

METODOLOGIA AUTOMÁTICA PARA EXTRAÇÃO DE CRUZAMENTO DE RODOVIAS EM IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO

Rodrigo Bruno Zanin¹
Aluir Porfírio Dal Poz²

¹Mestrando do Programa de Pós – Graduação em Ciências Cartográficas
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT (UNESP)
zanin@pos.prudente.unesp.br

²Universidade Estadual Paulista – (UNESP)
Faculdade de Ciências e Tecnologia – FCT (UNESP)
Departamento de Cartografia - FCT/UNESP
Rua Roberto Simonsen, 305, 19060-900 Presidente Prudente, SP, Brasil
aluir@prudente.unesp.br

RESUMO

Pesquisas em extração de rodovias em imagens digitais não são recentes, sendo as primeiras da década de 70. Os métodos desenvolvidos normalmente são classificados em duas classes: semi-automático e automático. Esta última classe não prevê a intervenção de um operador. Neste contexto, a extração automática de cruzamentos de rodovias é fundamental, embora muito poucos trabalhos são encontrados na literatura sobre extração de rodovias. A razão principal é a grande diversidade de cruzamentos de rodovias, gerando algumas dificuldades para construir um conhecimento a priori sobre cruzamentos. Esta pesquisa propõe uma metodologia automática para resolver este problema, combinando segmentos de rodovias extraídos de uma imagem de alta resolução (pixel < 0,7 m), com linhas extraídas numa imagem de baixa resolução (pixel > 2m), reamostrada da imagem original de alta resolução. A metodologia proposta foi testada em um conjunto de imagens de alta resolução, mostrando-se confiável e eficiente. Desde que as bordas das rodovias sejam satisfatoriamente definidas, o método se mostrou capaz de extrair totalmente os cruzamentos de rodovias. Além disso, gerou uma significativa melhora na malha viária (aproximadamente 20%) extraída pela metodologia automática de extração de segmentos de rodovias.

Palavras chaves: extração de rodovia; cruzamento de rodovias, espaço – escala; multi – resolução.

ABSTRACT

Researches on road extraction from digital images are not recent, being the first one from 70's. The methods developed are usually classified into two classes, i.e., semi-automatic and automatic. Concerning this last class, no intervention with the operator is expected. In this context, the road crossing extraction is fundamental, although very few works are found in the relevant literature. The main reason is the great diversity of road crossings, bringing some difficulties to build up a priori knowledge of them. This research proposes a methodology for solving this problem combining road segments extracted from a high – resolution image (pixel < 0.7 m), with lines extracted from a low - resolution image (pixel > 2m) resampled from the original, high – resolution image. The proposed methodology was tested with a set of high – resolution image, showing that it is reliable and efficient. Whenever the road edges were well - defined the method was able to totally extract the road crossings. In addition it provided road networks with completion significantly better (about 20%) than the corresponding ones previously extracted by the automatic road segment extraction method.

Key words: road extraction, road crossing, scale – space, multi – resolution.

1. INTRODUÇÃO

A coleta de dados para SIG (Sistemas de Informação Geográfica) através de técnicas fotogramétricas tem sido tradicionalmente realizada através da extração manual de feições cartográficas em imagens. Embora esta estratégia de coleta de dados seja muito eficiente, geralmente, demanda muito tempo e é bastante dispendiosa. Os sistemas fotogramétricos digitais possibilitam o desenvolvimento de novas tecnologias para a captura e a atualização de informações espaciais, garantido um decréscimo cada vez maior da dependência do operador humano, através de um aumento progressivo da automação dos processos envolvidos (DAL POZ, 2000). É neste contexto que as pesquisas realizadas sobre a extração de rodovias em imagens digitais, vem ganhando importância cada vez maior, envolvendo progressivamente mais estratégias automáticas para resolver o problema de reconhecimento. Os métodos de extração de rodovias desenvolvidos até então são comumente classificados em semi-automáticos, em que há a intervenção do operador no sistema de extração, e automáticos, nos quais a extração ocorre somente em função de um ou mais algoritmos combinados para que a extração ocorra sem a intervenção humana.

Grandes esforços vêm sendo empregados em diferentes níveis de processamento de imagem, compreendendo, por exemplo, o uso de algoritmos mais eficientes para detectar bordas, como o proposto por CANNY (1986), e também linhas, sempre na tentativa de alcançar um método automático que seja satisfatório. Os métodos automáticos requerem a integração de informação contextual e de conhecimento a priori do objeto rodovia. Um exemplo sofisticado é encontrado em BAUMGARTNER *et al.* (1998), em que contexto e técnicas de agrupamento perceptivo em diferentes resoluções são usados para extrair a malha viária em imagens de alta resolução. Nesta etapa, também é possível o uso de um tipo especial de *snakes* (conhecido como *ziplock snakes*) para reconstruir as discontinuidades (LAPTEV *et al.*, 2000), cujo princípio consiste em otimizar um segmento perturbado e localizado entre dois pontos dados. 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 o conhecimento a priori sobre malha viária é utilizado para eliminar as falsas rodovias.

Entre as metodologias utilizadas para extração automática de rodovias, uma preocupação pouco presente é a detecção e extração de cruzamentos de rodovias, ou seja, poucos são os trabalhos realizados no sentido de criar uma metodologia para detecção e extração de cruzamento de rodovias na literatura (BARSÍ *et al.*, 2002).

O grande problema para se criar uma

metodologia de detecção e extração de cruzamentos de rodovias esta ligado principalmente à grande variedade de cruzamento que uma malha viária pode conter. Assim, é pouco o conhecimento a priori que pode ser usado para a extração dos cruzamentos de rodovias. Uma situação oposta é encontrada no que tange à extração de segmentos de rodovias, em que uma série de modelos e estratégias estão disponíveis (DAL POZ, 2001). Nesta perspectiva, a maior parte dos trabalhos encontrados na literatura, acabam por priorizar a extração de segmentos de rodovias em detrimento da reconstrução topológica da malha viária que depende basicamente da detecção e extração dos cruzamentos de rodovias (SILVA e DAL POZ, 2003).

Um dos primeiros trabalhos encontrados na literatura é em BAUMGARTNER *et al.* (1998), que utilizam uma metodologia baseada em rodovias extraídas em alta resolução e rodovias extraídas na mesma imagem reamostrada em baixa resolução (representadas por linhas), combinando-as para detectar e extrair cruzamentos de rodovias. TEOH e SOWMYA (2000) propuseram um método baseado em um conjunto de regras que utilizam atributos das rodovias, como média de tons de cinza, largura, direção das rodovias, bem como suas distâncias relativas, tudo organizado em um banco de dados para detectar e extrair cruzamentos. Em BOICHIS *et al.* (1998) e BOICHIS *et al.* (2000) a detecção e extração dos cruzamentos de rodovias utiliza conhecimento a priori modelados a partir de ocorrências típicas de cruzamentos de rodovias presentes em dados de SIG. Uma metodologia para detectar e extrair cruzamentos de rodovias em imagens de média resolução (pixel de aproximadamente 0,7 m) utilizando redes neurais é proposta em BARSÍ *et al.* (2002). Em SILVA e DAL POZ (2002) é proposta uma metodologia para a reconstrução de junções de rodovias em imagens de áreas rurais, cuja idéia baseia-se no princípio de que as junções possuem formas básicas (como X, T, Y, L).

Neste trabalho é proposta uma metodologia automática combinando os resultados da segmentação da imagem em alta e baixa resolução e a extração automática dos segmentos de rodovias, para gerar uma descrição das bordas dos cruzamentos dos segmentos de rodovias que já foram extraídos por uma metodologia preexistente. A metodologia proposta é apresentada na seção 2. Na seção 3 são apresentados e discutidos os resultados experimentais. As conclusões e as perspectivas futuras são apresentadas na seção 4.

2. METODOLOGIA PARA A EXTRAÇÃO DE CRUZAMENTOS DE RODOVIAS

Os métodos de extração da malha viária, normalmente, se diferem quanto ao tipo de imagem a ser empregada (imagens de alta e baixa resolução) e primitivas a serem utilizadas pelos métodos como, bordas, perfis transversais ao eixo da rodovia e os modelos genéricos. Mas de forma geral a literatura identifica quatro etapas distintas, isto é: extração de

fragmentos de rodovias; conexão de fragmentos de rodovias, a fim de se gerar os segmentos de rodovias; geração da malha viária; complementação da malha viária (DAL POZ, 2000).

O problema de extração de cruzamento está inserido na etapa de geração da malha viária, onde os cruzamentos se tornam os componentes que devem ser extraídos para garantir a coerência topológica da malha viária.

O processo de extração de rodovias gera inicialmente uma malha viária incompleta, construída com base nos fragmentos ou segmentos de rodovias e respectivas informações de caráter geométrico e radiométrico, tais como: a largura da rodovia, o nível de cinza médio, o mapa de bordas de rodovias, localizações e orientações do vetor gradiente da rodovia, linhas representado as rodovias em baixa resolução etc., como pode ser verificado pelo esquema ilustrativo apresentado na figura 01. A partir destas informações são detectados e extraídos os cruzamentos de rodovias para estabelecer a topologia da malha viária.

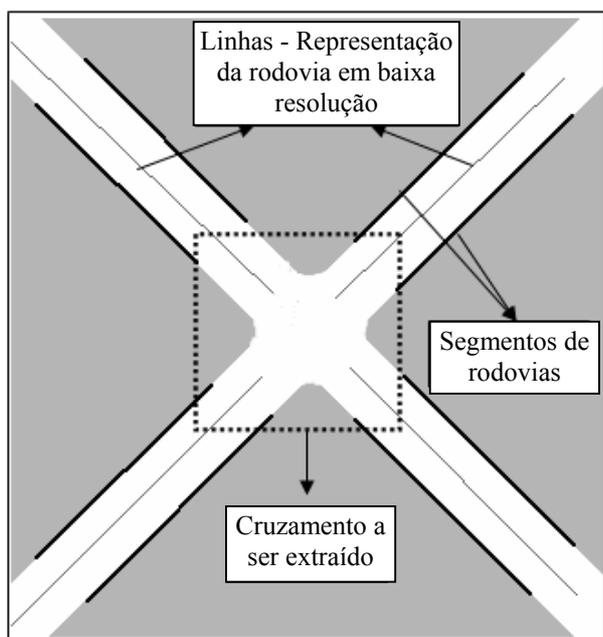


Fig. 01 – Esquema representando a região de cruzamento.

A solução para o problema compõe-se de duas etapas, sendo que uma primeira (seção 2.1) consiste em encontrar os pontos de referência de cruzamento com informações presentes na imagem de baixa resolução, reamostrada a partir da imagem original de alta resolução. Na segunda etapa (seção 2.2), o cruzamento é extraído na imagem original em alta resolução.

2.1 Determinação dos pontos de referência dos cruzamentos

Nesta primeira etapa, a solução baseia-se em algoritmos de detecção de linhas ao longo do espaço - escala. Assim, a imagem original de alta resolução é re-

amostrada em baixa resolução, de tal forma que as rodovias na imagem reduzida tenham aproximadamente três pixels de largura. Neste processo de reamostragem a única informação a priori necessária é a largura aproximada da rodovia na imagem original. Em baixa resolução, as rodovias podem ser modeladas como linhas (DAL POZ, 2002). Para extrair as linhas desta imagem, foi aplicado inicialmente o algoritmo de Canny modificado. Neste algoritmo, a etapa de diferenciação do detector deve ser suprimida, permanecendo as demais (ZANIN, 2004). Os resultados deste passo são geralmente as rodovias, isto é, quase todos os detalhes não relacionados com rodovias são suprimidos (ver destaque na figura 02). Nota-se que, embora as linhas extensas aproximem os eixos de rodovia, a representação para este exemplo não é boa no cruzamento. Entretanto, estas informações são úteis à extração do cruzamento na imagem original.



Fig. 02 – Resultado do processo de extração de linhas em uma imagem reamostrada.

O processo de detecção de linhas usando Canny Modificado gera uma lista não ordenada de pixels. Assim é necessário primeiro a aplicação de um algoritmo de vetorização (detecção de cadeias de pixels), que consiste na formação de listas ordenadas de pixels de borda. Este algoritmo está detalhado em DAL POZ (2002). Em um processo seguinte, aplica-se um algoritmo de poligonização, por exemplo, o algoritmo de divisão recursiva (JAIN *et al.*, 1995) que substitui as cadeias de pixel por linhas poligonais, isto é, uma seqüência de segmentos conectados de reta. Devido principalmente à compactação, esta representação facilita bastante a construção do conhecimento sobre rodovia. Facilita também a tarefa de reconhecimento automático dos pontos de referência dos cruzamentos, cuja estratégia baseia-se num critério de proximidade. Neste critério (figura 03), primeiro seleciona-se um ponto de uma linha que representa a rodovia *i* e calculam-se todas as distâncias com todos os pontos das outras linhas representando as outras rodovias. Repetindo-se este processo para todos os pontos da

linha considerada, e depois para as outras linhas da imagem, selecionam-se os pontos que estão a uma certa distância entre si, distância esta que atende a um limiar calculado em função da largura da rodovia (este limiar mostrou-se bastante robusto com um valor próximo de duas vezes a largura média de rodovia), isto é,

$$d_i^{i+1}(j,k) = \sqrt{(x_j^i - x_k^{i+1})^2 + (y_j^i - y_k^{i+1})^2} < w \quad (01)$$

onde:

$d_i^{i+1}(j,k)$ – distância entre os pontos j (da rodovia i) e k (da rodovia i + 1).

(x_j^i, y_j^i) – coordenadas do ponto j da rodovia i.

(x_k^{i+1}, y_k^{i+1}) – coordenadas do ponto k da rodovia i + 1.

w – limiar calculado em função da largura de rodovia.

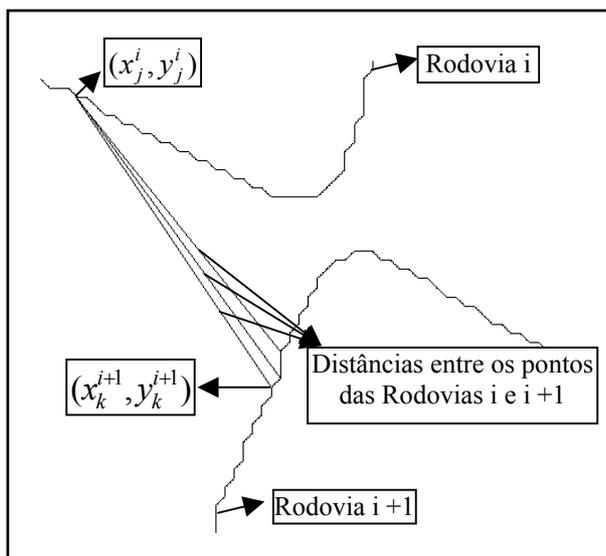


Fig. 03 – Cálculo das distâncias entre pontos das rodovias i e i + 1

Vale ressaltar que todo o processo de extração de pontos de referência baseia-se nas linhas transformadas para a imagem original de alta resolução, conforme mostra a figura 04.

Com os pontos selecionados, com base no critério de proximidade, o que se tem agora são agrupamentos de pontos numa determinada região de cruzamento, como pode ser verificado pela figura 04.

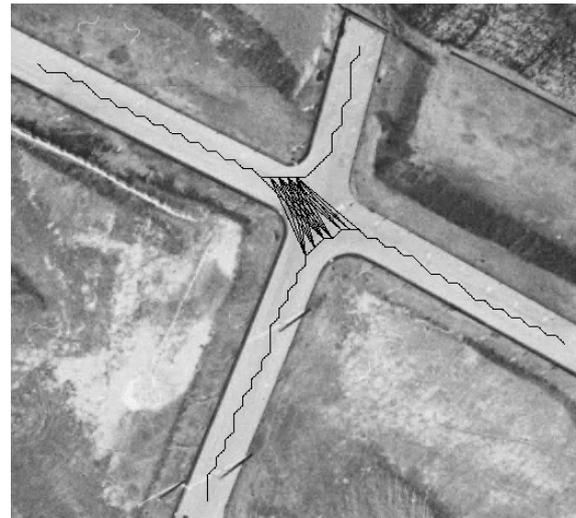


Fig. 04 – Agrupamento de pontos como resultado do critério de proximidade.

Após detectar os agrupamentos de pontos da região de cruzamento, calculam-se as coordenadas dos pontos de referência de cruzamentos empregando uma regra simples. (equação 02)

$$x_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} x_i}{n} \quad \text{e} \quad y_c = \frac{\sum_{i=0}^{n-1} y_i}{n} \quad (02)$$

onde, x_c e y_c representam as coordenadas de um ponto de referência de um dado cruzamento, calculadas como médias dos n pontos selecionadas pelo critério de proximidade.

Com as coordenadas calculadas, obtém-se no final o ponto de referência do cruzamento (figura 05).

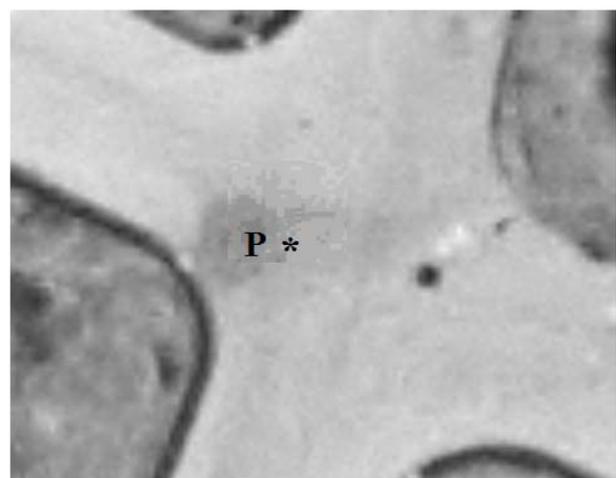


Fig. 05 – Ponto de referência de cruzamento.

É importante ressaltar que o ponto de referência não precisa estar precisamente locado no centro do cruzamento, visto que a função deste ponto é fornecer uma referência para a busca dos segmentos de rodovia previamente extraídos.

2.2 Extração do cruzamento em alta resolução

A extração de cruzamentos em alta resolução pode ser subdividida em duas etapas. A primeira consiste na extração dos fragmentos de rodovias, que é realizada por um programa de computador preexistente para a extração automática de segmentos (fragmentos adjacentes conectados) de rodovias (DAL POZ, 2002). A segunda etapa tem por base os resultados obtidos na etapa anterior.

2.2.1 Extração dos fragmentos de rodovias em alta resolução.

A extração de fragmentos de rodovia necessita de conhecimentos sobre o objeto rodovia, já que o objetivo é o reconhecimento e o delineamento de segmentos de rodovia. O processo para extração automática de segmentos de rodovia coincide com a primeira etapa do princípio de extração da malha viária. No entanto, este processo é realizado segundo as etapas brevemente elucidadas abaixo:

I – Aplica-se na imagem original um detector de bordas, como por exemplo, o processo de detecção de bordas de Canny (1986).

II – Na imagem de bordas é aplicado um algoritmo de vetorização para gerar uma lista ordenada de pixels de bordas.

III – Nas listas de pixels de bordas ordenados na vetorização aplica-se um algoritmo de poligonização, possibilitando que as bordas detectadas de rodovias sejam descritas por linhas poligonais.

IV – Na seqüência, as linhas poligonais são combinadas para gerar os fragmentos de rodovias que são quadriláteros mínimos modelando pequenos segmentos retos de rodovias.

V – Nesta etapa, os segmentos de rodovias são obtidos ligando os fragmentos adjacentes de rodovia.

Detalhes do processo brevemente descrito acima são encontrados em DAL POZ (2002).

É importante ressaltar que alguns fragmentos de rodovias não podem ser conectados com seus adjacentes, impossibilitando a geração de segmentos de rodovias. No entanto, a metodologia está adequada para trabalhar tanto com segmentos, como com os fragmentos de rodovias gerados pelo programa de extração automática de segmentos de rodovias.

A figura 06 ilustra o resultado da extração dos segmentos de rodovias, conforme descrito nos itens acima.

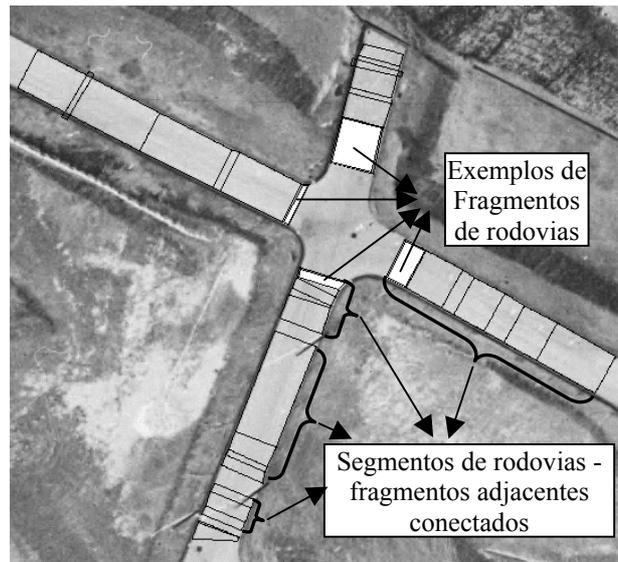


Fig. 06 – Resultado do processo de extração de segmentos de rodovias.

2.2.2 Extração dos cruzamentos

Como os cruzamentos de rodovias em imagens de alta resolução são áreas delimitadas por dois ou mais fragmentos ou segmentos de rodovias, resultando em figuras planas e irregulares, estes cruzamentos podem ser descritos por polígonos margeando áreas homogêneas e compatíveis com rodovias. Devido a grande variabilidade, é muito difícil modelá-los através de objetos regulares como os quadriláteros mínimos usados na extração de fragmentos de rodovia. Desta forma, não se pode depender de formas previamente conhecidas, mas sim de regras gerais que permitem a extração do cruzamento.

A identificação de quais bordas (na verdade, linhas poligonais) pertencem a um cruzamento particular não é trivial. A estratégia desenvolvida baseia-se nas linhas (geralmente rodovias), os pontos de referência de cruzamento extraídos em baixa resolução e os fragmentos ou segmentos de rodovias extraídos em alta resolução.

A identificação das bordas de cruzamentos de rodovias é realizada segundo um conjunto de regras apresentadas abaixo.

I – A partir de um ponto P de referência de cruzamento previamente determinado, calcular todas as distâncias deste ponto aos vértices dos fragmentos ou segmentos de rodovias, em cada uma das direções definidas pelas linhas extraídas em baixa resolução e que participaram da determinação do ponto P, como pode ser verificado pela figura 07.

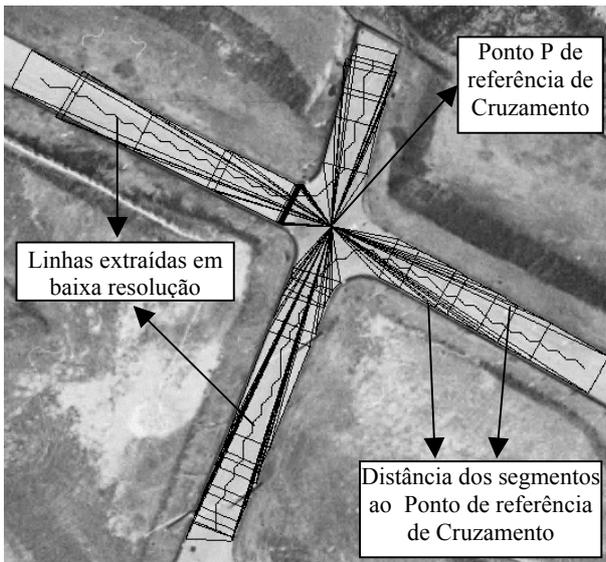


Fig. 07 – Estratégia de busca de busca do fragmento ou segmento de rodovia mais próximo do ponto de referência.

II – Determinar em cada uma das direções definidas pelas linhas, qual o fragmento ou segmento de rodovia está mais próximo do ponto P (referência de cruzamento).

III – Guardar destes fragmentos ou segmentos de rodovias (selecionados no item II) somente os vértices mais próximos do ponto de referência de cruzamento, conforme mostra a figura 08.

IV – Definidos quais os vértices dos fragmentos ou segmentos de rodovias estão mais próximos do ponto de referência de cruzamento, faz-se então uma busca em um arquivo que contém as coordenadas dos vértices de todas as linhas poligonais geradas pela metodologia de extração automática de segmentos de rodovias. Entre essas linhas poligonais encontram-se aquelas que farão a ligação entre os vértices pré-selecionados (figura 09), as quais foram descartadas pela metodologia de extração de segmentos de rodovias, pois não se compatibilizaram com o modelo de rodovias proposto por DAL POZ (2002).

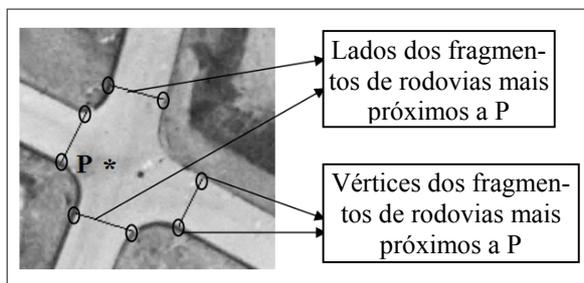


Fig. 08 – Vértices dos fragmentos ou segmentos de rodovias mais próximos do ponto P.

Como mostra a figura 09, o cruzamento de rodovia é descrito por uma figura plana relativamente complexa de segmentos de retas (lados dos fragmentos ou segmentos de rodovia) e de segmentos de linhas poligonais. Estas últimas são identificadas e extraídas

com base na estratégia descrita nos parágrafos anteriores.

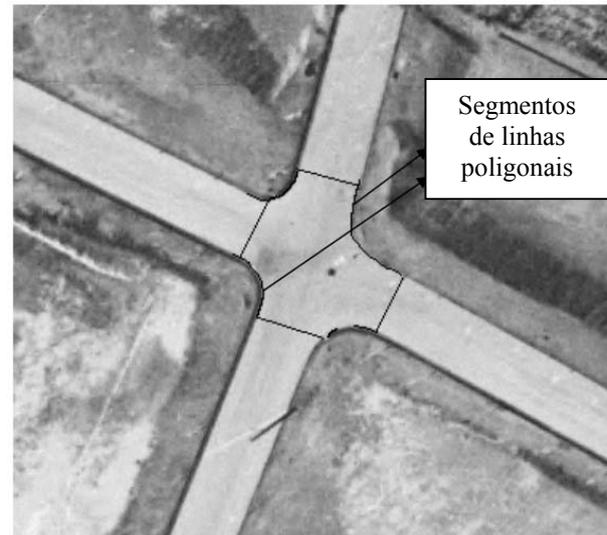


Fig. 09 – Cruzamento de rodovias descrito pelos segmentos de linhas poligonais

3. RESULTADOS E ANÁLISES

A metodologia apresentada na seção 2 foi desenvolvida em um programa de computador que trabalha acoplado a um programa pré-existente, específico para a extração automática de segmentos de rodovias, conforme metodologia proposta em DAL POZ (2002). Em outras palavras, este último programa de computador fornece os dados básicos (principalmente os fragmentos de rodovias extraídos) para o desenvolvimento da metodologia.

3.1 Formas de análise dos resultados

A análise dos resultados foi feita de forma visual e numérica, sempre levando em consideração as condições de completeza da malha viária como um todo.

Para a análise numérica neste trabalho foi utilizado o critério de completeza, ou seja, a razão entre o que foi extraído automaticamente pelas metodologias de extração automática (segmentos de rodovias e cruzamentos) e dados de referência (malha viária completa) obtidos manualmente com o auxílio do software Paint Shop Pro™ 4.1 (Shareware). O critério de completeza foi utilizado por se tratar do elemento chave para avaliar a eficiência da metodologia desenvolvida na complementação da malha viária extraída previamente.

A equação 03 define o critério de completeza que deve ter valor no intervalo de [0,1], sendo que 1 é o valor ótimo.

$$\text{completeza} = \frac{\text{número de elementos extraídos}}{\text{número total de elementos da malha}} \quad (03)$$

O número de elementos extraídos e o número total de elementos da malha são medidas desenvolvidas em cima do número de pixels utilizados para representar a feições extraídas e de referência (equação 04).

$$\text{número de elementos extraídos} = \sum_{i=0}^{n-1} f_i \quad (04)$$

onde f_i , é um valor atribuído a cada uma das n feições extraídas, representando o número de pixels utilizados para representá-la. O número total de elementos da malha viária utiliza o mesmo critério que o número de elementos extraídos.

3.2 Imagens Utilizadas nos Experimentos

Com o propósito de avaliar a metodologia proposta, foram realizados testes com 3 imagens de alta resolução, onde os cruzamentos apresentavam variados graus de dificuldade. É importante ressaltar que na literatura básica para o processo de extração de rodovias uma imagem é considerada de alta resolução para pixels menores que 0,7 m, o que equivale a rodovias na imagem com pelo menos 7 pixels de largura (aproximadamente 10m de largura) (BAUMGARTNER *et al*, 1998). A seguir são apresentadas as imagens utilizadas nos experimentos.

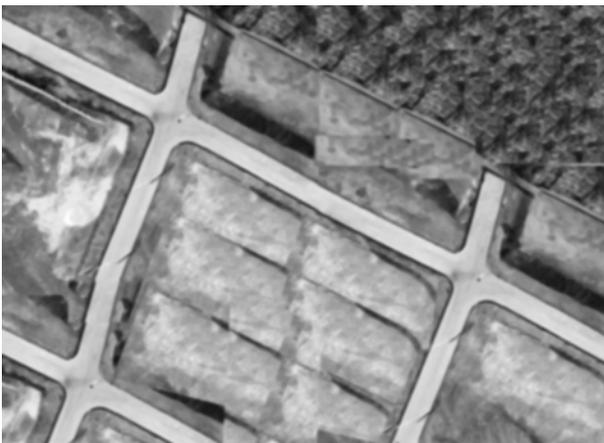


Fig. 10 – Imagem 01

Imagem 01 – (figura 10): trata-se de uma imagem de 745 x 1007 pixels, possuindo rodovias com aproximadamente 33 pixels de largura e três cruzamentos em “X”, com bordas tanto da rodovia como dos cruzamentos bem definidas.



Fig. 11 – Imagem 02

Imagem 02 (figura 11): trata-se de uma imagem com 450 x 914 pixels, possuindo rodovias com aproximadamente 25 pixels de largura e um cruzamento em “T”. As bordas das rodovias estão bem definidas, no entanto, o cruzamento apresenta regiões onde as bordas não estão bem definidas.



Fig. 12 – Imagem 03

Imagem 03 (figura 12): é uma imagem de 1072 x 664 pixels. Esta imagem possui rodovias com largura média de 40 pixels, com oito cruzamentos em forma de “X” e “T”. Tem um bom contraste, embora as bordas, tanto das rodovias, como dos cruzamentos, apresentam problemas, ou seja, as bordas não estão bem definidas nos locais onde será aplicada a metodologia. Esta imagem também possui carros nas rodovias e várias entradas rurais que perturbam a resposta do modelo de rodovia (DAL POZ, 2002).

3.3 Resultados e Discussões

Aplicando a metodologia proposta na seção 02, é possível obter resultados bastante diversificados, que mostram ao mesmo tempo sua robustez, no que tange a melhoria do grau de extração da malha viária, e sua dependência de resultados prévios (segmentos de rodovias) e condições favoráveis à metodologia.

O resultado da extração de cruzamento para a imagem 01 (figura 13) apresenta um resultado bastante favorável para todos os cruzamentos da imagem. É importante ressaltar que devido a maior distância entre os vértices de segmentos de rodovias e pontos de referência de cruzamento, as linhas poligonais que ligam estes vértices podem estar contidas em outras maiores, motivo que explica a metodologia extrapolar a simples ligação entre os vértices já determinados anteriormente.

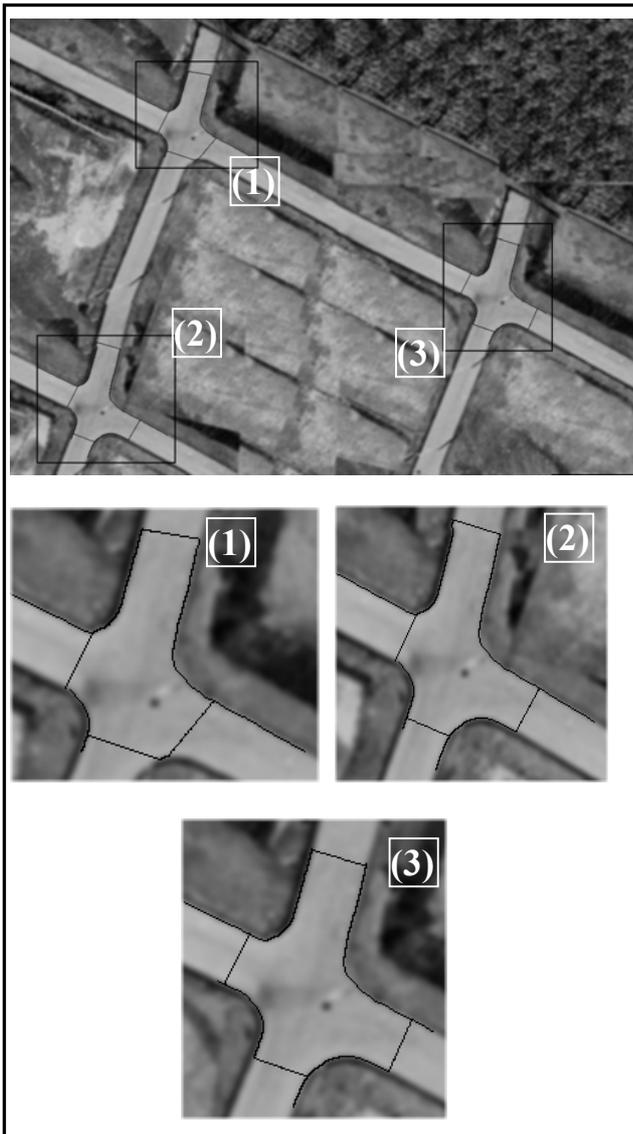


Fig. 13 – Resultado da metodologia de extração de cruzamentos para a imagem 01.

A fim de possibilitar uma verificação objetiva do benefício da metodologia desenvolvida no contexto de extração automática da malha viária, o resultado da metodologia de extração de cruzamento é fundida com o resultado da metodologia de extração de segmentos de rodovias. Desta fusão dos cruzamentos extraídos com os segmentos de rodovias, obtém-se uma completude de extração da ordem de 92%, o que é considerado bastante

satisfatório em relação ao processo de extração de rodovias, pois a completude da malha extraída pela metodologia de extração de segmentos de rodovias era da ordem de 67%. Logo a metodologia de extração de cruzamento possibilitou a obtenção de um resultado que corresponde a uma melhora de 25%, obtido em relação ao resultado extraído previamente pela metodologia de extração de segmentos de rodovia. Esta malha pode ser verificada na figura 14, onde os resultados obtidos estão plotados sobre a imagem original.

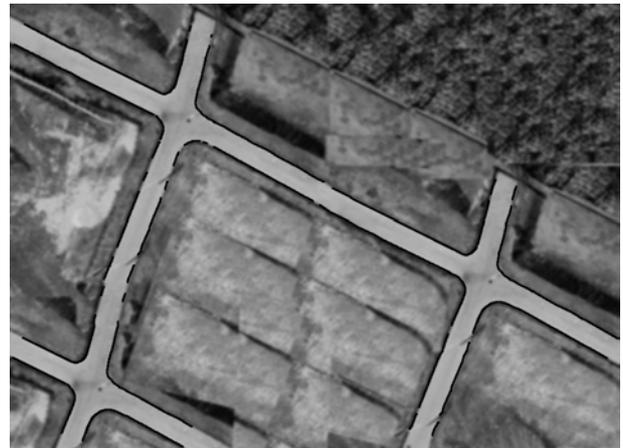


Fig. 14 – Malha extraída plotada sobre a imagem original

A imagem 02, embora tenha um bom contraste para a rodovia, as bordas do cruzamento não estão bem definidas, prejudicando assim o processo de extração de cruzamento, como pode ser visualizado pela figura 15.

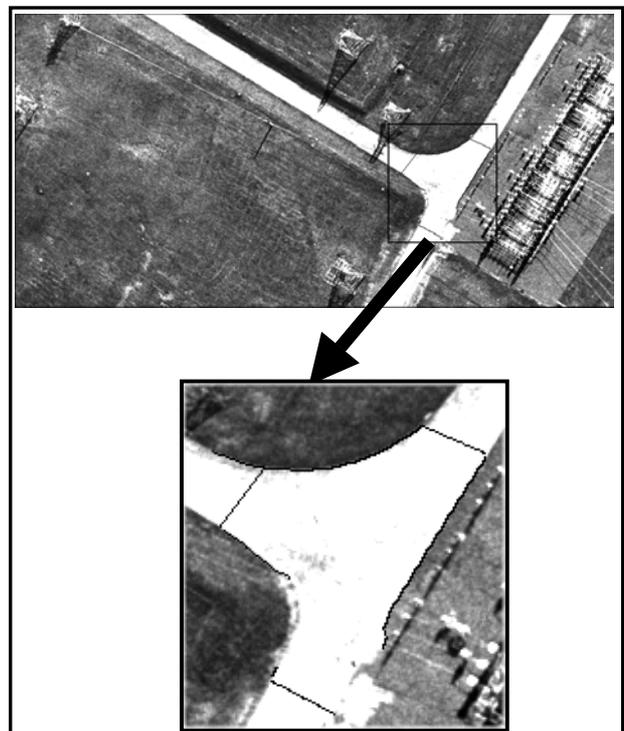


Fig. 15 – Resultado da metodologia de extração de cruzamento para a imagem 02.

A fusão dos segmentos de rodovias com os cruzamentos extraídos apresenta um resultado que pode ser considerado satisfatório, uma vez que uma completude de 87% é agora obtida, representando uma melhora da ordem de 18% na extração da malha viária extraída anteriormente, que tinha um nível de completude da ordem de 69%.

Na imagem 03 as rodovias contêm muitas entradas rurais, o que contribui para uma má definição das bordas de rodovias. Esta situação implica num contexto bastante desfavorável para métodos que empregam basicamente estratégias baseadas em informações geométricas e radiométricas. Este é o caso da metodologia preexistente para a extração automática de segmentos de rodovia. De fato, o resultado da extração de segmentos de rodovias gerou uma malha viária com segmentos de rodovias bastante fragmentados, representando somente 51% da malha viária presente na imagem.

Aplicando a metodologia de extração de cruzamentos de rodovias, foram obtidos os resultados mostrados na figura 16. Nesta figura são também mostrados os segmentos de rodovia previamente extraídos.

Dos oito cruzamentos existentes na imagem, os cruzamentos de números 1, 4, 6, 7 e 8 foram extraídos totalmente (figura 16). Para os cruzamentos 2, 3 e 5 alguns problemas geraram falhas na estratégia de extração dos cruzamentos. O cruzamento 2 não foi totalmente extraído devido a falta de bordas bem definidas nas proximidade deste cruzamento, situação que penaliza a metodologia. O cruzamento 5 não foi extraído completamente, pois nas proximidades do mesmo existem entradas rurais impedindo uma boa definição da borda da rodovia. O cruzamento 3 apresenta problema em razão da dificuldade de encontrar os vértices de um dos segmentos de rodovias, ficando a metodologia sem hipóteses para busca de linhas poligonais que liguem os respectivos vértices.

Desta forma, fazendo uma análise do ponto de vista da extração pura do cruzamento, alguns dos resultados não são completos. Entretanto, como o objetivo é a extração de cruzamento no contexto da complementação da malha viária, pode-se concluir que, mesmo para esta imagem que contém condições bastante desfavoráveis, a metodologia se mostrou bastante robusta. A robustez neste experimento pode ser comprovada, se for considerada a melhora no nível de extração da malha viária. Assim, a malha viária resultante da fusão dos cruzamentos extraídos com o segmentos de rodovias previamente extraídos, possui uma completude de 67%, frente os 51% extraídos com a metodologia de extração de segmentos de rodovias. Isto representa uma melhora de 16% no nível de extração da malha, ou seja, mesmo apresentando algumas falhas na extração de 3 dos 8 cruzamentos da imagem, a metodologia se mostrou mais uma vez importante no que tange ao seu principal objetivo que é contribuir na complementação da extração automática da malha viária.

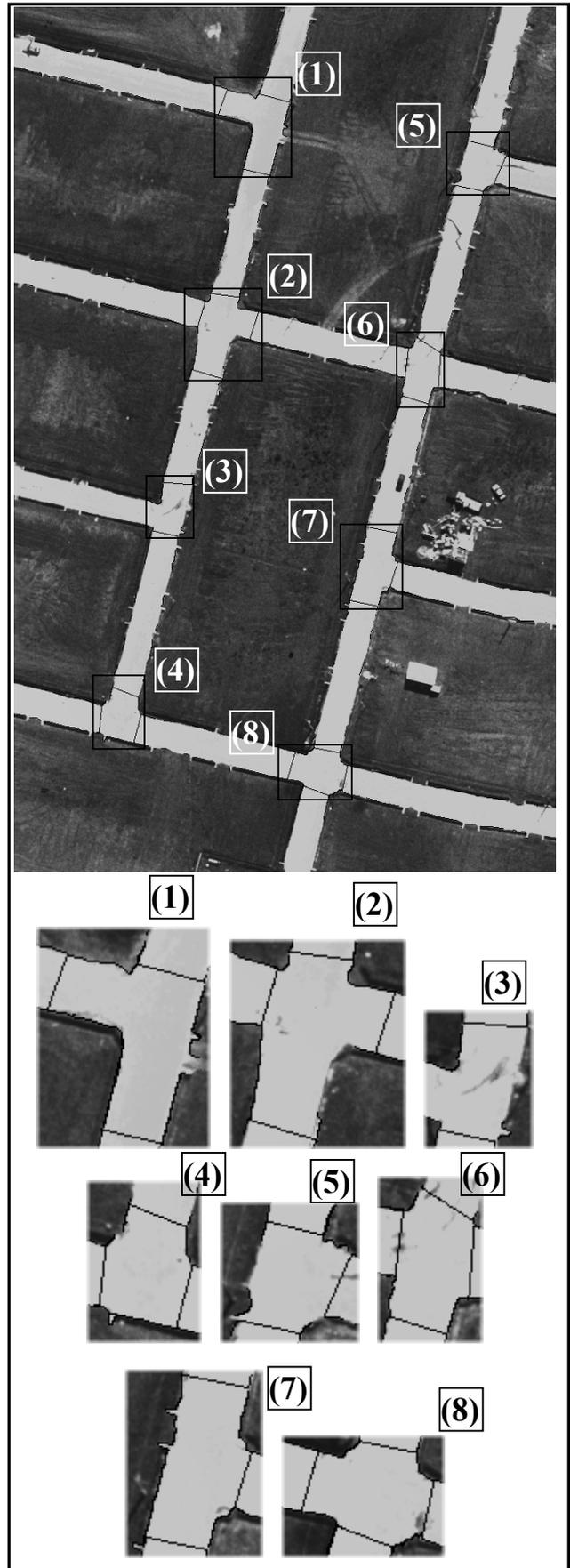


Fig. 16 – Resultado da metodologia de extração de cruzamento para a imagem 03.

4. CONCLUSÕES E PERSPECTIVA FUTURAS

De forma geral, algumas conclusões podem ser apresentadas.

A primeira é relativa aos resultados a priori, pois como a metodologia é totalmente centrada em resultados da metodologia de extração automática de segmentos de rodovia, é sempre necessária uma análise criteriosa destes resultados, ou seja, os fragmentos ou segmentos de rodovias obtidos. Pois o nível de fragmentação dos mesmos, bem como a que distância se encontram dos pontos de referencia de cruzamento, podem interferir diretamente no resultado do processo de extração automática de cruzamento.

A segunda refere-se às condições necessárias pelo próprio processo de extração de cruzamento, como a necessidade de as bordas do cruzamento estarem satisfatoriamente definidas, a fim de se ter 100% de completude nos cruzamentos extraídos.

Algumas melhorias do ponto de vista metodológico podem ser citadas abaixo:

- Deve se considerar a possibilidade de usar os detectores contextuais de borda (ZIOU e TABBONE, 1998) tanto para a extração quanto para a regularização ou complementação das linhas poligonais que compõem os cruzamentos. Por exemplo, uma metodologia promissora para a extração de linhas poligonais, a partir de dois pontos extremos, é o *ziplock snakes* (LAPTEV, *et al*, 2000). Devido sua robustez, permite extrair arcos suaves mesmo quando estão presentes as dificuldades descritas anteriormente. Uma alternativa também seria o uso de algoritmos de otimização baseados em programação dinâmica (BALLARD e BROWN, 1982) para complementar e regularizar os segmentos de linhas poligonais previamente extraídos por um detector de bordas.

- Um estudo mais rigoroso deve ser realizado sobre os limiares usados nos processos, como por exemplo, o desvio-padrão (ou fator de escala) usado no detector de bordas e linhas de Canny, pois o mesmo interfere diretamente nos resultados das metodologias de extração de rodovias e cruzamentos, implicando numa interação indesejada do operador com o sistema para a obtenção de resultados adequados.

Pode-se também considerar futuramente a ampliação do grau de dificuldade para esta pesquisa abordando os cruzamentos complexos (trevos ou dispositivos de segurança), que requerem um grau de conhecimento semântico que foge do escopo deste trabalho.

De forma geral, vale a pena ressaltar a importância do assunto extração de rodovias, onde a extração de cruzamentos é uma das etapas intermediárias neste processo, mas de fundamental importância. Este assunto está vinculado a um tema mais geral, que é a extração de feições para fins de alimentação ou atualização de bases cartográficas. Assim, o estudo de tais conteúdos é de relevante importância, visto que se trata de uma atividade reconhecidamente necessária e vai ao encontro

das tendências atuais da Fotogrametria Digital e Visão Computacional.

Diante do exposto acima e dos resultados obtidos com o processo de extração de cruzamento (oferecendo uma melhora em média de 20% na extração da malha viária), este trabalho está justificado dada sua contribuição no que tange o processo de extração automática da malha viária em imagens digitais.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- BARSI, A.; HEIPKE, C.; WILLRICH F. Junction extraction by artificial neural network system – JEANS. In: **ISPRS – Commission III Symposium on Photogrammetric Computer Vision**, Graz, Áustria, Proceedings, 2002.
- BAUMGARTNER, A. Extraction of roads from aerial imagery based on grouping and local context. In: **International Archives for Photogrammetry and Remote Sensing**, Columbus, Ohio, USA, v. 32, Part 3/1, p. 196-201, 1998.
- BOICHIS, N.; COCQUEREZ, J. P.; AIRAULT, S. A top down strategy for simple crossroads extraction. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXII, part 2/1, p. 19–26. 1998.
- BOICHIS, N.; VIGLINO, J. M.; COCQUEREZ, J. P. Knowledge based system for the automatic extraction of road intersections from aerial images. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. XXXIII, Supplement, part 3, p. 27–34. 2000.
- CANNY, J. A Computational approach to edge detection, **IEEE Pattern Analysis and machine Intelligence**, Vol. 8, No. 6, p. 679 – 698, 1986.
- DAL POZ, A. P. **Processo automático para reconhecer rodovias georeferenciadas de uma fotografia aérea digitalizada**. Relatório FAPESP de Pós-Doutorado, Universidade do Maine, EUA, 225 p., 2000.
- DAL POZ, A. P. Semi-automatic road extraction based on edge and correlation analyses. In: **ASPRS 2001 Annual Conference**, Saint Louis, EUA, 2001.
- DAL POZ, A. P. **Modelos e estratégias para a extração da malha viária em imagens digitais**. Relatório FAPESP, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2002.
- JAIN, R.; Kasturi, R; Schunck, B. G. **Machine Vision**. MIT Press and McGraw-Hill, Inc New York - 1995.

LAPTEV, I., MAYER, H., LINDEBERG, T., ECKSTEIN, W., STEGER, C., BAUMGARTNER, A., Automatic extraction of roads from aerial images based on scale space and snakes. **Machine Vision and Applications** 12 (1), 22-31, 2000.

PARKER, J. R. **Algorithms for Image Processing and Computer Vision**. John Wiley & Sons, Inc., New York, 417p, 1997.

SILVA, M., A.; DAL POZ, A. P., Detecção e reconstrução automática de junções de rodovia em imagens digitais de cenas rurais. **Boletim de Ciências Geodésicas**, 2003.

TEOH, C.; SOWMYA, A. Junction Extraction from high resolution images by composite learning. In: **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, Vol. XXXIII, part B3, pp. 882 – 888, 2000.

VALE, G. M., **Extração Semi-Automática do Eixo de Rodovias em Imagens de Média e Alta Resolução Usando Programação Dinâmica**; Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 115p, 2003.

WANG, Y.; TRINDER, J. Automatic road network extraction by hierarchical grouping. In: **ASPRS 2000 Annual Conference**, Washington, D.C., Proceedings, 2000.

ZANIN, R., B., **Metodologia Automática Para Extração de Cruzamento de Rodovia em Imagens de Alta Resolução**; Dissertação de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (UNESP), 102p, 2004.

ZIOU D., TABBONE S. Edge Detection Techniques- An Overview. **Pattern Recognition and Image Analysis**, 8(4), 1998

6. AGRADECIMENTOS

A ESTEIO – Engenharia e Aerolevantamentos S.A., de Curitiba – PR, que colaborou decisivamente nesta pesquisa através do fornecimento dos dados, e imagens usadas nos experimentos.

Recebido em 26 de março de 2004 – Aceito para publicação em 17 de maio de 2004.