreitas de aproximadamente 7 pixels. Esta imagem apresenta um conteúdo favorável à aplicação da metodologia, visto que são poucas as anomalias associadas a malha, composta por duas rodovias cruzando-se em 'T'. As bordas são bem definidas e geralmente são geometricamente suaves. Existem algumas obstruções parciais, nos locais onde existem pequenos arbustos ao longo da margem direita da rodovia que se estende mais verticalmente. Entretanto, estas anomalias podem provocar apenas falhas locais, de fácil reparação pela metodologia de conexão de sementes de rodovia. Como já era esperado, a aplicação da estratégia, referente à primeira etapa da metodologia, produziu um resultado bastante favorável, com completeza acima de 90%. A aplicação das estratégias de complementação permitiu a reconstrução completa da malha, motivo pelo qual a completeza foi de 100%. O parâmetro de correção também atingiu o valor ótimo de 100%, significando que todo o resultado da extração foi validado. O erro médio para este caso foi de 0,8 pixel, implicando numa acurácia na casa do sub-pixel. Vale também ressaltar que este valor é próximo de 10% da largura média das rodovias.



**Figura 6** - Resultados obtidos com a imagem de média resolução

## 4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVAS FUTURAS

Este artigo apresentou uma metodologia para a extração automática da malha viária em imagens de média e de alta resolução de cenas rurais. A metodologia baseia-se em duas etapas principais. Inicialmente são extraídas sementes de rodovia, vindo depois a complementação da malha viária. Esta última etapa consiste em encontrar as conexões entre as sementes de rodovia e em reconstruir os cruzamentos de rodovia. Os resultados obtidos mostraram que a metodologia teve um ótimo desempenho com as duas imagens usadas nos experimentos, sendo uma de média resolução e outra de alta resolução.

A metodologia proposta está passando atualmente por vários aperfeiçoamentos, podendo-se destacar a complementação automática em uma única etapa através de processos de otimização em grafo. Um outro aperfeiçoamento importante é o desenvolvimento de uma metodologia que permita a reconstrução de trevos complexos, compostos, por exemplo, de viadutos e alças de acesso lateral.

## 5. AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com apoio da FAPESP (Auxílio à Pesquisa coordenado pelo autor principal), da CAPES (Bolsa de Doutorado do segundo co-autor) e do CNPq (Bolsa de Produtividade em Pesquisa (PQ) do autor principal).

## 6. REFERÊNCIAS

- Agouris, P.; Gyftakis, S.; Stefanidis, A. Uncertainty in image-based change detection. In: accuracy 2000, **Proceedings...** Amsterdã, 2000, p. 1-8.
- Baumgartner, A.; Steger, C.; Mayer, H.; Eckstein, W.; Ebner, H. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 66, n. 7, p. 777-785, 1999.
- Dal Poz, A. P.; Vale, G. M.; Zanin, R. B. Automated road segment extraction by grouping road objects. In: The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, **Proceedings...** Istambul, Turquia, v. 34, 2004, p. 436-439.
- 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.). **The international Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences**, Munique, Alemanha, p. 87-92, 2003.
- Gruen, A.; Li, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-snakes. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.
- Jain, R.; Kasturi, R.; Schunck, B. G. **Machine Vision**. MIT Press and McGraw-Hill, Inc., New York, 1995, 1995.
- Kass, M.; Witkin, A.; Terzopoulos, D. Snakes: active contour models. In: International Conference on Computer Vision, **Proceedings ...** London, 1987, p. 259-268.
- Merlet, N.; Zerubia, J. New prospects in line detection by dynamic programming. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 18, n. 4, p. 426-431, 1996.
- Neuenschwader, W. M.; Fua, P.; Iverson, L.; Szekely, G.; Kubler, O. Ziplock snakes. **International Journal of Computer Vision**, v. 25, n. 6, p. 191-201, 1997.
- Sowmya, A.; Trinder, J. Modelling and representation issues in automated feature extraction from aerial and satellite images. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 1, p. 34-47, 2000.
- Wang, Y.; Trinder, J. Automatic road network extraction by hierarchical grouping. In: ASPRS 2000 annual conference, **Proceedings ...** Washington - DC, 2000, CD-ROM.
- Wiedmann, C.; Hinz, S. Automatic extraction and evaluation of road networks from satellite imagery. In: The International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing, **Proceedings ...**Munique, v. 32, p. 95-100, 1999.