

EXTRAÇÃO SEMI-AUTOMÁTICA DE RODOVIAS ATRAVÉS DE OTIMIZAÇÃO POR PROGRAMAÇÃO DINÂMICA NO ESPAÇO OBJETO: CASO MONO

Semi-automatic road extraction by dynamic programming optimization in the object space: single image case

Rodrigo Bezerra de Araújo Gallis¹
Aluir Porfírio Dal Poz²
Ricardo Luis Barbosa¹
João Fernando Custódio da Silva²

¹ **Universidade Estadual Paulista – Unesp**
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
Programa de Pós-Graduação em Ciências Cartográficas
{rodrigo, ricardo}@pos.prudente.unesp.br

² **Universidade Estadual Paulista – Unesp**
Faculdade de Ciências e Tecnologia - FCT
² Departamento de Cartografia
{aluir, jfcsilva}@prudente.unesp.br

RESUMO

Este artigo propõe uma nova metodologia para a extração de rodovias a partir de imagens digitais. A inovação nesta metodologia está relacionada com o uso do algoritmo de programação dinâmica (PD) para realizar um processo de otimização no espaço objeto, em vez de fazê-lo no espaço imagem, conforme as metodologias tradicionais baseadas em PD. O princípio básico da metodologia proposta é inspirado no funcionamento dos restituidores fotogramétricos. Em ambos os casos, as feições são traçadas no espaço objeto, implicando na necessidade de se estabelecer uma rigorosa relação matemática entre pontos dos espaços objeto e imagem. Entretanto, a metodologia proposta não necessita da participação do operador na compilação das feições no espaço objeto. O operador participa apenas na medição no espaço imagem de alguns pontos sementes descrevendo esparsa e grosseiramente as rodovias, os quais devem ser transformados para o espaço objeto para possibilitar a inicialização do processo de otimização por PD. Uma das grandes vantagens da metodologia proposta é sua flexibilidade, podendo operar em diferentes modos (mono ou estéreo) e com variados tipos de imagens, incluindo o processamento de imagens multisensor. Este artigo apresenta os fundamentos da nova metodologia de extração de rodovias no espaço objeto, bem como apresenta em detalhes a versão da metodologia baseada em uma única imagem, juntamente com os resultados experimentais.

Palavras chaves: Programação Dinâmica, imagens aéreas, malha viária, extração de feições.

ABSTRACT

This article proposes a novel road extraction methodology from digital aerial images. The innovation is based on the dynamic programming (DP) algorithm to carry out the optimization process in the object space, instead of doing it in the image space such as the DP traditional methodologies. The basic principle is inspired on the photogrammetric plotter functioning. In both cases, the features are traced in the object space, which implies that a rigorous mathematical model is necessary to establish a relationship between image and object space points. However, the proposed methodology does not require the operator to compile the features in the object space. It just requires that the operator measures a few seed points in the image space to describe sparsely and coarsely the roads, which must be transformed into the object space to make possible the initialization of the dynamic programming optimization process. Flexibility is one of the most important advantages of the proposed methodology, that can be operated in different modes (mono-plotting or stereo-plotting), and with several image types, including multisensor images. This paper presents the basics

of the novel methodology for road extraction in the object space, as well as the details of the semi-automatic road extraction process using a single image, along with the experimental results.

Keywords: Dynamic Programming, aerial images, roads, feature extraction.

1. INTRODUÇÃO

As imagens aéreas são uma fonte padrão para a extração de objetos topográficos como rodovias ou edificações para a atualização de bases cartográficas e Sistemas de Informações Geográficas (SIG's). Nestes sistemas, as rodovias são de grande importância para aplicações como em sistemas de guias para polícia, bombeiros e atendimentos emergenciais. A aquisição de dados planimétricos, como a malha viária, a partir de imagens aéreas ou de satélite, tem sido realizada por extração manual nas empresas e órgãos que produzem mapas e cartas no Brasil. Entretanto, as metodologias que visam à extração de feições a partir de imagens digitais, vêm migrando para abordagens semi-automáticas e automáticas.

Os processos automatizados de extração de feições são valiosos em separar feições antrópicas, tais como estradas e construções. As pesquisas na área de extração automática de rodovia iniciaram na época que as imagens de satélite tornaram-se disponíveis no formato digital, isto é, no início da década de 70. O trabalho pioneiro nesta área é encontrado em BAJCSY E TAVAKOLI (1976), quando foram usadas imagens de baixa resolução do sensor MSS/LANDSAT-1. Nestas imagens, as rodovias eram imageadas como feições lineares de 1 a 3 pixels de largura.

Os métodos de extração de rodovias diferem quanto ao tipo de imagem utilizada (em geral se é de baixa ou de alta resolução), primitivas empregadas (por exemplo, bordas, perfis transversais ao eixo da rodovia) e estruturas de controle (ZLOTNICK E CARNINE, 1993). O processo de extração de rodovias pode ser realizado de diversas formas. Vários processos de extração foram desenvolvidos, aplicados e avaliados para variadas resoluções espaciais. Um aspecto comum aos métodos desenvolvidos é a ausência de um modelo geral e unificado de malha viária. Conseqüentemente, é grande a diversidade de métodos encontrados na literatura. Outro critério muito utilizado para a classificação tanto dos modelos quanto das estratégias de reconhecimento e extração está relacionado com o grau de conhecimento sobre a malha viária neles incorporados, resultando em dois grandes grupos (DAL POZ, 2001). Num primeiro grupo encontram-se os modelos mais simples, normalmente ligados às propriedades geométricas e radiométricas das rodovias. Estes tipos de modelo propiciam bons resultados quando a estratégia de solução for semi-automática, caso em que o operador realiza as tarefas de reconhecimento e o algoritmo computacional as tarefas de medida. Modelos mais complexos envolvendo topologia e contexto, além da radiometria e geometria, fazem parte do segundo grupo e são mais apropriados

para suportar estratégias automáticas de reconhecimento e extração da malha viária. Os métodos automáticos caracterizam-se por não haver a interferência do operador, tornando-os difíceis de serem resolvidos e, conseqüentemente, implicando num desenvolvimento lento de metodologias.

As metodologias existentes para a extração de feições rodoviárias foram concebidas para analisar apenas os dados de imagem. Isto segue o conceito fundamental de mapeamento a partir de imagens, pelo qual se extrai as feições de interesse na imagem e depois se faz o georreferenciamento das mesmas. Este trabalho inova exatamente neste ponto, pois propõe uma metodologia que integra ambas as etapas convencionais de mapeamento. Isto é realizado através de um processo de otimização no espaço objeto, em vez do procedimento tradicional, realizado no espaço imagem. De certa forma a metodologia proposta neste trabalho resgata o princípio de funcionamento dos convencionais restituidores fotogramétricos.

Este trabalho apresenta os resultados obtidos com o modo mono da metodologia, tendo por base uma foto isolada e um Modelo Digital do Terreno (MDT) da região correspondente. A seção 2 apresenta o algoritmo de otimização de Programação Dinâmica (PD), que é a base da metodologia proposta neste artigo. A seção 3 apresenta um modelo matemático de rodovia válido para descrever rodovias no espaço imagem. É a partir deste modelo matemático que é desenvolvido o modelo matemático de rodovia no espaço objeto. A seção 4 apresenta tanto o novo conceito de extração de rodovias no espaço objeto quanto a solução desenvolvida para o caso mono. Os resultados obtidos são apresentados na seção 5 e as respectivas análises na seção 6. As principais conclusões são apresentadas na seção 7.

2. ALGORITMO DE PROGRAMAÇÃO DINÂMICA

2.1 Trabalhos prévios sobre extração de feições por PD

De acordo com DAL POZ E VALE (2004), o algoritmo de PD foi introduzido em processamento de imagens por KOVALEVSKII (1967), cujo problema tratado foi o reconhecimento de caracteres tipografados e manuscritos. Desde então, inúmeras pesquisas foram realizadas sobre extração de feições utilizando o algoritmo de PD, estendendo-se pelas mais diversas áreas de conhecimento. FISCHLER ET AL., (1981) foram um dos primeiros a propor uma metodologia baseada em PD para a extração de feições rodoviárias em imagens (LANDSAT) de baixa resolução, nas quais as rodovias se manifestam como linhas de 1 a 3 pixels

de largura. O problema consistia, primeiramente, em classificar cada pixel da imagem usando propriedades básicas (no caso, homogeneidade e contraste) de rodovia e, após, extrair os contornos usando o algoritmo de PD, sob restrições geométricas de suavidade e continuidade.

Uma outra metodologia versando sobre extração de rodovias em imagens SPOT de baixa resolução foi proposta em GRUEN E LI (1997), onde o algoritmo de PD foi utilizado para resolver um modelo de rodovia, formulado com base em propriedades radiométricas (por exemplo, contraste e homogeneidade) e geométricas (por exemplo, suavidade) de rodovia. Versões modificadas desta metodologia foram apresentadas em DAL POZ (2000) e DAL POZ E AGOURIS (2001). Nos processos de extração de feições existem dois tipos básicos de feições lineares que são alvo de extração (AGOURIS ET AL., 1998, BELLMAN E SHORTIS, 2002): 1) feições descrevendo os contornos dos objetos, como por exemplo, bordas e linhas; e 2) feições descrevendo eixos de simetria, como por exemplo o eixo de rodovia em imagens de alta resolução. As metodologias mencionadas ou brevemente descritas acima têm em comum o fato de terem sido desenvolvidas para extrair rodovias em imagens de baixa resolução. Em imagens de média e alta resolução as rodovias têm que ser modeladas como faixas estreitas e alongadas, ficando como alvo de extração o eixo central de cada rodovia. Tendo por base o trabalho anterior de DAL POZ E AGOURIS (2001), uma importante modificação foi

realizada por VALE E DAL POZ (2003) no modelo de rodovia para forçar a definição do eixo central de rodovia, possibilitando a obtenção de excelentes resultados com imagens de média e alta resolução.

2.2 Fundamentos Básicos

Quando em um problema, nem todas as variáveis envolvidas estão interrelacionadas simultaneamente, a solução pode ser eficientemente encontrada através de uma técnica de otimização conhecida como programação dinâmica (BALLARD e BROWN, 1982).

A figura 1 mostra o problema clássico da programação dinâmica (DAL POZ E VALE, 2004). A idéia básica é encontrar o caminho ótimo em um grafo, entre os nós A e N, cuja solução pode ser encontrada sequencialmente. No primeiro estágio, é necessário escolher um dos caminhos entre o nó A e os nós 10, 11 ou 12. Supondo que o nó 11 é a melhor escolha, a próxima decisão deve ser tomada entre os nós 20, 21 e 22. Esta estratégia vai sendo repetida até que o nó N seja alcançado. O caminho definido pelos nós A, 11, 22, 32, 41 e N é o caminho ótimo procurado, correspondendo à trajetória de custo mínimo (DAL POZ E VALE, 2004). A seguir, o problema é apresentado de maneira mais formal (DAL POZ E VALE, 2004).

Sejam $\{P_i\}$, $i=1, 2, \dots, n$, um conjunto de nós e $[C_{ij}]$ uma matriz custo, onde C_{ij} é o custo para ir do nó P_i para o nó P_j .

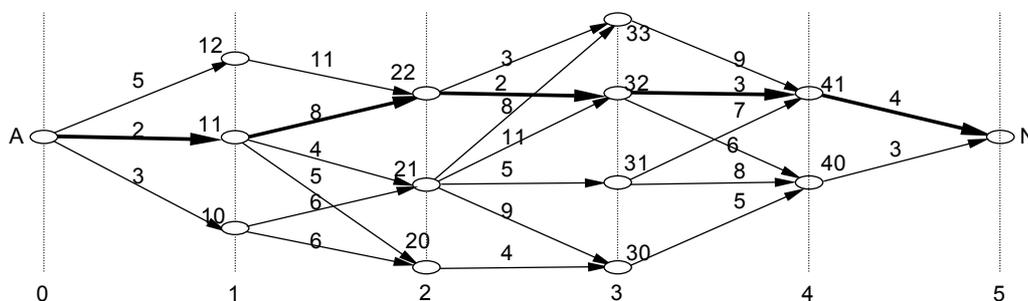


Fig. 1 - Problema Clássico de Programação Dinâmica (Adaptado de DAL POZ E VALE, 2004).

O caminho ótimo é tal que o custo para ir do nó inicial P_A para o nó final P_N seja mínimo. Sejam agora $g(i,j)$ a função (ou função custo) que descreve o custo para mover do nó P_i para o nó P_j e s os nós ao longo do caminho. Pode-se escrever,

$$g(i,j)=g(i,s)+g(s,j) \quad (1)$$

Para encontrar o caminho ótimo entre os nós P_i e P_j é necessário encontrar $g(i,j)$ e um conjunto s que satisfaça,

$$g(i,j)=\min_s [g(i,s) + g(s,j)] \quad (2)$$

Se nenhuma restrição for imposta, a expressão 2 estabelece um problema geral de busca em grafo. Entretanto, se o grafo for similar àquele apresentado na

figura 1, onde apenas alguns nós estão diretamente conectados, então a busca pelo caminho ótimo envolve um procedimento de otimização sequencial e, como tal, um algoritmo eficiente para resolver o problema é o da programação dinâmica.

Considerar o problema de encontrar o máximo M da função,

$$g= g(x_1, x_2, \dots, x_n) \quad (3)$$

Portanto, o objetivo é encontrar a ênupla $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ que maximiza a função 3. Se esta função for analiticamente desconhecida e se as variáveis independentes (x_1, \dots, x_n) assumirem valores discretos, a solução poderá ser encontrada através da combinação exhaustiva dessas variáveis. Contudo, se nem todas as

variáveis são simultaneamente interrelacionadas, então um algoritmo de programação dinâmica pode ser aplicado para resolver o problema.

Supor então, que,

$$g(x_1, x_2, \dots, x_n) = g_1(x_1, x_2, x_3) + g_2(x_2, x_3, x_4) \dots + g_{n-2}(x_{n-2}, x_{n-1}, x_n) \quad (4)$$

onde, a função g_1 depende apenas de x_1, x_2 e x_3 , a função g_2 apenas de x_2, x_3 , e x_4 , e assim por diante.

Assim posto o problema, o valor máximo da função 4 pode ser encontrado através de um processo de eliminação seqüencial das variáveis envolvidas.

O processo inicia então com a eliminação da variável x_1 . Como as funções g_2, \dots, g_{n-2} não dependem de x_1 , somente a função g_1 deve ser considerada nesse momento. A eliminação de x_1 é realizada através da seleção do valor de x_1 que maximiza g_1 , para cada realização do par (x_2, x_3) , isto é,

$$f_1(x_2, x_3) = \max_{x_1} [g_1(x_1, x_2, x_3)] \quad (5)$$

O processo continua com a eliminação da variável x_2 , sendo que o mesmo princípio é aplicado, como segue,

$$f_2(x_3, x_4) = \max_{x_2} [f_1(x_2, x_3) + g_1(x_2, x_3, x_4)] \quad (6)$$

A eliminação das demais variáveis segue o mesmo princípio da etapa anterior. Entretanto, é conveniente formalizar a eliminação das duas últimas variáveis (x_{n-1}, x_n) , como segue,

$$f_{n-1}(x_n) = \max_{x_{n-1}} [f_{n-2}(x_{n-1}, x_n)] \quad (7)$$

$$M = \max(g) = \max_{x_n} [f_{n-1}(x_n)] \quad (8)$$

Finalmente, pode-se generalizar o algoritmo descrito acima através das seguintes equações recursivas,

$$f_0(x_1, x_2) = 0 \quad (9)$$

$$f_k(x_{k+1}, x_{k+2}) = \max_{x_k} [f_{k-1}(x_k, x_{k+1}) + g_k(x_k, x_{k+1}, x_{k+2})] \quad (10)$$

$$f_{n-1}(x_n) = \max_{x_{n-1}} [f_{n-2}(x_{n-1}, x_n)] \quad (11)$$

$$M = \max(g) = \max_{x_n} [f_{n-1}(x_n)] \quad (12)$$

O princípio representado pelas equações 5, 6, 7 e 8 é usado para construir uma série de tabelas, possibilitando posteriormente a obtenção da ênupla $(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$ que maximiza a função 4 (DAL POZ E VALE, 2004).

3. MODELAGEM DE RODOVIA NO ESPAÇO IMAGEM

Técnicas de extração semi-automáticas utilizam conhecimentos de baixa ordem sobre a malha viária, normalmente relacionados com geometria e radiometria. As rodovias em geral possuem características próprias como sua geometria (largura,

curvatura etc.), sua radiometria (reflectância) e sua topologia. Estas três características constituem o modelo geométrico, radiométrico e topológico de rodovias (DAL POZ, 2000). A extração da malha viária realizada via PD é baseada na resolução do modelo matemático de rodovia. O problema consiste em encontrar o máximo da função objetivo através da técnica de otimização global pelo algoritmo de PD.

Levando-se em conta que o eixo da rodovia pode ser representado por uma linha poligonal $P = \{p_1, \dots, p_n\}$, onde $p_i = (\text{linha}(L), \text{coluna}(C))$ é o i -ésimo vértice, o seguinte modelo de rodovias pode ser usado para modelar a entidade rodovia em uma imagem (DAL POZ, 2000):

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} (E_{p_1} - \beta E_{p_2} + \gamma E_{p_3}) [1 + \cos(\alpha_i - \alpha_{i+1})] / \Delta_{si} = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(L_{i-1}, C_{i-1}), p_i(L_i, C_i), p_{i+1}(L_{i+1}, C_{i+1})) \quad (13)$$

$$e \quad C_{ID} = |\alpha_i - \alpha_{i+1}| < T, i = 1, \dots, n-1 \quad (14)$$

onde:

- E : corresponde a função objetivo podendo ser decomposta em funções E_i dependendo apenas de três pontos vizinhos (p_{i-1}, p_i, p_{i+1}) da linha poligonal que representa a rodovia;
- T é um limiar pré-definido;
- C_{ID} : devido à sua definição, também é chamado injunção de desigualdade e permite limitar o espaço de busca do problema pois a função E é apenas avaliada para pontos que satisfaçam $C_{ID} < T$;
- E_{p_1}, E_{p_2} e E_{p_3} : são funções representando propriedades fotométricas e radiométricas do objeto rodovia;
- $\alpha_i - \alpha_{i+1}$: ângulo de deflexão no vértice i ;
- Δ_{si} : distância entre os vértices $i-1$ e i ;
- β e γ são constantes positivas.

Vale ressaltar que a estrutura da equação 13 é compatível com a da equação 4, o que a torna atrativa para ser resolvida pelo algoritmo de PD. A diferença básica entre ambas equações é que a função de rodovia (eq. 13) possui 6 variáveis interrelacionadas simultaneamente, enquanto que a equação 4 possui apenas três variáveis interrelacionadas simultaneamente.

4. EXTRAÇÃO DE RODOVIAS NO ESPAÇO OBJETO

A metodologia para a extração semi-automática de rodovias proposta neste artigo representa um conceito novo, uma vez que integra, num único processo, todas as etapas convencionais do mapeamento. Além disso, a solução é rigorosa do ponto de vista matemático. Na seqüência, este conceito é apresentado de forma geral, onde se procura mostrar os principais elementos envolvidos e os principais pontos que o diferenciam do conceito convencional. Esta seção é finalizada com a apresentação e discussão da solução em modo mono.

4.1 Conceito de extração de rodovias no espaço objeto

Como mostra a figura 2, a metodologia proposta para a extração de rodovias no espaço objeto depende de uma etapa prévia de preparação, conhecida como inicialização. Qualquer método de concepção semi-automática depende da interferência de um operador para fornecer as informações mínimas para que o método inicie o processo de extração. Como o operador necessita de visualizar as rodovias, a fim de identificá-las e medir alguns pontos sementes ao longo das mesmas, uma opção comum é utilizar as próprias imagens de entrada. Estes pontos sementes devem ser transformados para o referencial do espaço objeto onde ocorrerá o processo de extração de feições rodoviárias. Felizmente, o algoritmo de programação dinâmica necessita apenas de posições 3D grosseiras para os pontos sementes, motivo pelo qual é necessário medir os pontos sementes em apenas uma imagem e transformá-los para o espaço objeto usando a equação de colinearidade inversa, tendo por base apenas uma aproximação topográfica dada por um plano médio. Uma forma ainda mais interessante surge quando um Modelo Digital do Terreno (MDT) estiver disponível. Nesse caso, conforme mostrado em ROS ET AL., (2002), uma ou mais imagens podem ser registradas

sobre o MDT a fim de possibilitar a visualização tridimensional das imagens, facilitando ao operador a identificação e a medição dos pontos sementes diretamente no espaço objeto. Uma outra forma de inicialização, ainda mais atrativa, já que possibilitaria a inicialização automática é quando a malha viária que se pretende extrair já está georreferenciada, mas com qualidade geométrica inferior a que se pretende gerar. Esse tipo de informação pode ser obtida em mapas preexistentes, em escala menor da que se pretende trabalhar. A inicialização a partir de mapas permitiria, além da inicialização automática da metodologia proposta, também o refinamento geométrico da malha georreferenciada, podendo então ser compatível com escalas maiores que a original. Todas as possibilidades descritas estão previstas na caixa de inicialização da metodologia (fig. 2). Como mostra a figura 2, a metodologia de extração de rodovias no espaço objeto necessita, além de pontos sementes descrevendo grosseiramente as rodovias e a própria imagem de entrada, também de outros tipos de dados. Os parâmetros de orientação interior e exterior são necessários para estabelecer via equação de colinearidade (ou outro modelo matemático), uma rigorosa relação matemática entre os espaços imagem e objeto. A fim de possibilitar a extração das rodovias diretamente na projeção de mapa, esta relação

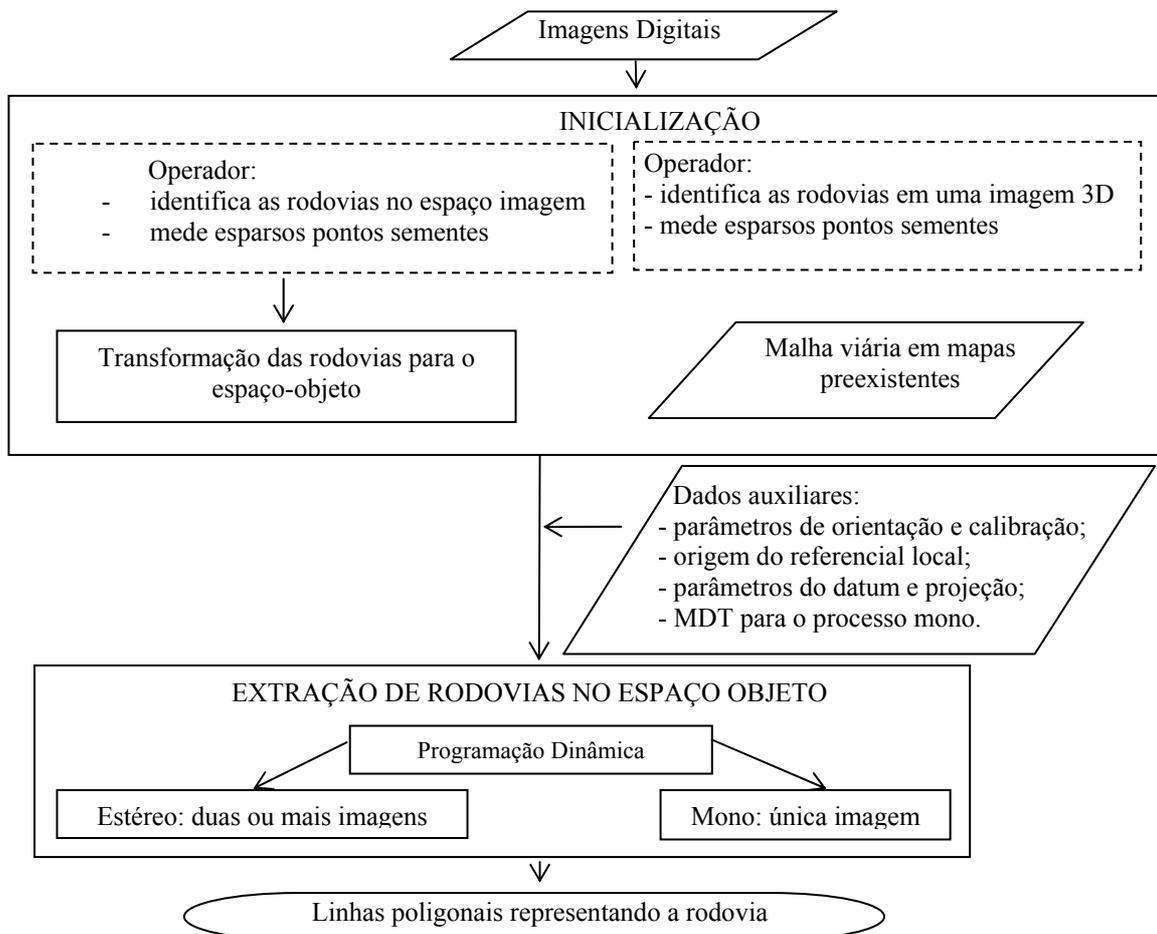


Fig. 2 - Fluxograma com a as fases de extração da metodologia proposta.

matemática entre os espaços objeto e imagem deve incluir transformações de coordenadas entre o referencial de projeção de mapa e o referencial cartesiano local, sendo este último geralmente empregado em processos fotogramétricos envolvendo equações de colinearidade. Portanto, são necessárias as coordenadas de origem do sistema local e os parâmetros do datum e da projeção. Caso o processo de extração baseie-se em apenas uma imagem, é necessário também um MDT da região.

A figura 2 mostra que a extração de rodovias no espaço objeto pode ser realizada em dois modos básicos, isto é, em mono e em estéreo. No modo mono apenas uma imagem é utilizada, aérea ou de satélite. Principalmente no caso de imagens aéreas, é necessário um MDT para uma solução rigorosa. No caso estéreo, o processo de otimização no espaço objeto pode-se basear em duas ou mais imagens aéreas ou de satélite, podendo inclusive fazer combinações entre imagens de diferentes sensores. Os resultados do processo de otimização por PD são linhas poligonais no referencial tridimensional do espaço objeto.

O novo conceito de extração de rodovias no espaço objeto assume dimensões que vão além das que estão relacionadas com o conceito convencional de extração de rodovias no espaço imagem. Alguns dos principais pontos de contraste são:

- a função objetivo deve agora incorporar a relação entre os espaços objeto e imagem, podendo envolver uma imagem ou mais, inclusive de sensores diferentes;
- o processo de otimização é agora realizado no espaço objeto;
- no caso estéreo, um processo de correlação de imagens ocorre simultaneamente com a otimização por PD no espaço objeto;
- a flexibilidade: a - diferentes modos de extração (mono e estéreo) podem ser implementados; b - diferentes tipos de imagens (aérea, satélite, radar) podem ser usados, inclusive simultaneamente; c - diferentes resoluções de imagens (baixa, média, alta) podem ser usadas ;
- maior robustez no caso estéreo: por exemplo, uma obstrução perspectiva causada por uma árvore pode estar presente em apenas uma imagem, assim a utilização de um par, em vez de apenas uma imagem, pode ser mais eficiente.

4.2 Extração de rodovias no espaço objeto usando uma imagem isolada

A função objetivo dada pela equação 13 depende de duas variáveis de estado por ponto e trata o problema de extração utilizando variáveis no domínio da imagem. Pode ser convertida em um somatório de sub-funções que dependem simultaneamente de 6 variáveis, justamente o que habilita o algoritmo de PD para resolver eficientemente o problema de otimização.

Na extração de rodovias em imagens digitais utilizando a função objetivo dada pela Equação 13 tem-

se um espaço de solução discreto que poderia ser representado por um grafo construído sobre a imagem, sobre a qual se deseja extrair a feição rodovia. Esse grafo é análogo ao problema clássico de PD (figura 1). As coordenadas resultantes que representam a feição rodovia extraída são bidimensionais, visto que se referem ao sistema de coordenadas do espaço imagem (L, C).

Como se propõe neste artigo uma metodologia para extração de rodovias, diretamente no espaço objeto e a partir de uma imagem isolada, é necessário o desenvolvimento de uma nova função objetivo, cuja solução seja uma linha poligonal representando o eixo da rodovia no espaço objeto. Um dos requisitos básicos dessa função é que a mesma possua uma estrutura adequada para ser resolvida seqüencialmente pelo algoritmo de PD.

Uma rodovia no espaço objeto possui características geométricas e de reflectância peculiares. Em relação às características geométricas, as mesmas suposições que geralmente são feitas para a aparência das rodovias no espaço imagem podem ser feitas para as rodovias no espaço objeto, quais sejam:

- Rodovias são geometricamente suaves;
- Rodovias não mudam abruptamente de direção;
- A largura das rodovias não varia muito.

As características de reflectância resultantes da interação da luz solar com o material da superfície de rolagem e das regiões adjacentes a rodovia permitem diferenciar o objeto rodovia dos demais objetos. Como geralmente o material de rolagem é composto de asfalto, geralmente a reflectância do objeto rodovia é bastante contrastada em relação aos alvos adjacentes, principalmente na faixa do infravermelho (ver figura 3). A reflectância dos objetos presentes na cena é registrada por sensores com uma câmara digital fotogramétrica. Quando a cena possui rodovias, estas geralmente se manifestam na imagem como faixas estreitas e alongadas com grande contraste em relação as adjacências. Esta é a característica fotométrica fundamental do objeto rodovia que, juntamente com as características geométricas mencionadas acima, permitem expressar matematicamente as rodovias no espaço imagem através da equação 13 e da inequação 14. Mais adiante será mostrado que a equação 13 pode ser modificada para permitir a extração de rodovias diretamente num referencial do espaço objeto. Por exemplo, a função objetivo pode ser preparada para modelar o eixo de rodovia em termos da terna de coordenadas híbridas (E, N, h), sendo as componentes planas (E, N) as coordenadas cartesianas da projeção UTM (Universal Transversa de Mercator) e a componente h a componente altimétrica.

Para a modificação da equação 13, basta observar inicialmente que cada ponto no espaço objeto ($P_{(E,N,h)}$) está matematicamente relacionado com seu homólogo no espaço imagem ($p_{(L,C)}$). Esta relação matemática deve ser estabelecida de forma rigorosa a fim de garantir um processo acurado de extração. Assim muitos parâmetros devem ser conhecidos, tais como os

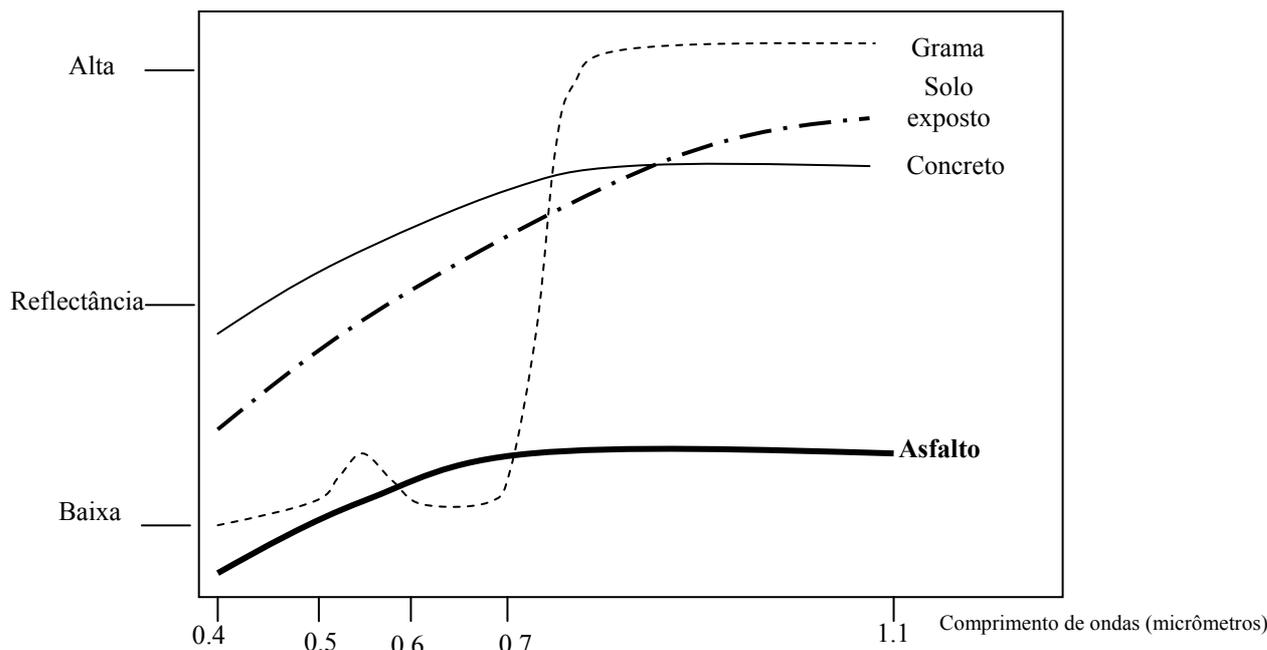


Fig. 3 – Curva de reflectância espectral para asfalto e outras coberturas terrestres.

parâmetros de orientação interior e exterior da imagem, parâmetros do datum e da projeção, entre outros. Tendo em vista o caso em que a imagem de entrada é proveniente de uma câmara digital e os eixos das rodovias são modelados no referencial híbrido (E, N, h), então as coordenadas no sistema digital da imagem de um ponto qualquer $p_i(L_i, C_i)$ dependem dos seguintes parâmetros (P_{ar}) e variáveis (V_i):

$$\square P_{ar} = (\lambda_{mc}, a, f_e, \phi_0, \lambda_0, \kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0, A, B, f, x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, \epsilon_{45})$$

Onde:

- λ_{mc} → longitude do meridiano central de um fuso da projeção UTM;
- a, f_e → semi-eixo maior e achatamento do elipsóide;
- ϕ_0, λ_0 → origem do sistema geodésico cartesiano local;
- $\kappa, \varphi, \omega, X_0, Y_0, Z_0$ → parâmetros de orientação exterior, obtidos previamente através de algum processo de orientação;
- f → distância focal;
- x_0, y_0 → coordenadas do ponto principal;
- K_1, K_2, K_3 → parâmetros da distorção radial simétrica;
- P_1, P_2 → parâmetros da distorção descentrada;
- ϵ_{45} → coeficiente de refração fotogramétrica;

$$\square V_i = (E_i, N_i, h_i)$$

Assim, sendo p_i um ponto qualquer do espaço imagem, então suas coordenadas L_i e C_i dependem dos parâmetros P_{ar} e das variáveis V_i , podendo expressá-las na forma:

$$\begin{aligned} L_i(P_{ar}, V_i) &= f(P_{ar}, V_i) \\ C_i(P_{ar}, V_i) &= g(P_{ar}, V_i) \end{aligned} \quad (15)$$

A forma analítica para as funções f e g é muito complexa para ser apresentada aqui, consistindo de passos de transformação de coordenadas (E, N, h) para as coordenadas (X, Y, Z) do referencial geodésico cartesiano local para o referencial fotogramétrico, via equação de colinearidade e deste último para o referencial digital da imagem, com introdução dos erros sistemáticos que afetam a imagem.

A introdução dos erros sistemáticos é feita com base nos parâmetros de orientação interior ($f, x_0, y_0, K_1, K_2, K_3, P_1, P_2, \epsilon_{45}$), sendo necessária porque a imagem de entrada está afetada pelos mesmos.

Como a terna de parâmetros (P_{ar}) é conhecida, pode-se expressar o ponto imagem p_i apenas em função da incógnita V_i , ficando:

$$\begin{aligned} p_i(L_i, C_i) &= p_i(L_i(V_i), C_i(V_i)) = \\ &= p_i(L_i(E_i, N_i, h_i), C_i(E_i, N_i, h_i)) \end{aligned} \quad (16)$$

Considerando a expressão 16 na equação 13, pode-se escrever:

$$\begin{aligned} E &= \sum_{i=1}^{n-1} E_i(p_{i-1}(L_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), C_i(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})), \\ &\quad , p_i(L_i(E_i, N_i, h_i), C_i(E_i, N_i, h_i))), \\ &\quad , p_{i+1}(L_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1}), C_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})) \end{aligned} \quad (17)$$

A equação 17 mostra claramente que a nova função objetivo depende simultaneamente das coordenadas de 3 pontos sucessivos da linha poligonal que descreve a rodovia no espaço objeto, isto é: $P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1})$, $P_i(E_i, N_i, h_i)$ e $P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})$. Dessa forma a equação 17 pode ser reescrita na forma:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} E_i(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}, h_{i-1}), P_i(E_i, N_i, h_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}, h_{i+1})) \quad (18)$$

A equação 18 mostra que a estrutura básica da equação 13 foi preservada. A diferença é que agora há 9 variáveis interrelacionadas simultaneamente em vez de 6 da equação 13.

A função objetivo dada pela equação 18 não possui solução única, pois pode-se ter infinitos pontos P_i , como também P_{i-1} e P_{i+1} , com o mesmo ponto imagem. A equação 18 tem solução única somente se uma das coordenadas dos pontos envolvidos na definição da linha poligonal for fixada, fato que é bem conhecido em Fotogrametria. Uma escolha natural seria pelas componentes altimétricas já que estas estariam facilmente disponíveis na prática, via MDT. A equação 18 torna-se consistente para aplicação se informações de altura forem conhecidas em função das posições planimétricas, isto é $h_i=f(E_i, N_i)$. Nestas condições, a equação 18 é reduzida à forma:

$$E = \sum_{i=1}^{n-1} [E_{pi}(P_{i-1}(E_{i-1}, N_{i-1}), P_i(E_i, N_i), P_{i+1}(E_{i+1}, N_{i+1}))] \quad (19)$$

A equação 19 relaciona simultaneamente apenas seis variáveis, contra nove da equação 18. Além dessa redução de variáveis ser atrativa computacionalmente, a equação resultante é a base para o problema de monorestituição semi-automática de rodovias. Entretanto, diferente das soluções convencionais para monorestituição (DAL POZ, 1996; MITISHITA ET AL., 2004), a metodologia proposta integra num único processo as etapas de extração de feições e projeção para o espaço objeto. Além disso, permite resolver o problema diretamente no referencial híbrido (E, N, h), com todo o rigor matemático. Possui também potencial de aplicação mais amplo, como no refinamento geométrico de malha viária preexistente e em escala menor.

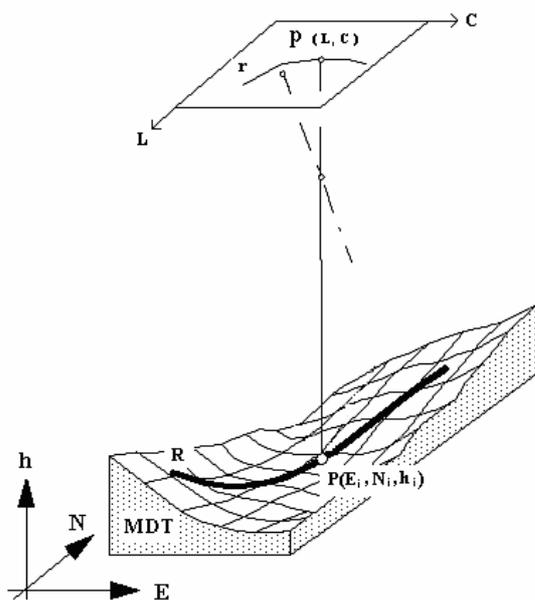


Fig. 4 – Monorestituição semi-automática de rodovias.

A figura 4 exemplifica o processo de extração da feição rodovia envolvendo uma única imagem. Nesse caso a coordenada altimétrica h sairá de uma interpolação no MDT disponível. Pode-se dizer que o processo consiste em rastrear a rodovia sobre o MDT tendo por base um rigoroso relacionamento matemático entre pontos do espaço objeto e imagem, além das informações fotométricas medidas nas imagens.

4.3 Inserção e eliminação de vértices da linha poligonal representando a rodovia

Antes do início do processo de otimização para a extração de uma determinada rodovia, esta é aproximada grosseiramente por uma linha poligonal, cujos vértices são os pontos sementes fornecidos por um operador. Estes pontos sementes são inicialmente fornecidos sobre a imagem e, após, transformados para o referencial do espaço objeto onde ocorrerá o processo de otimização. Como a quantidade de pontos sementes é geralmente bastante pequena, a simples aplicação do algoritmo de PD não produz uma boa descrição do eixo da rodovia. Assim, é necessário adensar iterativamente a linha poligonal inicial. O primeiro adensamento é realizado na linha poligonal projetada no plano $h=0$. Entre cada par de vértices preexistentes dessa linha poligonal são interpolados pontos médios, resultando numa linha poligonal adensada e plana. Em cada vértice, são determinadas janelas de busca que se estendem ortogonalmente à esquerda e à direita da linha poligonal plana. Cada janela de busca é constituída por pontos (E_i, N_i) amostrados a uma distância regular entre eles, sendo que para cada ponto (E_i, N_i) é interpolado uma altura h_i , o que equivale a ter $h_i=f(E_i, N_i)$, sendo f uma função de interpolação. Durante o processo de otimização por PD, cada vértice (E_i, N_i) da linha poligonal desliza ao longo das respectivas janelas de busca, parando quando o máximo da função objetivo (equação 19) for encontrado. Vale ressaltar que cada realização do vértice (E_i, N_i) está conectada com a superfície do MDT via altura h_i . Assim, o resultado das primeiras otimizações é uma linha poligonal sobre o MDT.

As otimizações seguintes seguem o mesmo princípio descrito acima. Em cada iteração, primeiramente se realiza um novo adensamento, conforme descrito acima, seguido de nova otimização por PD. Ao longo do processo iterativo de otimização, os vértices colineares aos vizinhos são eliminados, sendo que o processo converge quando novos vértices inseridos não contribuem mais com o refinamento da linha poligonal representando o eixo da rodovia. A função interpoladora $h_i=f(E_i, N_i)$ utilizada no processo de otimização é apresentada a seguir. Foi utilizada a função interpoladora *Thin Plate Spline* (TPS).

Um interpolante TPS pode ser ilustrado fisicamente como sendo uma chapa fina de metal, estendendo-se para o infinito, presa em alguns pontos de controle (no caso o próprio MDT), de tal forma que a energia necessária para isso seja mínima, desprezando-

se a energia elástica e gravitacional (BARBOSA ET AL.,2003). O TPS aparece na literatura com outros nomes (YU, 2001): spline de curvatura mínima, splines biarmônico e superfície spline.

A expressão para o TPS é dada por (YU, 2001):

$$h_i = a_0 + a_1 E_i + a_2 N_i + \sum_{j=1}^n F_j r_j^2 \ln r_j^2 \quad (20)$$

onde:

$$r_j^2 = (E_i - E_j)^2 + (N_i - N_j)^2 \text{ e } F_j, a_0, a_1 \text{ e } a_2 \quad (21)$$

são os n+ 3 coeficientes a serem determinados.

Apesar do esforço computacional para se determinar a função interpoladora, ela foi utilizada para evitar-se ter uma estrutura de dados mais avançada para representar o modelo digital e conseguir estabelecer em qual quadrilátero o ponto a ser interpolado pertence. Além disso, ela é calculada uma única vez para a imagem em questão, independente de qual rodovia será extraída.

5. RESULTADOS

A metodologia apresentada foi implementada utilizando o compilador Borland C++ Builder 5, no ambiente Windows XP. No experimento realizado utilizou-se uma imagem aérea de uma região da Suíça, parâmetros de orientação exterior e interior, todos disponibilizados no sistema fotogramétrico digital LPS – Leica Photogrammetry Suite®, juntamente com um MDT da região. As dimensões da imagem utilizada são de 9286 (altura) por 9496 (largura) em pixels, na escala 1:9200.

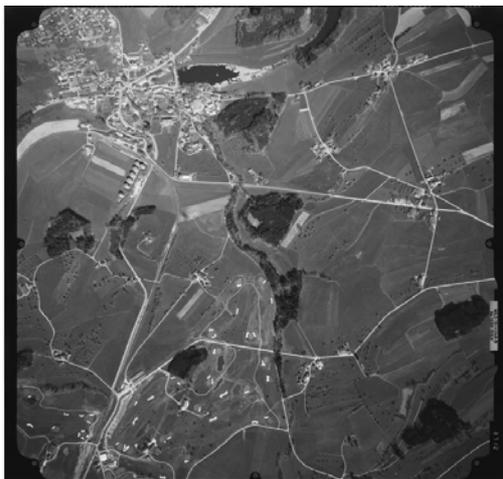


Fig. 5 – Imagem aérea utilizada nos experimentos.

A figura 5 mostra a imagem utilizada nos experimentos efetuados, e a figura 6 mostra as etapas anteriores à execução do programa, que são a abertura da imagem e leitura do MDT que será utilizado para interpolação das coordenadas altimétricas dos pontos obtidos pelo algoritmo de PD. A coleta dos pontos sementes, ainda no sistema de coordenadas da imagem,

pode ser realizada em qualquer programa que abra a imagem e permita a visualização das coordenadas dos pixels referentes à feição rodovia.

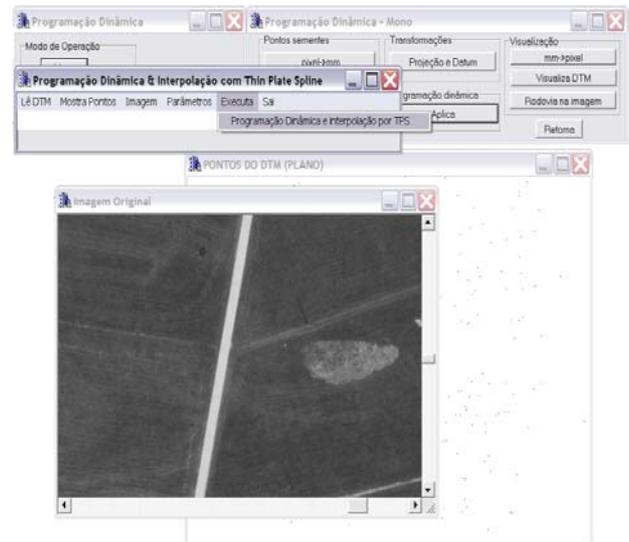


Fig. 6 – Programa desenvolvido para extração de rodovias no espaço objeto a partir de uma imagem.

Foi implementado um módulo que realiza a transformação dos vértices de rodovia extraídos pela programação dinâmica no sistema de referência híbrido do espaço objeto (E, N, h) para o referencial da imagem digital (Linha, Coluna). A partir dessa transformação é possível visualizar os eixos extraídos na imagem utilizada para testar o algoritmo, como mostrado nas figuras 7, 8 e 9. Devido à resolução das imagens, não foi possível colocá-las inteiramente, sendo que as figuras mostram janelas da imagem teste. Estas janelas mostram trechos de rodovias em área rural. Nota-se pequenas obstruções ocasionadas pelas sombras das árvores e um bom contraste em relação às adjacências.



Fig. 7 – Eixo extraído por programação dinâmica.



Fig. 8 – Eixo extraído por programação dinâmica.



Fig. 9 – Eixo extraído por programação dinâmica.

6. ANÁLISE DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos pela metodologia proposta são apresentados nas figuras 7, 8 e 9. Fica claro por estas figuras a vantagem de se realizar a análise no espaço imagem, embora todo o processo de extração seja realizado via otimização por PD. Este procedimento permite verificar facilmente a qualidade geométrica dos eixos extraídos possibilitando inclusive entender possíveis dificuldades frente a irregularidades presentes ao longo das rodovias. De uma forma geral, os resultados obtidos são bastante satisfatórios. Analisando especificamente os resultados mostrados na figura 7 verifica-se que as linhas poligonais extraídas estão acuradamente posicionadas ao longo dos eixos das rodovias. Os três cruzamentos de rodovia presentes ao longo da rodovia principal são passíveis de dificuldades para a extração desta rodovia. Entretanto, nenhuma influência significativa pode ser observada no eixo extraído. Dois fatores são determinantes para a obtenção deste resultado: 1 – o excelente contraste, que torna as injunções fotométricas bastantes efetivas no processo de otimização; e 2 – as injunções globais de suavidade geométricas impostas na função objetivo, fazendo com que os eixos extraídos em locais com alguma anomalia se comportem de forma suave como os demais trechos da rodovia principal. A robustez do método é também

demonstrada pelos resultados obtidos para as duas rodovias, notando que o baixo contraste e a presença de obstruções causadas pela vegetação não influenciam negativamente o método.

A figura 8 mostra a segunda janela selecionada na imagem original. Esta janela apresenta um conteúdo semelhante ao da janela analisada anteriormente, possuindo inclusive uma faixa de sobreposição. Assim, o desempenho observado é semelhante ao observado anteriormente. Vale, entretanto, ressaltar que esta janela mostra um trecho da rodovia secundária onde se pode observar que a existência de um contraste menor e obstrução da vegetação não influenciaram na qualidade geométrica do eixo extraído.

Os resultados obtidos com a terceira janela selecionada na imagem de entrada são apresentados na figura 9. A situação mostrada nesta figura é diferente das que foram analisadas nos dois experimentos anteriores. Embora o contraste seja satisfatório, situações mais favoráveis nesse sentido são encontradas nos dois experimentos prévios. A diferença mais marcante é com relação ao aspecto geométrico, já que neste caso a rodovia se apresenta bem mais ondulada. Apesar dos resultados serem bastante satisfatórios, dois efeitos da presença de curvaturas mais acentuadas podem ser observadas. Um primeiro efeito é a ligeira tendência do eixo extraído em tangenciar a borda interna das rodovias nas regiões de curvatura mais acentuada. Vale ressaltar que esse efeito é causado pelas injunções globais de curvatura que acabam por dominar ligeiramente as informações geométricas locais. O segundo efeito é causado pela obstrução parcial localizada na curva da esquerda, onde se pode observar a formação de uma pequena quina. Isto mostra que, apesar das injunções geométricas globais, o método pode ser sensível às obstruções e outras irregularidades presentes em regiões de maior curvatura.

7. CONCLUSÕES

Neste artigo, foi proposto um novo conceito metodológico para extração de rodovias, uma vez que a extração passa a ocorrer em um único passo, diretamente no espaço objeto e a partir de uma ou múltiplas imagens digitais, podendo inclusive ser multisensor. Com base neste conceito foi proposta uma nova metodologia para extração de rodovias no espaço objeto a partir de uma única imagem. Este método pode vir a ser utilizado na captura semi-automática de dados para atualização de SIGs. Nesta metodologia, é necessário que o operador realize a tarefa de reconhecimento da rodovia e identificação de alguns pontos sementes descrevendo grosseiramente a forma e a posição da rodovia. Apesar de ser necessária a intervenção do operador para inicializar o processo, a tarefa exaustiva de realizar medidas precisas da rodovia é deixada a cargo do algoritmo de PD.

Para testar a metodologia, um experimento foi realizado sendo os resultados apresentados em três janelas selecionados na imagem com as linhas

poligonais. A metodologia se mostrou promissora uma vez que foi capaz de extrair acuradamente os eixos de rodovias, tanto das principais quanto das secundárias.

Futuramente, será implementada a parte da metodologia que trata do caso estéreo. É também atrativa a extensão do método para tratar imagens de outros sensores.

AGRADECIMENTOS

Os autores deste trabalho agradecem à FAPESP – Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo, pelo financiamento concedido ao projeto de pesquisa, ao CNPQ pela Bolsa de Produtividade de Pesquisa (PQ) concedida ao Prof. Dr. Aluir Dal Poz, à CAPES pelo auxílio e apoio em forma de bolsa de doutorado e ao Prof. Dr. Messias Meneguette Júnior do Departamento de Matemática, Estatística e Computação da FCT –Unesp de Presidente Prudente.

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.

BAJCSY, R.; TAVAKOLI, M. Computer recognition of roads from satellite picture. **IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics** 6 (1976), 76 – 84.

BALLARD, D. H. & BROWN, C.M. **Computer Vision.** Englewood Cliffs, New Jersey: Prentice Hall, 1982. 523 p.

BARBOSA, R. L.; MENEGUETTE, M.; SILVA, J. F. C.; GALLIS, R. B. A. Geração de Modelo Digital do Terreno utilizando a Triangulação de Delaunay e Thin Plate Spline. **Anais do III Colóquio Brasileiro de Ciências Geodésicas (CD-Rom)**, Curitiba-PR, 2003.

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.

DAL POZ, A. **Modelos Matemáticos para Monorestituição.** In: II CONGRESSO BRASILEIRO DE CADASTRO TÉCNICO MULTIFINALITÁRIO, 1996, Florianópolis. II COBRAC. Florianópolis-SC: Universidade Federal de Santa Catarina, 1996. p. 289-294.

DAL POZ, A. P. Processo automático para reconhecer e extrair rodovias georreferenciadas em uma fotografia aérea digitalizada. **Relatório Científico** apresentado à FAPESP, relativo à realização de Pós-Doutorado no Dept. of Spatial Information Science and Engineering, University of Maine, USA - (Proc. 98/15553-30). Universidade Estadual Paulista. Presidente Prudente, 2000. 225 p.

DAL POZ, A. P. Semi-automatic road extraction methods by dynamic programming optimization and a cooperative road follower. **The Photogrammetric Journal of Finland**, v. 17, p. 13 – 22, 2001.

DAL POZ, A. P.; AGOURIS, P. **Um algoritmo de otimização global para a extração de rodovias de imagens digitais.** Revista Brasileira de Cartografia, Rio de Janeiro 53, p. 65-72, 2001.

DAL POZ, A. P.; VALE, G. Algoritmo de Programação Dinâmica: Fundamentos e Aplicações em extrações de feições. In: I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação, 2004, Recife. **Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação, 2004.**

FISCHLER, M. A.; TENENBAUM, J. M.; WOLF, H.C. Detection of Roads and Linear Structures in Low Resolution Aerial Images Using Multi-Source Knowledge Integration Techniques. **Computer Graphics and Image Processing**, 1981. 15(3): p. 201-223.

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.

KOVALEVSKII, V. A. **An optimal recognition algorithm for some sequences of patterns.** Cybernetics, 3(4), pp. 62-66, 1967.

MITISHITA, E. A.; MACHADO, Á. M. L.; HABIB, A. F.; GONÇALVES, G. A. Monorestituição tridimensional de aerofotos digitais de pequeno formato e dados de Laser Scanner. In: I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação, 2004, Recife. **Anais do I Simpósio de Ciências Geodésicas e Tecnologias da Informação, 2004.**

ROS, G. A.; DAL POZ, A. P.; HASEGAWA, J. K. Visualização 3D de uma imagem digital: metodologia e potencial cartográfico. **Revista Pesquisas em Geociências**, 29(2): 77-87. Instituto de Geociências, UFRGS, Porto Alegre, RS, 2002.

VALE, G., DAL POZ, A. P. Metodologia modificada de programação dinâmica para a extração acurada do eixo de rodovia em imagens digitais. **Revista Brasileira de**

Cartografia – RBC, Rio de Janeiro, n. 55/1, junho de 2003.

YU, Z. W. Surface interpolation from irregularly distributed points using surface splines, with Fortran program. **Computers & Geosciences**, n. 27, 877-882, 2001.

ZLOTNICK, A; CARNINE, P. D. Finding road seeds in aerial images. **Computer Vision, Graphics, and Image Processing**, V.57, N.2, p. 243 – 260, 1993.

Recebido em 20 de junho de 2005 – Aceito para publicação em 08 de setembro de 2005.