

Metodologias para a Extração Semi-Automática de Rodovias em Imagens Digitais

Aluir Porfirio Dal Poz¹
 Peggy Agouris²
 Sotiris Gyftakis³

¹ UNESP - Departamento de Cartografia
 19060-900 - Presidente Prudente, SP
 ✉ aluir@prudente.unesp.br

^{2, 3} University of Maine - Dept. of Spatial Information Science and Engineering
 Orono, Maine - USA

² ✉ peggy@spatial.maine.edu

³ ✉ sotiris@spatial.maine.edu

Conteúdo	
	1 Introdução
	2 Metodologias para a Extração de Rodovias
	2.1 Programação Dinâmica
	2.1.1 Modelo Genérico de Rodovia
	2.1.2 Solução do Modelo Genérico de Rodovia
	2.2 Análise de Bordas e da Superfície Intensidade
	2.2.1 Modelo de Trajetória
	2.2.1 Modelo de Bordas
	2.3 Contorno Ativo ou Curva Snakes
	2.3.1 Funções de Energia
	2.3.2 Algoritmo de Otimização
	3 Resultados
	4 Conclusões
	5 Agradecimentos
	6 Referencias Bibliográficas

Resumo: Neste trabalho são apresentadas três metodologias para a extração semi-automática de rodovias em imagens aéreas e de satélite. O primeiro método baseia-se na solução de um modelo matemático descrevendo as propriedades geométricas e fotométricas do objeto rodovia, através do algoritmo de programação dinâmica. Para inicializar o processo de extração é necessário que um operador forneça alguns pontos descrevendo grosseiramente as rodovias. O segundo método combina dois modelos, isto é, o de bordas paralelas e o da trajetória da rodovia. O processo de extração é inicializado por um operador que deve fornecer a posição e a direção de um ponto inicial de cada rodovia. No terceiro método a curva snakes (ou contorno ativo) é usada para modelar o objeto rodovia. O processo de extração é inicializado de forma semelhante ao primeiro método. Neste artigo são apresentados os fundamentos matemáticos das três metodologias, bem como os respectivos resultados e discussões dos mesmos.

Palavras chave: Programação Dinâmica, Análise de Bordas, Contorno Ativo

Abstract: This paper presents three semi-automatic road extraction approaches from aerial and satellite images. In the first approach, a generic road model is formulated using six basic road properties, and is solved sequentially by a dynamic programming algorithm. A few seed points describing coarsely the road need to be provided by the operator. In the second approach, a combination of an edge analysis road follower and a new area-based correlation road follower is presented. The operator needs to furnish an initial point and its direction for initializing the extraction process. In the last approach, an active contour (snake) is used to model the road. This active contour is described by an energy functional that contains external and internal image forces. After the initialization, the snake moves until its energy is minimized. The mathematical fundamentals of the methods and experimental results are presented and discussed in this paper.

Keywords: Dynamic Programming, Edge Analysis, Snakes

Apoio: FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Brasil), Processo no. 1998/15553-3, e NSF (National Science Foundation, USA), Processo no. IRI-9702233.

1 Introdução

A coleta e a atualização de dados para SIG são geralmente realizadas através de fotografias aéreas e imagens de satélite. Diversas pesquisas sobre extração automática e semi-automática de rodovias em imagens digitais têm sido realizadas por especialistas das áreas de Visão Computacional e Fotogrametria Digital, desde a década de 70. Trabalhos pioneiros nesta área são encontrados em Bajcsy/Tavakoli (1976) e Quam (1978). O critério mais comum usado para classificar os métodos de extração de rodovias está relacionado com a necessidade ou não de interferência do operador humano com o sistema de extração, dando origem aos denominados métodos automáticos e semi-automáticos. É possível identificar dois esquemas básicos de extração semi-automática de rodovias. Num primeiro, o operador necessita fornecer a posição e a direção da rodovia em um ponto inicial, a partir do qual o restante da rodovia é extraída. Normalmente se empregam algoritmos baseados na análise de consistência de perfis da superfície intensidade extraídos transversalmente ao eixo da rodovia (Quam, 1978; Vosselman/de Knecht, 1995) ou na análise de bordas anti-paralelas

(Nevatia/ Babu, 1980, Dal Poz et al., 2000) ou na combinação entre ambos princípios (McKeown/Denlinger, 1988). Num segundo, o operador necessita fornecer alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. O polígono inicial pode então ser refinado através de algoritmos baseados na otimização global por programação dinâmica ou no princípio do contorno ativo ou *snakes* (Gruen/Li, 1997, Li, 1997, Dal Poz et al., 2000). Se estes métodos forem combinados com métodos de detecção automática de pontos sementes, como um encontrado em Zlotnick/Carnine (1993), a metodologia resultante poderia ser considerada como automática. Entretanto, uma metodologia originalmente desenvolvida para ser totalmente automática é apresentada em Baumgartner et al. (1997, 1999). Neste método, o contexto (isto é, relações entre as rodovias e outros objetos) e a análise de bordas ao longo do espaço-escala são combinados para extrair automaticamente as rodovias. Outros exemplos de métodos automáticos são encontrados em Barzohar/Cooper (1996) e Ruskoné et al. (1994).

Neste artigo são comparadas três metodologias para extração semi-automática de rodovias em imagens digitais. As três metodologias de extração são brevemente apresentadas na seção 2. Primeiro é apresentada uma metodologia baseada no algoritmo de programação dinâmica, seguida de uma outra metodologia combinando análise de bordas e análise da superfície intensidade do leito de rolagem das rodovias. A terceira metodologia baseia-se no princípio de contorno ativo ou *snakes*. Os resultados experimentais obtidos a partir de dados reais e sintéticos são apresentados na seção 3. Finalmente, as principais conclusões são apresentadas na seção 4.

2 Metodologias para a Extração de Rodovias

2.1 Programação Dinâmica

A metodologia de extração a ser apresentada consiste basicamente em resolver um modelo genérico de rodovia através de uma estratégia de otimização global usando programação dinâmica. Para inicializar o processo de extração é necessário que um operador forneça alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a rodovia. Este procedimento dá origem a um polígono inicial, a ser refinado através de uma estratégia iterativa. Em cada iteração, novos vértices aproximados são interpolados linearmente entre os pares de vértices preexistentes. O polígono resultante é então refinado resolvendo o modelo geral de rodovia através do algoritmo de programação dinâmica. O processo converge quando os novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento do polígono descrevendo a rodovia.

Nas próximas subseções são apresentados o modelo geral de rodovia e alguns detalhes acerca de sua solução usando o algoritmo de programação dinâmica. Detalhes sobre o método podem ser encontrados em Ballard/Brown (1982), Li (1997) e Dal Poz et al. (2000).

2.1.1 Modelo Genérico de Rodovia

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

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} ((E p_1 - \beta E p_2 + \gamma E p_3) [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})]) / \Delta S_i = \sum_{i=1}^{n-1} E(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) \quad (1)$$

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

onde:

- E : corresponde à função objetivo (eq. 1), podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1} , p_i , p_{i+1}) do polígono que representa a rodovia;
- C_i : devido a sua definição (eq. 2), 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 $C_i < T$;
- $E p_1$, $E p_2$ e $E p_3$: parâmetros representando propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- α : ângulo de deflexão no vértice i (figura 1);
- ρ_i : distância entre os vértices $i-1$ e i (figura 1); e
- e e γ : são constantes positivas.

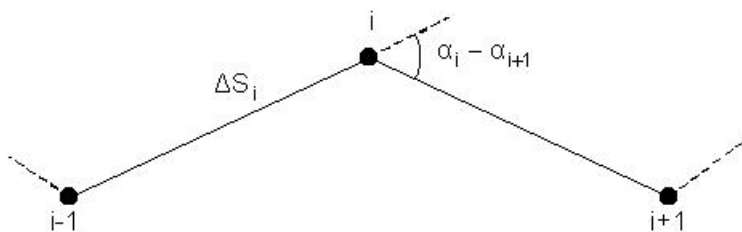


Fig. 1 : Polígono representando a rodovia.

O modelo matemático 1 é resolvido seqüencialmente através do algoritmo a ser brevemente apresentado na próxima subseção.

2.1.2 Solução do Modelo Genérico de Rodovia

Como mostra a equação 1, nem todos os vértices estão inter-relacionados simultaneamente. Nesse caso, a programação dinâmica é um algoritmo eficiente para resolver o problema de otimização (Ballard/Brown, 1982).

À primeira vista, a descrição de uma rodovia através de um polígono pode ser realizada com vértices equidistantes. Como nesse caso as posições dos vértices não estão relacionadas com a forma da curva, a quantidade de pontos é geralmente bem maior que a necessária para descrevê-la. Uma solução mais adequada é apresentada em Li (1997). Entretanto, algumas modificações foram realizadas na versão original do algoritmo. A figura 2 ilustra o princípio do processo de otimização usando programação dinâmica. Inicialmente, são fornecidos vários pontos sementes, cujas localização e distribuição são grosseiras (figura 2(a)). Ligando-se estes pontos, obtém-se a primeira aproximação para a rodovia. O processo de refinamento do polígono inicial é iterativo, como segue:

- **1ª iteração:** entre cada par de pontos sementes é inserido um novo ponto através de interpolação linear (figura 2(b)). As linhas tracejadas (figuras 2(b) e 2(c)) representam as janelas de busca. O procedimento de otimização através da programação dinâmica gera uma nova aproximação para a rodovia (figura 2(c)); e
- **demais iterações:** procedimentos idênticos são repetidos nas demais iterações.

O processo converge quando, numa determinada iteração, a otimização de todos os novos pontos inseridos linearmente gera apenas pontos colineares aos preexistentes, sendo também estes últimos pontos, alvo do mesmo processo global de otimização. O resultado após a convergência é ilustrado na figura 2(d).

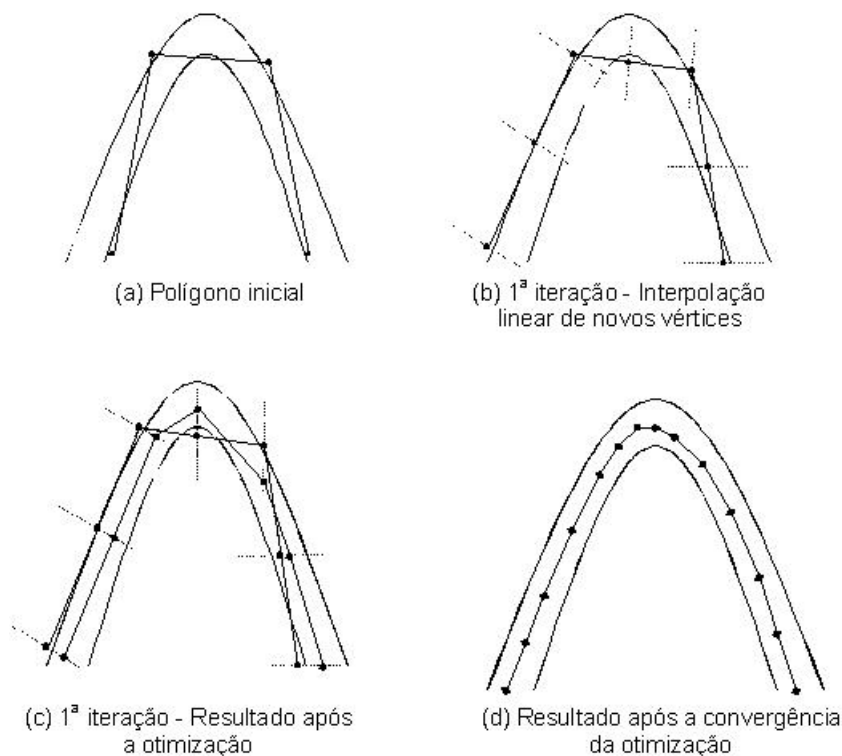


Fig. 2 : Ilustração do processo de otimização

2.2 Análise de Bordas e da Superfície Intensidade

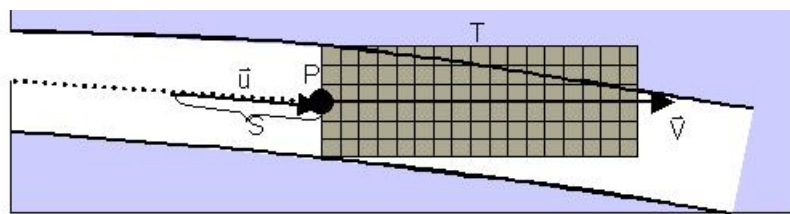
O método baseado em análise de bordas e da superfície intensidade é um seguidor de rodovias. Algumas informações iniciais devem ser fornecidas pelo operador para inicializar o processo de extração, sendo geralmente a posição e a orientação em um ponto inicial da rodovia.

Como em McKeown/Carnine (1988), a presente metodologia baseia-se nos modelos de bordas e de trajetória. O modelo de trajetória realiza a extrapolação do último ponto extraído um passo adiante. O ponto extrapolado é então usado pelo modelo de bordas para extrair um novo 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.

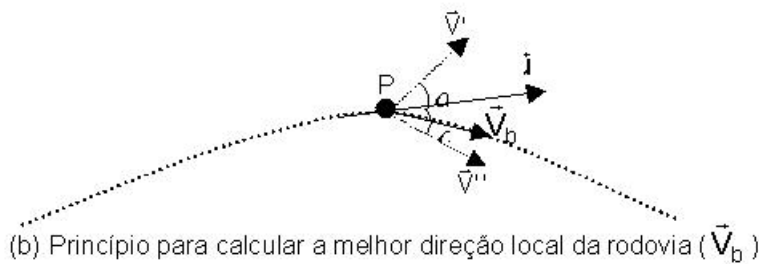
2.2.1 Modelo de Trajetória

McKeown/Carnine (1988) e Quam (1978) usaram um modelo parabólico para descrever a trajetória da rodovia. Uma deficiência desta solução é que apenas os últimos pontos extraídos são usados para descrever localmente a trajetória da rodovia. Conseqüentemente, é esperada pouca tolerância às falhas sucessivas.

Visando minimizar a deficiência apontada, uma nova solução foi proposta em Dal Poz et al. (2000). Nesta solução, as informações situadas adiante do último ponto extraído são também analisadas, possibilitando um melhor tratamento das irregularidades presentes na rodovia e nas adjacências. O princípio da solução proposta pode ser visto na figura 3.



(a) Definição do *template* T



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

Fig. 3 : Processo de extrapolação

O cálculo da melhor direção local no último ponto extraído (P) é realizado através do *template* T (figura 3(a)). Este *template* é uma matriz de m linhas e n colunas. Afim de que T coincida localmente com a rodovia, o lado menor (m) é escolhido aproximadamente igual à largura local da rodovia e o lado maior (n), dependendo principalmente da curvatura local, algumas vezes maior que m. Os nm elementos de T são reamostrados através de algum interpolador de tons de cinza. T pode rotacionar 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{V}_1) através do ajustamento de uma linha reta ao conjunto (S) dos últimos pontos extraídos (figura 3(a)).

A melhor direção local (\vec{V}_b) é calculada na segunda etapa através da rotação de T em pequenos passos, graus no sentido anti-horário e o mesmo arco no sentido horário, tendo o vetor \vec{V}_1 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, i. e.: 1-uma rodovia geralmente aparece na imagem mais clara que as adjacências; e 2-é localmente homogênea. Define-se, então,

$$M = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n T^2(x_i, y_j)}{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n [T(x_i, y_j) - T_M]^2} \quad (3)$$

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; e
- 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 como um vetor unitário, o ponto $P(x,y)$ pode ser extrapolado dt pixels adiante, como segue,

$$\begin{bmatrix} x' \\ y' \end{bmatrix} = dt \vec{V}_b + \begin{bmatrix} x \\ y \end{bmatrix} \quad (4)$$

O ponto extrapolado $P'(x',y')$ é usado pelo modelo de bordas para extrair um novo ponto do eixo da rodovia. Sempre que o modelo de bordas falhar, o *template* T é trasladado para P' e um novo cálculo de M é realizado, seguido de um novo passo de extrapolação através da equação 4.

2.2.1 Modelo de Bordas

O modelo de bordas utilizado é similar ao encontrado em McKeown/Denlinger (1988). Inicialmente, o operador do gradiente de Sobel de dimensão 5x5 é aplicado ao longo da linha perpendicular ao eixo da rodovia no último ponto extrapolado (P'). As informações de direção e magnitude são então utilizadas para calcular um fator de qualidade de borda, através da média ponderada de quatro outros fatores específicos de qualidade de borda. Estes fatores são funções lineares variando no intervalo normalizado [0; 1], sendo os mesmos:

- **Fator de magnitude:** assume valor próximo de 1 para pontos de borda de alta magnitude;

- **Fator de orientação:** assume valor próximo de 1 para pontos de borda de orientação do gradiente aproximadamente perpendicular a melhor direção local () em P';
- **Fator de diferença em magnitude:** assume valor próximo de 1 para pontos de borda cuja variação de magnitude é alta; e
- **Fator de diferença em orientação:** assume valor próximo de 1 para pontos de borda cuja variação de direção é baixa.

Os valores máximos do fator de qualidade de borda encontrados em ambos lados do eixo da rodovia, desde que excedam um limiar pré-definido, correspondem aos melhores pontos de borda. Três casos podem ser identificados:

- **2 pontos de borda são encontrados em ambos lados da rodovia:** o ponto do eixo da rodovia é calculado como o ponto médio dos dois pontos de borda;
- **1 ponto de borda é encontrado num lado da rodovia:** o ponto do eixo da rodovia é calculado através do ponto de borda e a da largura da rodovia; e
- **Nenhum ponto de borda é encontrado:** não é possível calcular nenhum ponto do eixo da rodovia.

2.3 Contorno Ativo ou Curva Snakes

O trabalho pioneiro nesta área é devida a Kass et al. (1987). Desde então, muito foi feito no campo teórico e prático. O conceito de contorno ativo é baseado na detecção de curva através da otimização de modelos de contraste e de suavidade de curvas.

Neste artigo a curva *snakes* é representada através de um polígono com n vértices. Os problemas principais são como definir as funções de energia nos vértices do polígono e como resolver o problema de otimização envolvendo estas funções.

2.3.1 Funções de Energia

Em geral, as funções de energia contêm forças internas e externas. As forças internas permitem ao contorno expandir ou curvar num ponto específico. As forças externas atraem o contorno para as entidades significantes da imagem.

A energia total em cada ponto pode ser expressa como segue:

$$E_{snake} = \alpha E_{cont} + \beta E_{curv} + \gamma E_{edge} \quad (5)$$

onde,

- E_{cont} e E_{curv} são, respectivamente, os termos de continuidade de primeira e segunda ordem, isto é, as forças internas;
- E_{edge} é termo de borda (força externa); e
- α, β, γ são os pesos (relativos) de cada termo da função energia (eq. 5).

Sendo o i -ésimo ponto do contorno e $|\nabla G|$ a magnitude do gradiente no mesmo ponto, os termos da função energia são definidos como seguem:

$$E_{cont} = \sum_{i=1}^{n-1} (|v_{i+1} - v_i| / (n-1) - |v_i - v_{i+1}|) \quad (6)$$

$$E_{curv} = (v_{i-1} - 2v_i + v_{i+1})^2 \quad (7)$$

$$E_{edge} = -|\nabla G(v_i)| \quad (8)$$

O primeiro termo da equação 6 é a distância média entre pontos do polígono representando a rodovia. Este termo garante que os pontos fiquem igualmente espaçados, evitando o agrupamento de pontos em algumas áreas. Permite também que a distância entre os pontos seja minimizada. O termo de borda (equação 8) força os pontos a moverem-se na direção das bordas da imagem.

2.3.2 Algoritmo de Otimização

A fim de obter o valor mínimo da função energia para toda a curva *snakes*, foram desenvolvidas várias técnicas. Em Kass et al. (1987), um método variacional (equação de Euler-Lagrange) é analisado e resolvido numericamente. Amini et al. (1990) propôs uma solução através da programação dinâmica para resolver o problema de otimização. Uma solução iterativa e computacionalmente mais efetiva foi proposta em Williams/Shah (1992), sendo por isso adotada na implementação atual.

No algoritmo de Williams-Shah, a função energia é calculada para cada ponto da vizinhança do ponto corrente v_i . O ponto anterior (v_{i-1}) já foi otimizado e movido para uma nova posição. O ponto posterior (v_{i+1}) não foi ainda otimizado. Os pontos anterior e posterior são usados, juntamente com o ponto corrente, para calcular os termos de energia (equações 6, 7 e 8). A localização do ponto, cuja energia é mínima, é atribuída ao vértice v_i . Este procedimento é então repetido para todos os vértices, fechando um ciclo de iteração. No final

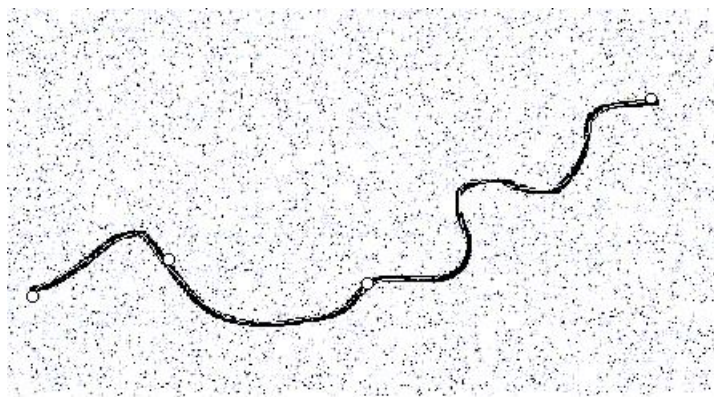
de cada iteração é verificada a convergência do processo de extração, ocorrendo quando a forma e posição da curva *snakes* se estabilizam. Nesse caso, a energia total da curva *snakes* é também mínima. O polígono resultante desse processo de otimização representa a rodovia extraída.

3 Resultados

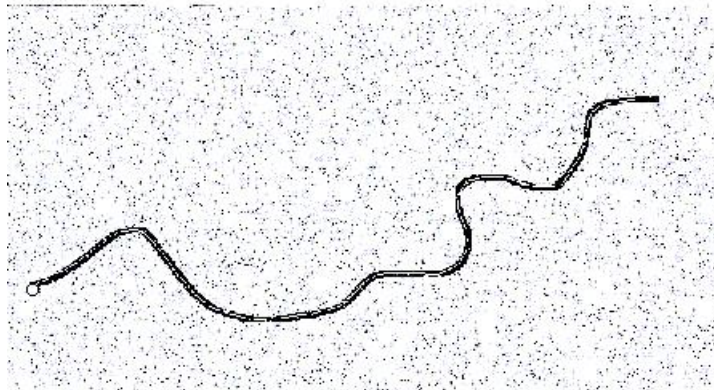
O método apresentado na seção 2 foi implementado em linguagem Borland C++ para o ambiente Windows-PC.

Visando a avaliação dos métodos apresentados, foram realizados experimentos com dados reais e sintéticos. Uma imagem sintética (642x350 pixels) de média resolução foi gerada, na qual pode ser observada uma rodovia de largura média de 5 pixels e com forma relativamente ondulada. Essa imagem foi corrompida com o ruído *salt & pepper*. Foi utilizada uma imagem real (500x500 pixels) de média resolução, sendo que cada pixel corresponde a aproximadamente 2m no terreno. Essa imagem foi obtida junto a *home page* do Sistema BADGER (<http://badger.parl.com/>), que é composta por um *software* para a distribuição via Internet de mapas e imagens da Baía de São Francisco, Califórnia, EUA.

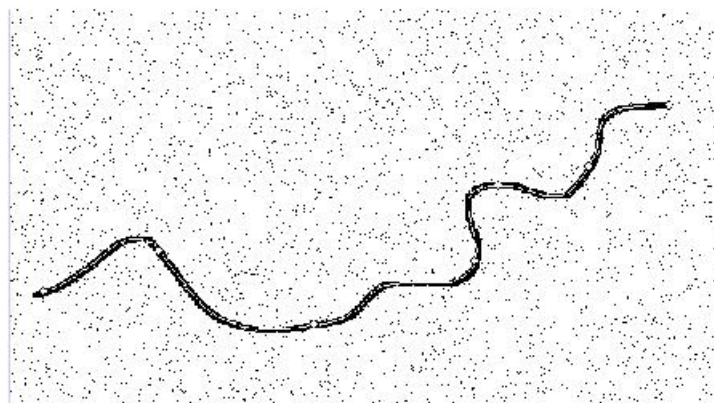
A figura 4 mostra os resultados obtidos usando a imagem sintética. Em todos os casos os pontos sementes usados para inicializar o processo de extração são mostrados sobre as imagens. No caso do método baseado em análise de bordas e da superfície intensidade, apenas um ponto inicial, além de uma direção aproximada, é utilizado. Todos os pontos sementes são fornecidos por um operador, que faz uso de sua habilidade natural em reconhecer na imagem os objetos de interesse (rodovias) e em identificar alguns pontos sementes descrevendo aproximadamente as rodovias. A tarefa tediosa e precisa de medir é então deixada a cargo dos algoritmos computacionais de extração, cujos resultados mostram-se bastante satisfatórios. Contudo, tendo por referência o eixo central da rodovia, pode ser observado que o método baseado em programação dinâmica propiciou um resultado ligeiramente inferior aos dois outros métodos. Este resultado é geralmente esperado quando as rodovias são caracterizadas por duas bordas paralelas e bem definidas. Nesse caso, são favorecidos os métodos em que o eixo central da rodovia é definido explicitamente como o ponto médio de dois pontos de borda, a exemplo do que ocorrem com os métodos baseados em *snakes* e análise de bordas e da superfície intensidade. Por outro lado, a entidade extraída pelo método baseado em programação dinâmica corresponde ao máximo da função objetivo (equação 1), não coincidindo necessariamente com o eixo da rodovia.



(a) Programação dinâmica



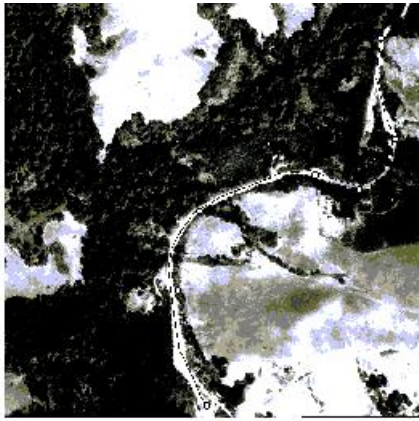
(b) Análise de bordas e da superfície intensidade



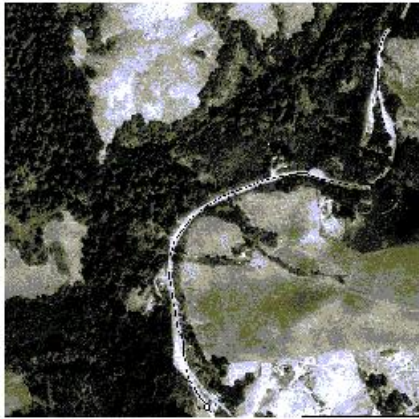
(c) Contorno ativo ou *snakes*

Fig. 4 : Resultados usando a imagem sintética

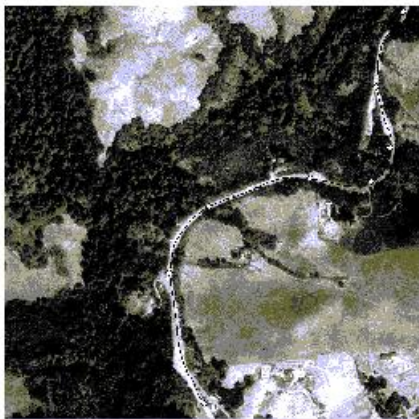
A figura 5 mostra os resultados obtidos para a imagem real. Como no exemplo anterior, os vetores (rodovias) extraídos e os pontos sementes usados estão sobrepostos na imagem de entrada. O conteúdo dessa imagem é bastante desfavorável, notando-se que a rodovia é bastante irregular e há várias árvores obstruindo a rodovia. Analisando-se os resultados, verifica-se que o desempenho foi satisfatório, principalmente para o algoritmos de programação dinâmica e *snakes*. Provavelmente, o mecanismo de controle destes dois métodos, que são baseados num conjunto de pontos sementes distribuídos ao longo das rodovias, devem ter favorecido os respectivos desempenhos no processamento desse caso bastante desfavorável.



(a) Programação Dinâmica



(b) Análise de bordas e da Superfície intensidade



(c) Contorno ativo ou *snakes*

Fig. 5 : Resultados usando a imagem real

4 Conclusões

Neste artigo foram apresentados três métodos para extrair rodovias de imagens de satélite e de fotografias aéreas digitalizadas. Estes métodos podem ser utilizados na captura semi-automática de dados para SIG. O operador realiza a tarefa de reconhecimento dos objetos de interesse e identifica e mede alguns pontos sementes sobre os mesmos, ficando a cargo dos algoritmos computacionais a tarefa demorada e precisa de realizar medidas.

Embora tenham sido poucos os experimentos apresentados e analisados neste artigo, pode-se chegar a algumas conclusões gerais sobre o desempenho dos métodos. O método baseado em programação dinâmica mostrou-se robusto frente à presença de obstruções e outros distúrbios. Resultados semelhantes foram obtidos pelo algoritmo de otimização baseado em *snakes*. O método baseado na combinação de análise de bordas e da superfície intensidade mostrou-se bastante efetivo quando as rodovias a serem extraídas são caracterizadas por bordas regulares e bem definidas. Mostrou-se também apto no tratamento de obstruções e de outras irregularidades.

5 Agradecimentos

Este trabalho foi apoiado pela FAPESP (Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, Brasil), Processo no. 1998/15553-3, e NSF (*National Science Foundation, USA*), Processo no. IRI-9702233.

6 Referencias Bibliográficas

- Amini, A., Weymouth, T., Jain, R.:** *Using Dynamic Programming for Solving Variational Problems in Vision*, IEEE Trans. on Pattern Analysis and Machine Intelligence, No 12/1990, p. 855-867.
- Bajcsy, R., Tavakoli, M.:** *Computer recognition of roads from satellite pictures*, IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, No 6/1976, p. 76-84.
- Ballard, D. H., Brown, C. M.:** *Computer Vision*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, New Jersey, 1982.
- Barzohar, M., Cooper, D.:** *Automatic finding of main roads in aerial images by using geometric-stochastic models and estimation*, IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, No. 18/1996, p. 707-721.
- Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H.:** *Update of road in GIS from aerial imagery: verification and multi-resolution extraction*. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing. Vol. XXXI, Part B3, Proceedings, ISPRS, p. 53-58, 1996.
- Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W.:** *Multi-resolution, semantic objects, and context for road extraction*. In: Workshop on Semantic Modeling for the Acquisition of Topographic Information from Images and Maps. Basel (Schweiz), Proceedings, p. 140-156, 1997.
- Baumgartner, A., Steger, C., Mayer, H., Eckstein, W., Ebner, H.:** *Automatic road extraction in rural areas*. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing. Munique, Vol. XXXII, Part 3-2W5, Proceedings, ISPRS, p. 107-112, 1999.
- Dal Poz, A. P., Gyftakis, S., Agouris, P.:** *Semi-automatic road extraction: Comparison of methodologies and experiments*, In: DC 2000 ASPRS Annual Conference, CD-ROM, Washington-DC, Proceedings, USA, 2000.
- Fiset, R., Cavayas, F., Mouchot, M. C., Solaiman, B., Desjardins, R.:** *Map-image matching using a multi-layer perceptron: the case of the road network*, ISPRS journal of Photogrammetry & Remote Sensing, No. 53/1998, p. 76-84.
- Gruen, A., Li, H.:** *Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes*, Photogrammetric Engineering & Remote Sensing, No. 63/1997, p. 985-995.
- Kass, M., Witkin, A., Terzopoulos, D.:** *Snakes: Active contour models*. In: 1st Int. Conf. on Computer Vision, London, Proceedings, p. 259-268, 1997.
- Li, H.:** *Semi-automatic road extraction from satellite and aerial images*. PhD thesis, Report No. 61, Institute of Geodesy and Photogrammetry, ETH-Zurich, Switzerland, 1997.
- McKeown, D. M., Denlinger, J. L.:** *Cooperative methods for road tracking in aerial imagery*. In: Workshop of Computer Vision and Pattern Recognition, Proceedings, p. 662-672, 1998.
- Nevatia, R., Babu, K. R.:** *Linear feature extraction and description*, Computer Graphics and Image Processing, No. 13/1980, p. 257-269.
- Plietker, B.:** *Semiautomatic revision of street objects in ATKIS database DLM 25/1*. In: Int. Arch. Photogramm. Remote Sensing. Vol. XXX, Part 4, Proceedings, p. 311-317, 1994.
- Quam, L. H.:** *Road tracking and anomaly detection in aerial imagery*. In: Image Understanding Workshop, Proceedings, p. 51-55, 1978.
- Ruskoné, R., Airault, S., Jamet, O.:** *A road extraction system using the connectivity properties of the network*, Zeitschrift für Photogrammetrie und Fernerkundung, No. 5/1994, p. 174-180.
- Vosselman, G., de Gunst, M.:** *Updating road maps by contextual reasoning*. In: 2nd Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Ascona, Proceedings, 1997.
- Vosselman, G., de Knecht, J.:** *Road tracing by profile matching and Kalman filtering*. In: Workshop on Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images, Proceedings, p. 265-274, 1995.
- Williams, D. J., Shah, M.:** *A fast algorithm for active contours and curvature estimation*, CVGIP: Image Understanding, No. 55/1992, p. 14-26.
- Zlotnick, A., Carnine, P.D.:** *Finding roads seeds in aerial images*, CVGIP: Image Understanding, No. 57/1997, p. 243-260, 1997.