

METODOLOGIA MODIFICADA DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA A EXTRAÇÃO ACURADA DO EIXO DE RODOVIA EM IMAGENS DIGITAIS

Giovane Maia do Vale¹
Aluir Porfírio Dal Poz²

¹Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia
Programa de Pós-graduação em Ciências Cartográficas - PPGCC
Rua Roberto Simonsen, 305 - Presidente Prudente - SP
gmvale@prudente.unesp.br

²Universidade Estadual Paulista
Faculdade de Ciências e Tecnologia- Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305 - Presidente Prudente - SP
aluir@prudente.unesp.br

RESUMO

Este trabalho propõe uma metodologia semi-automática para a extração de rodovias, em imagens de média e alta resolução, baseada no algoritmo de otimização global por programação dinâmica. Esta metodologia é uma versão modificada de um método preexistente para a extração de rodovias em imagens de baixa resolução. É importante enfatizar que as rodovias em imagens de baixa resolução possuem uma característica linear e, conseqüentemente, as correspondentes feições extraídas coincidem com as respectivas rodovias. Em contrapartida, em imagens de média e alta resolução, as rodovias aparecem como faixas estreitas e alongadas e o alvo da extração são os seus eixos centrais. Neste caso, a metodologia preexistente destinada à extração em imagens de baixa resolução se mostra incapaz de proceder a extração de forma acurada. No sentido de se sanar esta deficiência, propõe-se a modificação da função objetivo original a fim de que esta passe a incorporar uma definição matemática para o eixo de rodovia, utilizando-se, para tanto, informações inerentes às bordas. Os resultados obtidos demonstraram o potencial do algoritmo na extração do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução.

Palavras chaves: Programação Dinâmica, Análise de Bordas, Extração de Rodovias.

ABSTRACT

This work presents a semi-automatic methodology for road extraction from medium- and high-resolution images, based on the global optimization algorithm of dynamic programming. This methodology is a modified version of a preexisting method of extraction of roads from low-resolution images. It is important to emphasize that the roads in low-resolution images manifest as line and, as a result, the corresponding extracted features coincide with the respective roads. On the other hand, in medium- and high-resolution images, the roads appear as narrow and elongated regions and the goal of the extraction is its central axes. In this case, the preexisting dynamic programming methodology designated to specially extract roads from low-resolution images proved to be unable to accurately extract road center axes from medium- and high-resolution images. In other to correct this deficiency, a modification of the original objective function is proposed, in such way it incorporates a road center axis definition. The obtained results demonstrated the potential of the algorithm in the extraction of the road axis from medium- and high-resolution images.

Keywords: Dynamic Programming, Edge Analysis, Road Extraction

1. INTRODUÇÃO

A aquisição de informações espaciais é uma das tarefas mais dispendiosa e morosa na implantação e na manutenção de Sistemas de Informação Geográfica (SIG's). Nos últimos 30 anos, inúmeras pesquisas foram realizadas objetivando a redução do tempo e do custo da aquisição de informações espaciais. No que se refere a aquisição de informações espaciais a partir de imagens digitais, os métodos desenvolvidos que estão mais próximos desta meta são aqueles cujos níveis de automação são mais altos. Como as soluções totalmente automáticas não estão ainda no mesmo nível de confiabilidade dos métodos manuais, soluções semi-automáticas combinando a habilidade natural de operadores humanos em tarefas de reconhecimento e a capacidade de algoritmos computacionais em realizar tarefas de medidas precisas e morosas, têm sido propostas. No tocante aos extratores de rodovias, é possível identificar dois esquemas básicos de extração semi-automática. No primeiro, é necessário que o operador forneça a posição e a direção em um ponto inicial, a partir do qual a extração ocorrerá. No segundo, o operador necessita fornecer alguns pontos semente descrevendo a forma e a posição da rodovia. Nos métodos semi-automáticos o reconhecimento do alvo de extração é feito pelo operador e o algoritmo encarrega-se do delineamento da rodovia. Pode-se citar como exemplo do primeiro esquema: a) sistemas baseados na análise de consistência de perfis da superfície intensidade extraídos transversalmente ao eixo da rodovia (VOSSelman e DE KNECHT, 1995; MENDES e DAL POZ, 2002); b) análise de bordas anti-paralelas (NEVATIA e BABU, 1980); c) uma combinação entre análise de bordas e análise de consistência (MCKEOWN e DELINGER, 1988; DAL POZ, 2001a); e d) em teste ativo (GEMAN e JEDYNAK, 1996; DAL POZ e SILVA, 2002). Exemplos do segundo esquema são: a) a estratégia de otimização global por programação dinâmica (MERLET e ZERUBIA, 1996; GRUEN e LI, 1997; DAL POZ, 2001); b) o princípio do contorno ativo, *snakes* (KASS ET AL., 1987; GRUEN e LI, 1997); e c) a estratégia envolvendo redes neurais (DOUCETTE ET AL., 2001). Quando o reconhecimento da rodovia a ser extraída (a detecção de pontos semente) é feita pelo algoritmo, a metodologia resultante pode ser considerada como sendo automática. Os métodos automáticos visam eliminar a necessidade da intervenção do operador humano no processo de extração. Estes métodos se baseiam na integração da informação contextual e no conhecimento *a priori* do objeto rodovia. Baumgartner et al. (1999) seguem esta linha teórica e apresentam uma metodologia em que o contexto, técnicas de agrupamento perceptivo e diferentes resoluções são usados para extrair a malha viária em imagens de alta resolução. O mesmo grupo (LAPTEV ET AL., 2000) também usa um tipo especial de *snakes* para reconstruir as descontinuidades, cujo princípio consiste em otimizar um segmento perturbado e localizado entre dois pontos dados. Wang e Trinder (2000) descrevem um outro método para a extração automática da malha

viária, mas específico para imagens de baixa resolução. Este 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.

Referindo-se especificamente aos trabalhos sobre extração de feições utilizando a metodologia de programação dinâmica, pode-se ressaltar que nos últimos 30 anos inúmeras pesquisas, nas mais diversas áreas de conhecimento, vêm sendo desenvolvidas. Dentre estes trabalhos destacam-se: a detecção de feições lineares suaves de Montanari (1971); a extração de rodovias em imagens de baixa resolução de Fischler et al. (1981); o delineamento de bordas de Ballard e Brown (1982); o delineamento de nodos renais (glomérulos), em imagens médicas, de Yamada et al. (1988); a ferramenta "*Intelligent Scissors*" (Tesouras Inteligentes), destinada ao delineamento do contorno de objetos em imagens digitais, desenvolvida por Mortensen e Barret (1995); o extrator de rodovias para imagens de baixa resolução, apresentado em Gruen e Li (1995, 1997), dentre outros.

Conforme destacam Agouris et al. (1988) e Bellman e Shortis (2002), existem dois tipos básicos de feições lineares que são alvo dos processos de extração: 1) feições descrevendo o contorno dos objetos, por exemplo, bordas e linhas; e 2) o eixo central, por exemplo, o eixo de rodovia em imagens de alta resolução.

Dessa forma, cabe ressaltar que, de modo geral, os trabalhos prévios destinavam-se à extração de feições lineares (tipo 1). Este constitui o diferencial entre o trabalho aqui apresentado e seus antecessores, visto que a metodologia, aqui apresentada, destina-se à extração de feições do tipo 2.

A metodologia apresentada neste artigo baseia-se nos trabalhos de Dal Poz (2000) e de Dal Poz e Agouris (2001), nos quais uma solução para um modelo matemático geral de rodovia, em imagens de baixa resolução, é encontrada através do algoritmo de programação dinâmica. Entretanto, são propostas alterações substanciais ao modelo matemático, de forma que informações sobre as bordas da rodovia sejam consideradas, possibilitando ao modelo matemático de rodovia a incorporação da definição do eixo da rodovia. Em decorrência, a metodologia resultante pode ser usada na extração acurada de rodovias em imagens de média e de alta resolução.

Na seção 2 são apresentados os fundamentos teóricos da metodologia preexistente de extração semi-automática de rodovias através do algoritmo de programação dinâmica. A alteração ao modelo é apresentada na seção 3. Os resultados experimentais obtidos e análises efetuadas encontram-se na seção 4. Finalmente, na seção 5 são apresentadas as principais conclusões.

2. METODOLOGIA EXISTENTE PARA A EXTRAÇÃO DE RODOVIAS USANDO PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

O objeto rodovia possui características próprias como sua geometria (largura, curvatura etc.), sua radiometria (reflectância) e ainda um ente topológico. Estas três características constituem o modelo geométrico, radiométrico e topológico de rodovias. A extração de rodovias usando programação dinâmica consiste em encontrar o máximo de uma função objetivo, a qual é construída a partir de propriedades geométricas e radiométricas das rodovias. Este problema de encontrar o máximo da função objetivo envolve essencialmente uma estratégia de otimização global através do algoritmo de programação dinâmica. Visto que este método é semi-automático, o papel do operador consiste na identificação de pontos sementes ao longo da rodovia, descrevendo-a grosseiramente, gerando dessa forma uma linha poligonal inicial. Esta linha poligonal é então refinada através de uma estratégia iterativa que envolve o uso do algoritmo de otimização global por programação dinâmica, ressaltando-se que o processo otimiza ternas de pontos consecutivos da linha poligonal, p_{i-1} , p_i e p_{i+1} . Inicialmente um novo vértice é inserido linearmente a cada par de vértices preexistentes. Em cada um dos três pontos sendo avaliados, abrem-se então janelas de busca unidimensionais, transversais à linha poligonal, que se destinam à avaliação de pontos à direita e à esquerda da terna. Encontram-se, dessa forma, possíveis novos candidatos que maximizarão a função objetivo. Nos demais passos o processo se repete de modo análogo, gerando linhas poligonais que, gradativamente, mais se aproximam da forma da rodovia. O processo converge quando novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal, descrevendo assim a rodovia. Ressalta-se que, a cada iteração, todos os vértices são avaliados, inclusive os preexistentes

O modelo genérico de rodovias, sobre o qual o processo de otimização brevemente descrito acima é baseado, é desenvolvido a partir de seis propriedades básicas das rodovias, sendo que três são fotométricas e três geométricas. As propriedades fotométricas são: 1) os pixels de uma rodovias são mais claros que os de fundo; 2) em distâncias curtas o material (concreto ou asfalto) da rodovia varia pouco, isto é, a reflectância ao longo da rodovia sofre pouca variação; e 3) a rodovia é uma feição linear de alta intensidade de brilho e os pontos mais distantes dessa curva tem menor influência na definição da mesma. As propriedades geométricas são: 1) as rodovias são curvas suaves, normalmente compostas por segmentos retos e arcos circulares; 2) sua curvatura local é limitada por um limiar, evitando a formação de quinas; e 3) a variação de largura não é significativa. As propriedades geométricas e radiométricas formam o arcabouço teórico para formular o modelo genérico de rodovia denominado função objetivo. Matematicamente, a função objetivo é dada por (DAL POZ, 2000; DAL POZ E AGOURIS, 2001):

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

$$C_i = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, \quad \beta, \gamma > 0 \quad (2)$$

onde, Ep_1 , Ep_2 e Ep_3 são parâmetros que incorporam as propriedades fotométricas e geométricas; α_i é a direção definida por dois pontos consecutivos (p_{i-1} e p_i) da linha poligonal; α_{i+1} é a direção definida agora pelos pontos consecutivos p_i e p_{i+1} da linha poligonal; ΔS_i é a distância entre os pontos p_{i-1} e p_i e T é um limiar angular de curvatura predefinido.

C_i é uma injunção que limita o espaço de busca. Esta injunção evita que as ternas que não satisfaçam o limiar de curvatura T não sejam avaliadas pela função objetivo, evitando desperdício computacional desnecessário.

Conforme mostra a equação 1, a função objetivo pode ser decomposta numa seqüência de funções dependendo apenas de três vértices sucessivos da linha poligonal representando a rodovia. Em outras palavras, apenas 6 variáveis (coordenadas cartesianas da terna p_{i-1} , p_i e p_{i+1}) da função objetivo são relacionadas simultaneamente. É nesse caso que o algoritmo de programação dinâmica torna-se o mais indicado para resolver eficientemente o problema inerente de otimização (BALLARD E BROWN, 1982). A solução corresponde a uma linha poligonal representando a rodovia e é tal que maximiza a função objetivo. Cabe ressaltar que quando a imagem utilizada é de média ou de alta resolução a rodovia extraída geralmente não corresponde exatamente ao eixo da rodovia. Como uma observação final, tendo em vista da limitação de espaço neste artigo, é impossível descrever o algoritmo de programação dinâmica, podendo ser encontrado em detalhes em Ballard e Brown (1982), Dal Poz (2000) e Vale (2003)

3. METODOLOGIA MODIFICADA DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA PARA EXTRAÇÃO DE RODOVIAS EM IMAGENS DE ALTA E MÉDIA RESOLUÇÃO

Na seção 2 foi brevemente apresentada a metodologia preexistente de extração de rodovias por programação dinâmica. Tal metodologia possui grande robustez e destina-se à extração de rodovias em imagens de baixa resolução, onde as feições de interesse possuem aparência linear. Foi argumentado também que, quando o algoritmo de programação dinâmica é usado em imagens de média ou de alta resoluções o eixo extraído não corresponde necessariamente ao eixo verdadeiro, sendo que nas regiões de maior curvatura tal problema se mostra de forma nítida (DAL POZ, 2000). Como foi mostrado em Vale (2003), esse problema pode ser resolvido através de uma modificação no mo-

delo de rodovia (função objetivo, eq. 01), a fim de que o mesmo venha incorporar informações de borda. O princípio de bordas anti-paralelas (NEVATIA E BABU, 1980) é o princípio teórico básico para a modificação proposta.

3.1. Modelo De Rodovia Modificado

A definição do eixo se dá pelo acréscimo de uma injeção à função objetivo (eq. 01) na forma de um triplo produto entre produtos escalar dos vetores gradiente (anti-paralelos) nos pontos de bordas de rodovia (VALE, 2003):

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) - \langle \vec{V}_{i-1}, \vec{V}'_{i-1} \rangle \cdot \langle \vec{V}_i, \vec{V}'_i \rangle \cdot \langle \vec{V}_{i+1}, \vec{V}'_{i+1} \rangle] \quad (3)$$

onde \vec{V}_{i-1} , \vec{V}'_{i-1} , \vec{V}_i , \vec{V}'_i , \vec{V}_{i+1} e \vec{V}'_{i+1} são, respectivamente, vetores anti-paralelos relacionados com as seções transversais definidas nos pontos p_{i-1} , p_i e p_{i+1} (Fig. 1).

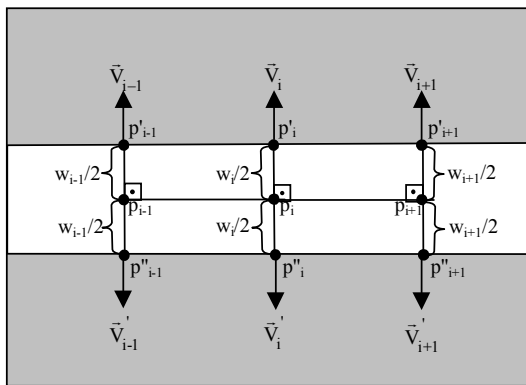


Fig. 1 – Segmento de eixo de rodovia

A segunda parcela do somatório da equação 3 é denominada injeção de borda e visa considerar aspectos peculiares às bordas das rodovias, que são:

- **Anti-paralelismo:** esta propriedade baseia-se no fato de que dois vetores gradiente de pixels situados em margens opostas da rodovia e pertencentes ao mesmo corte transversal de rodovia, são aproximadamente anti-paralelos, i.e., eles possuem mesma direção e sentidos opostos; e
- **Perpendicularismo:** vetores gradiente de pixels das bordas das rodovias são aproximadamente perpendiculares ao eixo da rodovia.

Quanto à magnitude dos pixels de borda, de modo geral, Canny (1986) e Vale e Dal Poz (2002) mostram que as bordas devem ser consideradas como um máximo local no resultado da filtragem diferencial. Dessa forma, pode-se caracterizar os pixels de borda de rodovia tanto do ponto de vista do sentido e da direção de seus vetores gradiente quanto do ponto de vista das respectivas magnitudes do gradiente.

É ainda oportuno discutir alguns aspectos relacionados com a equação 3. Dados dois vetores quaisquer \vec{u} e \vec{v} , com $\vec{u} \neq 0$ e $\vec{v} \neq 0$, e θ o ângulo entre \vec{u} e \vec{v} , tem-se que $\langle \vec{u}, \vec{v} \rangle = |\vec{u}| \cdot |\vec{v}| \cdot \cos \theta$. Levando isso em conta na equação 3, tem-se:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) - |\vec{V}_{i-1}| \cdot |\vec{V}'_{i-1}| \cdot \cos \theta_{i-1} \cdot |\vec{V}_i| \cdot |\vec{V}'_i| \cdot \cos \theta_i \cdot |\vec{V}_{i+1}| \cdot |\vec{V}'_{i+1}| \cdot \cos \theta_{i+1}] \quad (4)$$

Considerando que o objetivo básico do processo de otimização por programação dinâmica é o de encontrar o máximo da função objetivo e que o primeiro termo do somatório da equação 3 é positivo, a contribuição do novo termo deve equivaler à adição de uma grande quantidade positiva. Dessa forma, o sinal negativo entre os dois termos se justifica pelo fato de $\theta_{i-1} \cong \theta_i \cong \theta_{i+1} \cong 180^\circ$, implicando em $\cos \theta_{i-1} \cong \cos \theta_i \cong \cos \theta_{i+1} \cong -1$. Considerando também o fato de que a magnitude do gradiente em pontos de borda é máxima, os produtos escalar entre os vetores gradiente \vec{V}_{i-1} e \vec{V}'_{i-1} , \vec{V}_i e \vec{V}'_i , \vec{V}_{i+1} e \vec{V}'_{i+1} são máximos quando os vetores gradiente são tomados em pontos de borda de rodovia, conforme ilustra a figura 2. Quando isso ocorrer, a função objetivo receberá uma grande contribuição, fazendo com que os respectivos pontos do eixo (p_{i-1} , p_i e p_{i+1}) sejam posicionados acuradamente.

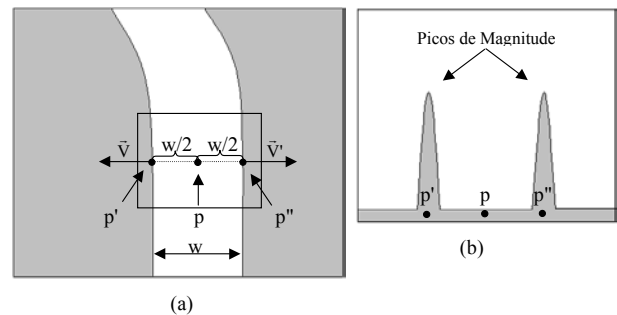


Fig. 2 – Esquema para dois pontos de bordas anti-paralelas: (a) direção dos vetores gradiente; e (b) magnitude dos vetores gradiente

A figura 2(a) mostra o caso envolvendo a seção transversal de um ponto p qualquer do eixo da rodovia. Os pontos p' e p'' pertencem às bordas da rodovia e, também, à seção transversal definida em p . Sendo w a largura local da rodovia, então, o ponto p deve estar situado a uma distância $w/2$ pixels dos pontos p' e p'' . Como nesses pontos \vec{V} e \vec{V}' serão aproximadamente anti-paralelos e as respectivas magnitudes serão extremas (Fig. 2(b)), então $\langle \vec{V}, \vec{V}' \rangle$ também assumirá um valor extremo.

Embora a equação 3 expresse o princípio fundamental envolvido, ainda não se encontra numa forma adequada para ser otimizada pelo algoritmo de programação dinâmica. Como as variáveis de interesse são as coordenadas dos pontos do eixo da rodovia, é necessário expressar as coordenadas dos pontos de borda em função dessas variáveis. Os vetores gradiente \vec{V}_{i-1} , \vec{V}'_{i-1} , \vec{V}_i , \vec{V}'_i , \vec{V}_{i+1} e \vec{V}'_{i+1} são definidos, respectivamente, nos pontos p'_{i-1} , p''_{i-1} , p'_i , p''_i , p'_{i+1} e p''_{i+1} cujas coordenadas são expressas em função das coordenadas dos pontos p_{i-1} , p_i e p_{i+1} , isto é (VALE, 2003):

$$p'_{i-1} : \begin{cases} x'_{i-1} = \frac{w_{i-1}}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_{i-1} \\ y'_{i-1} = -\frac{w_{i-1}}{2} + y_{i-1} \end{cases} \quad (5)$$

$$p''_{i-1} : \begin{cases} x''_{i-1} = -\frac{w_{i-1}}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_{i-1} \\ y''_{i-1} = \frac{w_{i-1}}{2} + y_{i-1} \end{cases} \quad (6)$$

$$p'_i : \begin{cases} x'_i = \frac{w_i}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_i \\ y'_i = -\frac{w_i}{2} + y_i \end{cases} \quad (7)$$

$$p''_i : \begin{cases} x''_i = -\frac{w_i}{2} \cdot \frac{y_i - y_{i-1}}{x_i - x_{i-1}} + x_i \\ y''_i = \frac{w_i}{2} + y_i \end{cases} \quad (8)$$

$$p'_{i+1} : \begin{cases} x'_{i+1} = \frac{w_{i+1}}{2} \cdot \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + x_{i+1} \\ y'_{i+1} = -\frac{w_{i+1}}{2} + y_{i+1} \end{cases} \quad (9)$$

$$p''_{i+1} : \begin{cases} x''_{i+1} = -\frac{w_{i+1}}{2} \cdot \frac{y_{i+1} - y_i}{x_{i+1} - x_i} + x_{i+1} \\ y''_{i+1} = \frac{w_{i+1}}{2} + y_{i+1} \end{cases} \quad (10)$$

onde, para $j = i-1, i, i+1$, (x_j, y_j) são as coordenadas dos pontos p_j e os w_j são as larguras locais da rodovia em relação aos pontos p_j .

As equações, de 5 até 10, definem então os pontos nos quais os vetores gradiente serão calculados, por exemplo, usando o algoritmo de Canny, dependendo apenas das coordenadas de pontos p_{i-1} , p_i e p_{i+1} do eixo da rodovia e das respectivas larguras locais (w_{i-1} , w_i e w_{i+1}) da rodovia. As referidas equações impõem a condição geométrica (ver figura 1) de que os pontos do eixo devem estar localizados ao longo do centro da rodovia. Em vista do exposto, sendo E_i^p a parte da função objetivo relativa à injeção de borda, tem-se:

$$\begin{aligned} & \langle \vec{V}_{i-1}, \vec{V}'_{i-1} \rangle \cdot \langle \vec{V}_i, \vec{V}'_i \rangle \cdot \langle \vec{V}_{i+1}, \vec{V}'_{i+1} \rangle = \\ & = E_i^p(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1}) \end{aligned} \quad (11)$$

Considerando a injeção de borda (eq. 11) na equação 3, tem-se:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_i(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) - E_i^p(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1})] \quad (12)$$

ou, substituindo os dois termos da somatória por $E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1})$, chega-se a:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_{i-1}, w_i, w_{i+1}) \quad (13)$$

que é a forma completa da função objetivo modificada. Vale ressaltar que, como no caso da função objetivo original (eq. 1), a equação 13 não relaciona simultaneamente todas as variáveis envolvidas. Consequentemente, tem-se novamente um problema de otimização global, passível de ser resolvido eficientemente pelo algoritmo de programação dinâmica. Uma importante simplificação pode ser realizada na equação 13, possibilitando uma significativa redução na complexidade computacional da solução algorítmica por programação dinâmica sem, contudo, afetar a qualidade dos resultados. Levando-se em conta que a largura de uma rodovia geralmente não varia muito, é válido supor que $w_{i-1} \cong w_i \cong w_{i+1}$. Essa suposição é bastante realística porque à medida que as iterações vão sendo realizadas, o eixo da rodovia vai também sendo refinado e adensado. Isto é, as seções definidas por três pontos sucessivos vão encurtando com o progresso do processo iterativo, tornando desnecessário o uso de larguras distintas de rodovias nas referidas seções locais de rodovia. Os resultados experimentais a serem mostrados na próxima seção confirmam esta expectativa teórica. Assim, a função objetivo usada no processo de otimização tem a forma:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i^t(p_{i-1}, p_i, p_{i+1}, w_i) \quad (14)$$

Portanto, o número de incógnitas interrelacionadas simultaneamente na função objetivo modificada é sete, contra seis da versão original do método. Vale finalmente ressaltar que a diferença básica entre a solução preexistente e a modificada é a função objetivo utilizada. Isto é, basta substituir a equação 01 pela 14 e aplicar o mesmo processo de otimização por programação dinâmica.

4. RESULTADOS E ANÁLISE

A seguir serão apresentados os resultados obtidos tanto com a metodologia modificada de programação dinâmica quanto com a metodologia original de programação dinâmica (seção 2). Como o objetivo central do trabalho é a avaliação do potencial do método na extração do eixo da rodovia em imagens de média e alta resolução, são utilizadas nos experimentos três imagens, cada uma com um nível de resolução.

A imagem real 1 (figura 3), de 598x398 pixels, possui um bom contraste e rodovias bem definidas, com largura média de 5 pixels. Pode-se verificar na cena um entroncamento e, nas laterais das rodovias, podem ser vistos alguns arbustos e sombras que causam perturbações às bordas e oclusão parcial de seu leito. A imagem real 2 (figura 4), de 500x600 pixels, possui alta resolução e rodovias com largura média em torno de 15 pixels. Seu contraste é favorável e verificam-se como principais pontos desfavoráveis as obstruções parciais ao leito da rodovia e locais onde há a ausência em uma das bordas da rodovia. A imagem real 3 (figura 5), de 535x498 pixels, é de altíssima resolução, possuindo rodovias com largura média de aproximadamente 33 pixels. Em vista da alta resolução, pode-se verificar a presença de postes mas, no entanto, as bordas das rodovias são geralmente bem definidas. A análise dos resultados é realizada visual e numericamente. A análise visual consiste em realizar as interpretações dos resultados pela observação da imagem de entrada com os eixos de rodovia projetados. Já a análise numérica baseia-se nos parâmetros de desvio médio (DM) e RMS (erro médio quadrático). Estes parâmetros são calculados a partir das distâncias (ou discrepâncias) entre pontos homólogos dos eixos de rodovia extraídos computacional e manualmente. O desvio médio é a média aritmética entre as discrepâncias e o RMS é dado pela raiz quadrada da média aritmética da soma das discrepâncias quadradas. Portanto, a análise a ser apresentada a seguir permitirá a verificação do desempenho da metodologia modificada frente a metodologia original.

Antes de se efetuar as análises, cabe lembrar que na literatura (por exemplo, Baumgartner et al., 1999), considera-se como de alta resolução imagens com pixels menores que 0,7 m, o que equivale a rodovias com largura de, pelo menos, 7 pixels. Já as imagens de média resolução possuem pixels no intervalo [0,7 m, 2,0 m], equivalendo a rodovias na imagem com larguras na faixa de 3 a 6 pixels.

De acordo com o acima exposto, pode-se classificar a imagem real 1 como sendo de média resolução, possuindo rodovias com largura média de aproximadamente 5 pixels. As figuras 3(a) e 3(b) apresentam os resultados de extração do eixo da rodovia usando ambas as versões do algoritmo de programação dinâmica. A comparação dos resultados pode ser feita pela análise dos eixos de rodovia projetados sobre a imagem original.

Na figura 3(a), os pequenos círculos pretos indicam a disposição dos pontos semente no início da

extração e, pode-se verificar também, a identificação dos segmentos de rodovia.

Pode-se observar que ambos os resultados se mostraram satisfatórios. É digno de nota que, a rodovia que se estende verticalmente (segmento 1) possui oclusões parciais, ocasionadas por árvores posicionadas em sua lateral direita (do ponto de vista do observador). Tais oclusões parciais causam perturbações às bordas. No entanto, as características globais de ambas as metodologias proporcionaram estabilidade à extração, fazendo com que, mesmo a extração efetuada pela nova metodologia, seja pouco influenciada por este fato. A extração efetuada pelo método modificado apresenta um resultado mais próximo ao que se obteria pelo uso da visão natural.

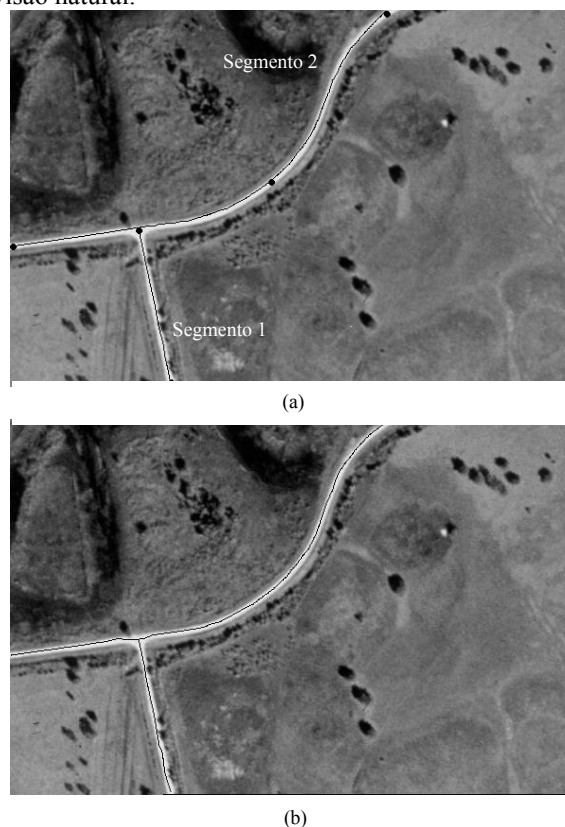


Fig 3 - Resultado obtido com a imagem real 1 na extração do eixo: (a) versão original de programação dinâmica; (b) versão modificada de programação dinâmica

Analisando a figura 3(b) verifica-se que, devido a ausência de bordas na região do entroncamento, ocorre uma pequena perturbação ao eixo extraído. Nesta imagem, onde a rodovia mais extensa (segmento 2) apresenta uma curvatura mais acentuada, verifica-se o bom desempenho da nova metodologia (figura 3(b)) em relação à original (figura 3(a)), cujo eixo tangencia a parte interna das curvas.

TABELA 1 - PARÂMETROS DE QUALIDADE PARA A EXTRAÇÃO EFETUADA POR PROGRAMAÇÃO DINÂMICA ORIGINAL E PELA VERSÃO MODIFICADA DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Rodovia	Método Original		Método Modificado	
	DM (pixel)	RMS (pixel)	DM (pixel)	RMS (pixel)
Segmento 1	0,8	0,9	0,5	0,7
Segmento 2	0,7	0,9	0,6	0,7
Toda Malha	0,7	0,9	0,6	0,7

A tabela 1 apresenta os valores de desvio médio e RMS para ambos os resultados de extração. Os valores de erro médio e RMS, obtidos pela metodologia original não se equiparam ao resultado obtido pelo uso da nova versão da metodologia, o que comprova seu bom desempenho.

Os resultados obtidos para a imagem real 2, para as duas metodologias, são apresentados nas figuras 4(a) e 4(b). Esta imagem possui características tais como: alta resolução, resultando em maior largura das rodovias; rodovias com baixo grau de curvatura; bifurcações; obstruções significativas ao leito da rodovia; perturbações às bordas causadas por estradas vicinais; um pequeno trecho de baixo contraste etc.. Os pequenos círculos pretos, na figura 4(a), mostram as posições dos pontos sementes necessários ao processo de extração. Pode-se ainda verificar nas figuras 4(a) e 4(b), a identificação dos eixos da malha viária, extraídos por ambas as metodologias.



(a)



(b)

Fig 4 - Resultado obtido com a imagem real 2 na extração do eixo: (a) versão original de programação dinâmica; (b) versão modificada de programação dinâmica

Observando primeiramente o resultado obtido pelo uso da versão original de programação dinâmica (figura 4(a)), pode-se ver que a malha foi dividida em três segmentos distintos, i. e., os pontos sementes foram coletados de forma que o algoritmo construísse três segmentos. Assim, ao se observar a figura 4(b), deve-se ressaltar, apesar da aparência, que a malha resultante não é conexa, pois, ambas as versões do algoritmo se destinam apenas à extração de segmentos isolados. Analisando-se o resultado de extração apresentado na figura 4(a), nota-se que o eixo extraído não corresponde ao eixo verdadeiro e, nos trechos curvos da rodovia, este tangencia a borda da rodovia. Dada a característica de resolução da imagem e as informações de borda sendo consideradas, verifica-se que a nova versão do método atuou muito melhor na transposição de elementos desfavoráveis como grandes árvores projetando-se sobre as rodovias e entroncamentos. Tal fato se deve principalmente à permanência, no novo algoritmo, de elementos que controlam a curvatura e colinearidade por meio de limiares. Assim, os pontos otimizados na região anterior e posterior da obstrução injuncionam, por meio destes limiares, a otimização dos pontos posicionados sobre as regiões críticas.

Efetuando-se agora a comparação entre os respectivos parâmetros numéricos, apresentados na tabela 2, pode-se confirmar o melhor desempenho da versão modificada de programação dinâmica.

TABELA 2 - PARÂMETROS DE QUALIDADE PARA A EXTRAÇÃO EFETUADA POR PROGRAMAÇÃO DINÂMICA ORIGINAL E PELA VERSÃO MODIFICADA DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Rodovia	Método Original		Método Modificado	
	DM (pixel)	RMS (pixel)	DM (pixel)	RMS (pixel)
Segmento 1	2,9	3,8	0,8	1,1
Segmento 2	3,7	4,4	0,6	0,7
Segmento 3	3,6	4,0	0,7	0,8
Toda Malha	3,3	4,1	0,7	0,9

O desvio médio para o resultado obtido pelo uso da versão modificada de programação dinâmica foi de aproximadamente 1/4 do desvio médio obtido pelo método original, indicando uma proximidade bem maior do eixo extraído ao eixo de referência, extraído manualmente. De forma análoga, o RMS calculado para o resultado obtido pela metodologia modificada foi mais de quatro vezes melhor que o obtido para a metodologia original.

As figuras 5(a) e 5(b) mostram os resultados obtidos utilizando-se ambos os métodos. Os eixos de rodovia extraídos estão projetados em preto sobre a imagem original para possibilitar a análise visual.

Os pontos sementes, fornecidos pelo operador, estão representados na figura 5(a) por meio de pequenos círculos pretos. Verifica-se nesta imagem a presença de postes que causam pequenas oclusões ao leito da rodovia, interferindo nas informações radiométricas necessárias a ambos os métodos. No entanto, a imagem apre-

senta bordas bem definidas, assim, a situação que se apresenta é condizente com o modelo de rodovia brevemente apresentado na seção 2. Devido à resolução da imagem, o cruzamento presente na cena poderia representar um obstáculo a ser transposto, principalmente pela nova versão do algoritmo de programação dinâmica, que utiliza informações de bordas. No entanto, supondo que o pixel de referência sendo avaliado esteja na região do cruzamento, ao ocorrer a tentativa de se avaliar pixels de borda relativos a este pixel, dada a aproximada homogeneidade da região analisada, haverão muitos vetores gradiente insignificantes e, por consequência, produtos escalar próximos de zero. A ocorrência de tal situação anularia a definição matemática do eixo da rodovia e o algoritmo procederá como na versão original. Assim, por ser esta uma metodologia de otimização global e haverem formas de se injuncionar a trajetória por meio dos limiares de curvatura e colinearidade, a expectativa teórica é que o algoritmo "não se perca", por considerar informações da região anterior e posterior do cruzamento. Mesmo frente às possíveis dificuldades apontadas, constata-se pelos resultados experimentais que ambos os métodos efetuam a extração mas, no entanto, o resultado que mais corresponde ao eixo verdadeiro é claramente obtido usando a metodologia modificada. Vale ainda comentar que, por não possuir a formulação para o eixo da rodovia, o algoritmo de programação dinâmica original, diante de uma rodovia com grande largura, é extremamente vulnerável à escolha dos pontos semente. Ou seja, como a área é vasta e aproximadamente homogênea, a função objetivo original pode encontrar várias trajetórias sobre o leito da rodovia onde ela será maximizada, dependendo da localização dos pontos semente escolhidos para a inicialização do processo. Tal fato não ocorre com a nova metodologia, pois independentemente dos pontos sementes fornecidos pelo operador, a linha poligonal gerada será praticamente a mesma.



(a)



(b)

Fig 5 - Resultado obtido com a imagem real 3 na extração do eixo: (a) versão original de programação dinâmica; (b) versão modificada de programação dinâmica

O método tem sua superioridade comprovada numericamente através da análise dos parâmetros de qualidade apresentados na tabela 3. Através dos valores de erro médio calculados para os resultados obtidos por ambos os métodos, verifica-se que o eixo extraído pela metodologia modificada está bem mais próximo do eixo de referência extraído manualmente. A acurácia, indicada pelos valores de RMS, é também bem melhor para o resultado obtido pelo uso da nova metodologia.

TABELA 3 - PARÂMETROS DE QUALIDADE PARA A EXTRAÇÃO EFETUADA RESPECTIVAMENTE POR PROGRAMAÇÃO DINÂMICA ORIGINAL E PELA VERSÃO MODIFICADA DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

Rodovia	Método Original		Método Modificado	
	DM (pixel)	RMS (pixel)	DM (pixel)	RMS (pixel)
Segmento 1	3,1	3,4	0,9	1,1
Segmento 2	5,5	6,5	0,6	0,7
Toda Malha	4,6	5,5	0,7	0,9

Assim como no experimento anterior, verificou-se, de forma visual e numérica, a ocorrência de um excelente desempenho do algoritmo de programação dinâmica modificada, bem como, constatou-se sua superioridade frente a metodologia original.

5. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou os resultados obtidos em pesquisa sobre a extração semi-automática de rodovias em imagens digitais de média e alta resolução. A metodologia apresentada baseou-se na modificação de uma metodologia preexistente para a extração de rodovias por programação dinâmica. Tal modificação foi realizada no modelo de rodovia pela inserção da definição do eixo de rodovia na função objetivo original. O assunto pesquisado pertence a um tema mais geral, de grande interesse da comunidade científica afim, envolvendo a extração de feições cartográficas para a alimentação ou a atualização de bases de dados de SIG. De modo geral, a extração de feições é um tema pouco pesquisado no país, em particular se o alvo da extração for rodovias.

Apesar do bom desempenho e a reduzida probabilidade de falhas de extração verificada para ambos os métodos, pode-se concluir que a adição da definição do eixo da rodovia utilizando-se, para tanto, as informações pertinentes às bordas, presentes na nova metodologia, mostrou-se bastante satisfatória, sendo que o algoritmo foi capaz de superar claramente o desempenho do método original, em imagens de média e alta resolução.

Conclui-se por fim que as alterações realizadas no modelo preexistente, bem como as modificações algorítmicas efetuadas, proporcionaram resultados de melhor qualidade, como pôde ser constatado por meio dos experimentos e análises apresentados.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGOURIS, P., GYFTAKIS, S., STEFANIDIS, A. Using a fuzzy supervisor for object extraction within an integrated geospatial environment. In SYMPOSIUM ON OBJECT RECOGNITION AND SCENE CLASSIFICATION FROM MULTISPECTRAL AND MULTISENSOR PIXELS, v. 32, 1998, Columbus, Ohio. **International Archives of the Photogrammetry and Remote Sensing**, Columbus - EUA, 1998. p. 191-195.
- BALLARD, D. H.; BROWN, C. M. **Computer Vision**. Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982.
- BAUMGARTNER, A., STEGER, C., MAYER, ECKSTEIN, W. BNER, H. Automatic road extraction based on multi-scale, grouping, and context. **Photogrammetric Engineering and Remote Sensing**, v. 65, n. 7, p. 777-785, jul. 1999.
- BELLMAN, C. J., SHORTIS, M. R. A machine learning approach to building recognition in aerial photographs. In: ISPRS COMMISSION III, SYMPOSIUM 2002, PCV02 (Part A), v. 34, 2002, Graz - Austria. **International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Information Sciences**, Graz - Austria, 2002. p. 50-54.
- CANNY, J. A Computational Approach to Edge Detection. **IEEE Transactions on Pattern Analysis** and Machine Intelligence, Washington, DC, USA, v. 8, n. 6, p. 679-698, 1986.
- DAL POZ, A. P. **Processo automático para reconhecer rodovias georreferenciadas de uma fotografia aérea digitalizada**. 2000. 225 p. Relatório FAPESP de Pós-Doutorado, Universidade do Maine, Maine - EUA.
- DAL POZ, A. P. Semi-automatic road extraction methods by dynamic programming optimization and a cooperative road follower. **The Photogrammetric Journal of Finland**, Finlândia, v. 17, n. 2, p. 13-22, 2001.
- DAL POZ, A. P. Semi-automatic road extraction based on edge and correlation analyses. In: ASPRS 2001 ANNUAL CONFERENCE, 2001, Saint Louis, MO. **ASPRS 2001 Annual Conference**. Washington, DC: ASPRS, 2001a.
- DAL POZ, A. P.; SILVA, M. A. O. Active testing and edge analysis for road centerline extraction. In: PHOTOGRAMMETRIC COMPUTER VISION ISPRS COMMISSION III, SYMPOSIUM 2002, Austria. **International Archives of the Photogrammetry**, Graz, Austria, 2002. p. 44-47.
- DAL POZ, A. P., SILVA, M. A. O. Delineamento de rodovia usando os princípios de teste ativo e de bordas anti-paralelas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOMÁTICA, 2002, Presidente Prudente. **Anais do Simpósio Brasileiro de Geomática - anais em CDROM**. Presidente Prudente, SP: Faculdade de Ciências e Tecnologia da UNESP, 2002a, p. 194-205.
- DOUCETTE, P., AGOURIS, P., STEFANIDIS, MUSAVI, M. Self-organized clustering for road extraction in classified imagery. **ISPRS Journal Photogrammetry and Remote Sensing**, Elsevier, v. 55, n. 5-6, p. 347-358, 2001.
- FISCHLER, M. A., TENENBAUM, J. M., WOLF, H. C. Detection of roads and linear structures in low-resolution aerial imagery using a multisource knowledge integration technique. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 15, p. 201-223, 1981.
- GEMAN, D., JEDYNAK, B. An active testing model for tracking roads in satellite images. **IEEE Transaction on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 18, n. 1, p. 1-14, jan. 1996.
- GRUEN, A.; LI, H. Road extraction from aerial and satellite images by dynamic programming. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 50, n. 4, p. 11-20, 1995.

- 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.
- KASS, M., WITKIN, A. TERZOPOULOS, D. Snakes: Active contour models. In: 1ST. INT. CONF. COMPUTER VISION, 1987, London, **Proceedings of the First International Conference on Computer Vision**, London, England, 1987. p. 259-268.
- 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**, v. 12, n. 1, p. 22-31, 2000.
- McKEOWN, D. M., DENLINGER, J. L. Cooperative methods for road tracking in aerial imagery. In: **Proceedings of IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition**, Ann Arbor, Michigan, pp. 662-672, jun. 1988.
- MENDES, T. S. G.; DAL POZ, A. P. Extração semi-automática de rodovias combinando um modelo de trajetória com uma estratégia de correlação. In: IV SIMPÓSIO BRASILEIRO DE GEOINFORMÁTICA, 2002, Caxambu. **GEOINFO 2002**. Belo Horizonte, MG: Sociedade Brasileira de Computação, 2002. p. 83-90.
- 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.
- MONTANARI, U. On the optimal detection of curves in noisy pictures. **Communications of the ACM**, v. 14, n. 5, p. 335-345, 1971.
- MORTENSEN, E. N., BARRETT, W. A. Intelligent Scissors for image composition. SIGGRAPH 95, 1995, Los Angeles - EUA. **22nd Annual ACM Conference on Computer Graphics and Interactive Techniques**, Los Angeles, CA, 1995. p. 191-198.
- NEVATIA, R.; BABU, K. R. Linear feature extraction and description. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 13, p. 257-269, 1980.
- VALE, G. M.. **Extração semi-automática do eixo de rodovia em imagens de média e alta resolução usando programação dinâmica**. 2003. 115 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) - FCT/Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente, 2003.
- VALE, G. M.; DAL POZ, A. P. Processo de detecção de bordas de Canny. **Boletim de Ciências Geodésicas**, Curitiba, v. 8, n. 2, p. 67-78, nov. 2002.
- VOSSSELMAN, G.; de KNECHT, J. Road tracing by profile matching and Kalman filtering. Automatic Extraction of Man-Made Objects from Aerial and Space Images. Gruen, A., O. Kuebler, and P. Agouris (eds.), **Birkhaeuser**, Basel - Boston - Berlin, p. 265-274. 1995.
- WANG, Y., TRINDER, J. Automatic road network extraction by hierarchical grouping. **Proc. ASPRS 2000 Annual Conference**, Washington, DC, 2000.
- YAMADA, H., MERRITT, C., KASVAND, T. Recognition of kidney glomerulus by dynamic programming matching method. **IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence**, v. 10, n. 5, p. 731-737, 1988.

7. AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à CAPES, pelo suporte, sob a forma de bolsa de Demanda Social CAPES, concedida ao mestrando Giovane Maia do Vale a partir de 1 de maio de 2001. Este trabalho é também resultado de um projeto financiado pela FAPESP, na categoria de Auxílio à Pesquisa (Processo no. 2001/01168-5), coordenado pelo segundo autor.

Recebido em 12 de abril de 2003 – Aceito para publicação em 23 de outubro de 2003.