

DETECÇÃO AUTOMÁTICA DE ESTRADAS E TRILHAS DE PIVÔS USANDO IMAGENS DE ALTA RESOLUÇÃO ESPACIAL DO SENSOR PRISM/ALOS

*Automatic Detection of Roads and Pivot Tracks using High Spatial Resolution
Images from PRISM-ALOS Sensor*

Díbio Leandro Borges^{1,2}
Luiz Marcelo Ferreira Sirotheau Serique¹
Osmar Abílio de Carvalho Junior²

¹ **Universidade de Brasília - UnB**
Departamento de Ciência da Computação
Campus Darcy Ribeiro, ICC Norte. Bairro Asa Norte, Brasília – DF. CEP 70910-900
marcelo.serique@gmail.com
dibio@unb.br

² **Universidade de Brasília – UnB**
Instituto de Ciências Humanas, Departamento de Geografia
Laboratório de Sistemas de Informações Espaciais – LSIE
Campus Darcy Ribeiro, ICC Norte. Bairro Asa Norte, Brasília – DF. CEP 70910-900
osmarjr@unb.br

RESUMO

Este artigo apresenta um novo método para a detecção de estradas e trilhas de pivôs em imagens pancromáticas de alta resolução. A abordagem é dividida em três módulos principais: primeiro, uma filtragem espacial é aplicada a imagem para a extração de magnitudes e direções de descontinuidades, então uma quantização em 5 níveis é aplicada às magnitudes e um algoritmo de consistência hierárquica é desenvolvido para checar e unir cada janela a sua vizinhança, priorizando direções com os maiores e mais consistentes valores de magnitude; segundo, as hipóteses mais fortes são mantidas enquanto as mais fracas são retiradas da imagem, com o intuito de eliminar partes desconectadas; e finalmente, a transformada de Hough é aplicada nas hipóteses para completar as estradas detectadas e também identificar possíveis trilhas de pivôs entre elas. Este método foi aplicado em imagens do satélite ALOS em diferentes áreas do oeste do estado da Bahia, Brasil, e os resultados são fornecidos aqui.

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens, Detecção de Estradas, Detecção de Caminhos de Pivôs.

ABSTRACT

This article introduces a new method for road and pivot tracks detection for high resolution panchromatic satellite images. The approach is divided on three main modules: firstly, a spatial derivative mask is applied to the image for extraction of magnitudes and directions of discontinuities, then a five level quantization is applied on the magnitudes and a hierarchical consistency algorithm is developed by checking and linking each window to its neighborhood prioritizing directions with higher and consistent magnitude values; secondly, the road stronger hypotheses are left while the weaker ones are cleaned from the images, with the purpose to eliminate disconnected pieces; and finally, a Hough transformation is applied on the road hypotheses in order to complete the roads detected and to also identify possible pivot tracks among them. The method was applied to images of the ALOS satellite of different areas of the west of state of Bahia, Brazil, and results are provided here.

Keywords: Remote Sensing, Image Processing, Road Detection, Pivot tracks Detection.

1. INTRODUÇÃO

A atualização das feições cartográfica a partir de imagens de satélite consiste em uma importante fonte de informações para a formulação de banco de dados espaciais com o propósito de subsidiar a gestão territorial e ambiental. No entanto, a tradicional extração de rodovias por interpretação visual de imagens é de alto custo e consiste em um processo extremamente moroso. Desta forma, o desenvolvimento de métodos para a extração automática de estradas a partir do processamento digital de imagens objetiva reduzir a intervenção humana buscando maior rapidez, precisão e menor custo (Mohammadzadeh et al., 2008). Assim a automatização consiste não só em um desafio científico, mas também, um desafio de ordem prática que favorece o estabelecimento de um monitoramento constante e rápido da cobertura terrestre (Mena, 2003).

Apesar dos esforços para o desenvolvimento de técnicas para a extração automática, ainda observa-se a necessidade da intervenção manual do operador em diferentes etapas, como na extração, definição e validação dos objetos cartográficos (Mena & Malpica, 2005). Portanto, devido à dificuldade de estabelecer uma metodologia eficiente para a extração de rodovias, várias proposições metodológicas são sugeridas na literatura.

Dentre as proposições pode-se inicialmente realizar uma subdivisão dos métodos em semi-automáticos e automáticos. O método semi-automático requer da interação humana de forma a prover uma informação inicial para o modelo. Dois esquemas básicos de métodos semi-automáticos podem ser descritos, conforme os dados de entrada fornecidos pelo operador (Dal Poz, 2001; Dal Poz & Agouris, 2001): (a) posição e a direção da rodovia em um ponto inicial (Nevatia & Babu, 1980), (b) pontos sementes, que podem ser refinados por meio de algoritmos baseados tanto na otimização global por programação dinâmica como no princípio do contorno ativo ou “*snakes*” (Gruen & Li, 1997). Em contraposição, os métodos automáticos, usualmente, estabelecem algumas hipóteses para os segmentos de rodovias a partir da detecção de feições de margens ou linhas. As etapas subsequentes dos métodos automáticos buscam estabelecer conexões entre os segmentos com propósito de compor uma malha rodoviária (Li & Biggs, 2009).

Mohammadzadeh et al., (2006) propõe uma subdivisão das metodologias para a extração de rodovias em seis classes: (a) métodos de rastreamento de rodovias que considera pontos de sementes e utiliza os valores radiométricos dos *pixels* no processo de rastreamento (Bonneton et al., 2002; Hu et al. 2004 ; Kim et al., 2004); (b) métodos morfológicos que consideram as características geométricas e as operações de união, interseção, complementação, dilatação, erosão e afinamento (Matheron, 1975; Serra, 1982; Zhang et al., 1999; Amini et al., 2002a); (c) *Snakes* juntamente com programação dinâmica (Gruen

Li, 1997; Agouris et al., 2001; Daz-Poz & Agouris, 2001; Peteri et al., 2004) (d) Inteligência artificial considerando a lógica *fuzzy* (Agouris et al., 1998; Amini et al., 2002b), redes neurais (Doucette et al., 2001; Egmont-Petersena et al., 2002) e algoritmos genéticos (Settea & Boullartb, 2001); (e) métodos baseados em fusão de imagens de diferentes características, como o emprego conjunto de imagens do visível e radar (Chena et al., 2003; Jin & Davis, 2005; Fabre et al. 2001; Pajares & la Cruz, 2004). (f) Análise multi-escala e multirresolução baseado nas relações topológicas entre estradas e outros objetos cartográficos (Chen et al., 2004; Hinz & Baumgartner, 2003).

Uma subdivisão mais detalhada e completa dos métodos para extração de estradas é proposta por Mena (2003), que realiza uma classificação diferenciada conforme as seguintes categorias: (a) objetivo predefinido; (b) técnica de extração aplicada; e (c) tipo de sensor utilizado. Nesta proposição um mesmo método pode ser classificado em mais de uma categoria. A classificação baseada nos tipos de sensores utilizados, implicitamente, intercepta as outras duas classificações.

Os métodos referentes a um objetivo predefinido podem ser subdivididos em: (a) métodos gerais de extração de estradas, (b) métodos de reconstrução de rede de rodovias; (c) métodos gerais de segmentação, (d) métodos de vetorização; (e) métodos de otimização (redes neurais; algoritmos genéticos; e outros métodos de otimização); (f) métodos de avaliação e (g) outros objetivos.

Os métodos referentes à técnica de extração aplicada podem ser subdivididos em métodos de nível baixo, médio e alto. Os procedimentos de nível baixo a médio são subdivididos em: (a) métodos de rastreamento de rodovias; (b) filtragem e morfologia matemática; (c) programação dinâmica e *snakes*; (d) segmentação e classificação; (e) multi-escala e multirresolução; (f) análise estereoscópica; (g) multi-temporal; e (h) outras técnicas. Os procedimentos de alto nível são: (a) conhecimento da representação e modelagem *fuzzy*; e (b) outros métodos de raciocínio espacial.

Por fim, na subdivisão proposta por Mena (2003) os métodos que consideram o tipo de sensor podem ser: (a) monocromático; (b) banda do infravermelho; (c) imagens de cor (RGB); (d) imagens de sensores multiespectral ou hiperespectral; (e) imagem de radar imagem de laser (LIDAR); (f) outro tipo de sensor.

O presente trabalho possui como objetivo propor um novo método para detecção automática de estradas utilizando imagens pancromáticas de alta resolução espacial do sensor PRISM/ALOS em áreas rurais. Nestes ambientes aumenta a importância de estradas não pavimentadas, tema que se mostra pouco explorado nas demais pesquisas desenvolvidas e encontradas na literatura.

A área de estudo adotada para a realização da pesquisa foi a região do Oeste da Bahia, a qual

apresenta uma intensa atividade agropecuária. Esta região demonstra um acentuado desenvolvimento, devido à intensa propagação do agronegócio voltado para o mercado internacional de soja e de algodão. O avanço da agricultura é estimulado pela conjunção de terras propícias a mecanização e a presença de água tanto para plantio de sequeiro quanto por irrigação. Além da soja e algodão são produzidos na região o milho, café, frutas, feijão, arroz e gramíneas para a formação de pastagens. Devido à rápida expansão agrícola foram geradas inúmeras estradas tanto pavimentadas como não pavimentadas. Uma rápida atualização cartográfica da rede rodoviária torna-se fundamental para auxiliar no estabelecimento de uma logística para o escoamento da produção, como também para o desenvolvimento local.

2. MATERIAL E MÉTODOS

Basicamente, a identificação de uma estrada utilizando imagem considera dois atributos principais: (a) atributo espectral ou de intensidade; onde as estradas caracterizam-se por possuir *pixels* com comportamento espectral similar e normalmente distinto das demais áreas circunvizinhas, (b) atributo geométrico; onde as estradas apresentam uma forma distinta na região por serem longas e estreitas em relação a outros objetos (Li & Briggs, 2009). Portanto, os modelos propostos sempre buscam realçar estas duas premissas.

Quando se adota apenas uma imagem em níveis de cinza a extração dos segmentos de estrada por intermédio do atributo espectral torna-se restringida, devido a menor quantidade de informações existentes, o que se diferencia de outros procedimentos que utilizam dados multiespectrais, multirresoluções ou técnicas de fusão. Normalmente, na extração de estradas considerando uma simples imagem adota-se inicialmente o emprego de filtros espaciais de detecção de bordas que exploram os contrastes dos números digitais entre as estradas e os seus circunvizinhos.

Desta forma, a maioria dos métodos de extração de estrada em imagens monocromáticas de alta resolução apresenta dois procedimentos básicos: (a) utilização de algoritmos de detecção de bordas para salientar as margens das estradas, e (b) emprego de algoritmos para acompanhar as bordas realçadas com o propósito de obter o traçado. No entanto, vários fatores podem dificultar a obtenção deste propósito, como: (a) distorção das bordas devido à interferência de outros alvos presentes; e (b) o realce de outras feições que não são referentes ao objeto procurado. Assim, frequentemente, as bordas realçadas resultam em feições que apresentam falhas ou quebras, como também, fragmentos que não correspondem ao alvo pretendido.

Neste artigo é proposta uma metodologia integrada que busca selecionar e conectar grupos de *pixels* pré-realçados por meio de suas propriedades geométricas e análise de vizinhança. Neste contexto, todos os fragmentos são escalonados em graus de

prioridades pelas suas características geométricas e de continuidade espacial estabelecendo uma hierarquia a ser considerada na formulação do traçado. Desta forma, efetua-se uma exclusão dos *pixels* indesejados, ou seja, aqueles com baixa evidência de serem estradas e busca interconectar os que apresentam maior probabilidade.

A metodologia proposta possui as seguintes etapas: (a) aquisição de imagens de alta resolução espacial PRISM/ALOS, (b) extração e ordenação de descontinuidades, (c) seleção e consistência de hipóteses de estradas, e (d) hipóteses finais de estradas e marcas de pivôs centrais. A implementação do algoritmo foi realizada no programa MATLAB devido sua extensa biblioteca de processamento de imagens (*Image Processing Toolbox*) e sua facilidade de sintaxe (MATHWORKS, 2008).

2.1 Imagens do sensor PRISM/ALOS

As imagens de alta resolução espacial utilizadas são do sensor *Panchromatic Remote Sensing Instruments for Stereo Mapping* (PRISM) presente a bordo do satélite *Advanced Land Observing Satellite* (ALOS) da *Japan Aerospace Exploration Agency* (JAXA). Este satélite foi lançado em 2006, com o objetivo de contribuir para o estudo cartográfico, observação regional, monitoramento de desastres e pesquisa em recursos naturais. O ALOS possui uma órbita circular heliossíncrona, altitude de 692 km, e resolução temporal de 46 dias (ciclo). Além do sensor PRISM o satélite ALOS transporta os sensores: *Advanced Visible and Near Infrared Radiometer type 2* (AVNIR-2) e *Phased Array type L-band Synthetic Aperture Radar* (PALSAR) (Igarashi, 2001).

O sensor PRISM possui um conjunto de 3 sistemas de aquisição de imagem, denominado Triplet, que permite obter de forma simultânea imagens com visadas nadir, inclinada para frente e inclinada para trás, o que torna possível a aquisição de imagens estereoscópicas ao longo da trajetória e a construção do modelo digital de terreno. A largura da faixa de imageamento é de 35 km no modo de observação estéreo e de 70 km em observação nadir com resolução espacial de 2,5 m (Tadono et al., 2004).

Nesta pesquisa foram adquiridas imagens pré-processadas referentes ao produto 1B2 das imagens PRISM, que passaram por calibração radiométrica e geométrica, onde os *pixels* são alinhados com a grade da projeção UTM. O erro médio quadrático da precisão geométrica absoluta para a visão nadir é de 8m (cross track) e 9 m (along track), enquanto que a precisão relativa é de 4m (cross track) e 3m (along track) (JAXA, 2006).

2.2 Extração e ordenação de descontinuidades

Esta etapa pode ser subdividida nos seguintes passos: (a) detecção de bordas, (b) obtenção das imagens de magnitude de gradiente e direção de gradiente, com reagrupamento em classes, e (c)

definição dos *pixels* prioritários para a detecção de estradas a partir do estabelecimento de condicionantes espaciais. A **Figura 1** demonstra um fluxograma das etapas relativas à extração e ordenação das descontinuidades.

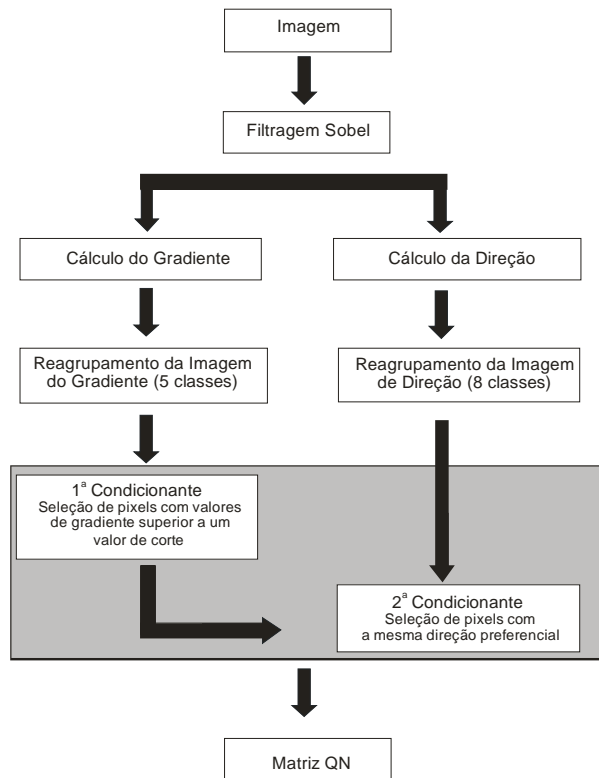


Figura 1. Fluxograma dos procedimentos metodológicos adotados na etapa de extração e ordenação de feições de estradas.

O emprego de detectores de borda consiste em uma etapa inicial muito usual, tanto na detecção de estrada, como de outros objetos pretendidos através do processamento digital de imagem. Vários algoritmos são utilizados para a detecção de borda como os operadores: Sobel, Kirsch, Marr-Hildreth, Canny, Shen-Castan, entre outros (Parker, 1996). Neste estudo foi adotado um prévio processamento com o operador Sobel de tamanho 3x3 nas componentes x e y da imagem.

Para a seleção dos *pixels* prioritários na detecção de estrada foi concebido um modelo prospectivo que utiliza como critérios os valores de magnitude de gradiente (G) e de direção de gradiente (T). Os cálculos consideram uma convolução da imagem $z(x,y)$ com a máscara Sobel 3x3, varrendo sucessivamente ponto a ponto da imagem. Como resultante desse cálculo, comum no pré-processamento de imagens, os valores são pontuais, mas refletem uma média ponderada na circunvizinhança de nove pontos (Gonzalez et al. 2004). O valor de G é calculado conforme a equação (1), a partir da derivada parcial de z com relação às direções x e y , sendo z a função da imagem $z(x,y)$ contendo os valores de intensidade dos *pixels*:

$$G = \sqrt{\left(\frac{\partial z}{\partial x}\right)^2 + \left(\frac{\partial z}{\partial y}\right)^2} \quad (1)$$

A direção do gradiente (T) é expressa na forma de ângulo pela seguinte equação (2):

$$T = \tan^{-1} \left(\frac{\partial z / \partial x}{\partial z / \partial y} \right) \quad (2)$$

O emprego destas duas formulações sobre a imagem previamente filtrada gera duas novas imagens relativas aos parâmetros G e T . De forma a simplificar as etapas subsequentes os valores de G foram subdivididos em cinco (5) classes, enquanto, que os valores de T em oito (8). Desta forma, os valores reais foram convertidos para inteiros por arredondamento.

Considerando as imagens G e T subdividida em classes foi realizada uma seleção dos *pixels* referentes às estradas pelo emprego de análise de vizinhança. Para tanto, o processamento foi realizado em subconjuntos da imagem principal considerando arranjos matriciais de 7 por 7 *pixels*.

Dentro destes subconjuntos são definidas duas condições para a seleção das estradas, que estabelecem dois processamentos encadeados: (a) determinação de *pixels* de maior intensidade do atributo G considerando um valor de corte, e (b) a partir destes *pixels* pré-selecionados realiza-se uma nova seleção considerando uma direção preferencial do atributo T .

A primeira condição assume como pressuposto que as maiores intensidades das classes de G refletem a maior probabilidade de presença de estrada. Um parâmetro importante é o valor de corte, ou seja, até qual ordem (são cinco os níveis de quantização propostos, ou ordens) de magnitude são identificados *pixels* prioritários para a detecção de estrada. Em geral são consideradas as janelas que contenham até a terceira maior magnitude, mas em alguns casos pode ser necessário alterar o valor de corte até a quarta maior magnitude, devido à eventual baixa discrepância dos *pixels* de estradas com os valores da vizinhança.

A segunda condição estabelece uma direção preferencial, para os *pixels* pré-selecionados na condição anterior, considerando a direção com maior frequência encontrada no subconjunto. Nesta premissa, somente os *pixels* com a mesma direção da predominante são mantidos, em caso de empate, ambos os valores são considerados como direção predominante.

Por fim, os *pixels* resultantes desta etapa estabelecem uma nova matriz denominada de QN. As **Figuras 2 e 3** exemplificam os dois processamentos evidenciando com tonalidade cinza os pontos que serão mantidos após o tratamento.

Portanto, o método proposto extrai dos subconjuntos da imagem os *pixels* com maiores valores de magnitude do gradiente e com uma mesma direção de gradiente. Este procedimento possibilita estabelecer um algoritmo hierárquico de seleção a partir de magnitudes e direções mais consistentes.

0	199	199	199	795	795	0
199	199	199	397	795	596	0
0	199	199	397	795	357	0
0	199	0	596	596	199	0
199	0	199	596	596	199	0
0	0	0	397	596	199	0
0	0	0	397	596	199	0

Figura 2. Exemplo de janela 7x7 mostrando valores de magnitude máximos calculados no processo de priorização.

5	6	7	0	0	0	0
5	5	2	0	0	0	0
5	3	2	0	0	0	0
3	3	0	0	0	0	0
2	3	0	0	0	0	0
3	2	0	0	0	0	5
5	5	1	0	0	0	6

Figura 3. Exemplo de janela 7x7 mostrando direções preferenciais calculadas no processo de priorização.

2.3. Seleção e consistência de hipóteses de estradas

O objetivo principal dessa etapa é tentar transformar os aglomerados de *pixels* em segmentos de reta, através da seleção e verificação de consistências. Para tanto, são analisadas as direções presentes em uma janela 3x3 da matriz QN em relação às oito janelas vizinhas de mesma dimensão (**Figura 4**). A arquitetura contendo a janela central mais as janelas vizinhas é denominada de macro-janela, onde são demarcadas as quatro direções preferenciais.

A consistência de hipóteses apresenta as seguintes etapas: (a) definir a direção preferencial da macro-janela, que consiste na direção com o maior somatório dos valores de QN, e (b) em caso de existir valores nulos na direção preferencial da janela central realiza-se uma atualização, substituindo o valor nulo pelo menor valor presente na direção.

A **Figura 5** exemplifica a determinação da direção preferencial e a substituição do *pixel* com valor nulo dentro da janela central. Os *pixels* em cinza são os pontos das janelas vizinhas que salientam a direção preferencial da janela central, ou seja, com maior somatório. Os *pixels* demarcados em verde e vermelho estão posicionados na direção preferencial dentro da janela central, onde apenas os minoritários serão atualizados por possuir valor nulo.

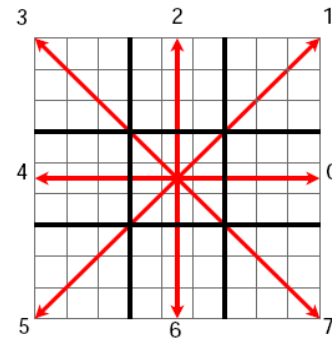


Figura 4. Macro-janela com direções preferenciais a serem selecionadas a partir de uma janela central 3x3.

(A)

0	0	0	0	0	0	0	0	0
397	397	0	0	199	0	0	0	0
397	397	0	397	397	397	199	199	0
0	0	0	199	397	397	397	397	199
0	0	0	0	199	199	199	397	397
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

(B)

0	199	199	397	397	199	0	0	0
0	0	199	397	397	199	0	0	0
0	0	199	199	397	397	199	199	0
0	0	0	199	397	397	397	199	199
0	0	0	0	199	199	397	397	0
0	0	0	0	0	199	199	397	0
0	0	0	0	0	0	199	199	397
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0

(C)

0	0	0	0	0	0	397	199	0
0	0	0	0	0	0	199	0	0
199	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	199	0	0	0	397
0	0	0	199	397	0	0	0	199
0	397	0	397	199	0	0	0	0
0	0	397	0	0	0	0	0	0
596	199	0	0	0	397	397	199	0
596	199	0	0	0	0	199	0	0

(D)

0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
0	0	0	0	0	0	0	0	0
397	397	0	0	199	0	0	0	0
397	397	0	397	397	397	199	199	199
0	0	0	199	397	397	397	397	199
0	0	0	0	199	199	199	397	397
0	0	0	0	0	0	0	199	199

Figura 5 – Macro-janelas e direções para consistência: (a) horizontal; (b) vertical, (c) diagonal “s” e (d) diagonal “p”.

Os exemplos presentes na **Figura 5** demonstram a detecção das quatro direções preferenciais na janela central e a substituição dos valores nulos (marcados em vermelho), onde: (a) **Figura 5a** possui direção horizontal e valor de substituição 199; (b) **Figura 5b** possui direção vertical e valor de substituição de 199; (c) **Figura 5c** possui direção diagonal *s* e valor de substituição de 397; (d) **Figura 5d** possui direção diagonal *p* e valor de substituição de 199.

Vale frisar que nesta etapa de consistência a vizinhança apenas reforça a eleição da direção preferencial da janela central, os valores da vizinhança não são alterados, estes somente serão alterados quando forem janelas centrais do processamento.

2.4. Prolongamento de hipóteses

Ao final do processamento de consistência, todas as janelas que permanecerem, apresentam uma única direção representada por um segmento de reta. No entanto, estes segmentos em alguns locais podem não estar conectados com os seus vizinhos. Desta forma, na tentativa de conectar estes segmentos, realiza-se um processamento para o prolongamento das extremidades em determinadas direções até *n* pixels (**Figura 6**).

As **Figuras 6a, b, c e d** mostram demarcados na origem das setas o ponto inicial de pesquisa para efetuar o prolongamento nas diversas direções. Um segmento será prolongado somente se até uma distância de *n pixels* for encontrado algum outro ponto com o valor diferente de 0, ou seja, se o prolongamento interceptar um segmento de outra janela. A **Figura 7** mostra o efeito do prolongamento de *pixels* para uma imagem.

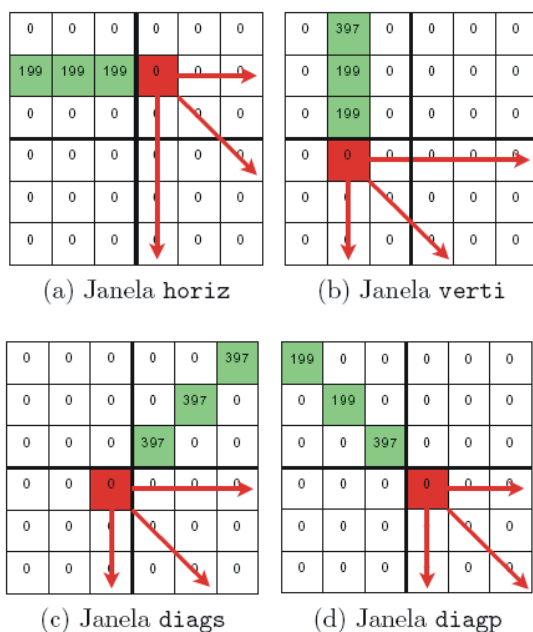


Figura 6 - Direções de prolongamento de segmentos em janelas.



(a) antes do prolongamento (b) após o prolongamento

Figura 7 – Efeito do prolongamento de pixels em uma imagem.

2.5. Hipóteses finais de estradas e marcas de pivôs

Nesta etapa busca-se encontrar retas relativas a estradas ou círculos (pivô central), considerando a transformada paramétrica de Hough. A transformação de Hough é um método computacional para a detecção de formas (retas, círculos e elipses) em imagens digitais binárias (Hough, 1962; Duda & Hart, 1971, Gonzalez et al., 2004).

Portanto, para o emprego da transformada de Hough o primeiro procedimento foi a conversão da imagem resultante dos processamentos anteriores para uma imagem binária, onde os *pixels* com valores não nulos passam a ter valor unitário e os *pixels* nulos permaneceram na mesma condição. Na detecção de uma reta o método considera a equação:

$$Y_i = aX_i + b \quad (3)$$

Onde, “*a*” é o coeficiente angular e “*b*” é o coeficiente linear. Este par de coeficientes quando representado em um espaço próprio (plano *ab*), onde na coordenada está o valor de “*a*” e na abscissa o valor de “*b*”, a reta pode ser representada como um único ponto (*a, b*).

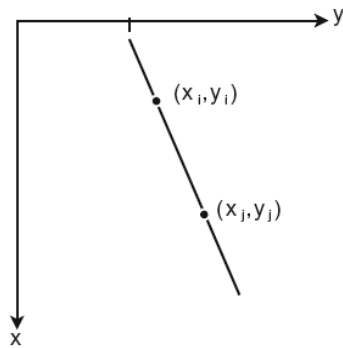
Para diferentes valores de “*a*” e “*b*” existirão diferentes retas que passam pelo ponto (*X_i; Y_i*) que satisfazem a equação 3. Considerando-se agora a equação 4 e o plano *ab* (denominado espaço de parâmetros), tem-se uma única reta passando pelo ponto (*X_i; Y_i*) e no novo ponto (*X_j; Y_j*), também ter-se-á uma única linha no espaço de parâmetros.

$$b = -aX_i + Y_i \quad (4)$$

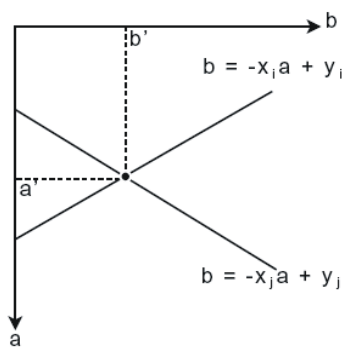
As retas associadas aos pontos (*X_i; Y_i*) e (*X_j; Y_j*) no espaço de parâmetros irão se interceptar em *ab* no ponto (*a₀; b₀*), sendo *a₀* a inclinação e *b₀* o ponto de intersecção com o eixo *y* da linha que contém (*X_i; Y_i*) e (*X_j; Y_j*) no plano *XY* (Gonzalez et al. 2004).

Resumindo, pode-se dizer que os pontos pertencentes à mesma reta no plano *XY*, se interceptarão no mesmo ponto (*a₀; b₀*) no espaço de parâmetros. Para (Gonzalez et al., 2004), a vantagem da técnica de Hough, computacionalmente falando, é a divisão do plano *ab*, o espaço de parâmetros, em células

acumuladoras. Essas células, que estão inicialmente zeradas, são divididas através da quantização dos valores de a entre " A_{min} " e " A_{max} " e os valores de b entre " B_{min} " e " B_{max} ". Em cada ponto $(X_k; Y_k)$ pertencente à imagem, varrem-se os valores de a entre " A_{min} " e " A_{max} " e encontra-se o valor de b por meio da equação $B = -AX_k + Y_k$. Se certo valor, por exemplo, ap , resultar na solução bq , a célula $A(p; q)$ é incrementada em um (1). Após todos os pontos da imagem serem percorridos, sendo V o valor final de uma célula $A(i; j)$, V será a quantidade de pontos colineares na reta $Y = A_iX + B_j$. A **Figura 8** representa o plano xy e o plano ab ou espaço de parâmetros.



(a) Plano xy



(b) Plano ab

Figura 8. Planos xy e ab utilizados na transformada de Hough.

O algoritmo para a detecção de círculos utiliza o procedimento descrito por Duda & Hart (1972) que estabelece um vetor de três dimensões contendo a localização e o tamanho de um círculo de centro " $a = (a1; a2)$ " e raio " r ". Considerando $p(x)$ a imagem binária de entrada e $x = (x1; x2)$ a coordenada de um *pixel* em $p(x)$, para cada x existe um conjunto Cx de círculos que o interceptam. C é calculado segundo a equação 5:

$$(x - a)^2 + (y - b)^2 = C^2 \quad (5)$$

A resultante do cálculo dos pares relativos aos centros-raios é denotada por $\{(a, r) | x \in X_p\}$ e para cada

membro da resultante, um acumulador em $(a(x); r(x))$ é incrementado em uma unidade. Depois que todos os pontos em $p(x)$ forem processados, o acumulador em $(a(x); r(x))$ conterá o número de elementos que estão sobre o círculo de raio $r(x)$ com centro $a(x)$.

No emprego da transformada de Hough foi utilizada a "toolbox" de processamento de imagens do MATLAB. Os parâmetros necessários para o emprego deste módulo são (**Tabela 1**):

- Detecção de linhas:
 - FillGap: Especifica a distância mínima entre duas linhas encontradas. Se a distância for menor que o valor especificado as duas linhas são unidas.
 - MinLength: Parâmetro que define o tamanho mínimo de linhas para que elas permaneçam. Se o tamanho de duas linhas unidas for menor que o valor definido, elas são descartadas.
 - NumPeaks: Define a número mínimo de picos a serem considerados para a definição de uma linha.
 - Threshold: O valor mínimo de um pico para ele ser utilizado na identificação de linhas.
 - ThetaResolution: Especifica o espaçamento (em graus) das células acumuladoras no componente Θ .
 - RhoResolution: Especifica o espaçamento das células acumuladoras no componente ρ .
- Detecção de círculos:
 - Raio: Define o raio de pesquisa. Somente permanecem círculos que possuem o raio definido por este valor.

Tabela 1 - Parâmetros utilizados para o cálculo da Transformada de Hough.

Parâmetros Transformada de Hough				
Método	Parâmetro	Padrão	Usuário	Valor
Linhas	FillGap		✓	-
	MinLength		✓	-
	NumPeaks		✓	-
	ThetaResolution	✓		2
	RhoResolution	✓		1
	Threshold	✓		$0.3 \times \max(Hough)$
Círculos	Raio		✓	-

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1. Programa desenvolvido para a extração de estradas

O aplicativo do método proposto para a detecção de estradas foi desenvolvido na plataforma do *Matlab*. A interface com o usuário é realizada por uma janela principal onde as operações para a detecção de estradas estão contidas no comando "estradas" dentro da barra de ferramentas (**Figura 9**). Este comando apresenta-se subdividido nos seguintes itens,

condizentes às etapas metodológicas:

- Extração de ordenação de descontinuidades
- Resultados Extração
 - Visualizar Magnitudes
 - Visualizar Magnitudes Quantizadas
 - Visualizar Priorização de Pixels
- Seleção e consistência de hipóteses de estradas
- Resultados Seleção
 - Visualizar Consistências
 - Visualizar Prolongamentos
- Hipóteses finais de estradas e marcas de pivôs
 - Detectar Linhas
 - Detectar Círculos

O dado de entrada é uma imagem em níveis de cinza definido pelo usuário, no presente caso as imagens do sensor PRISM/ALOS.

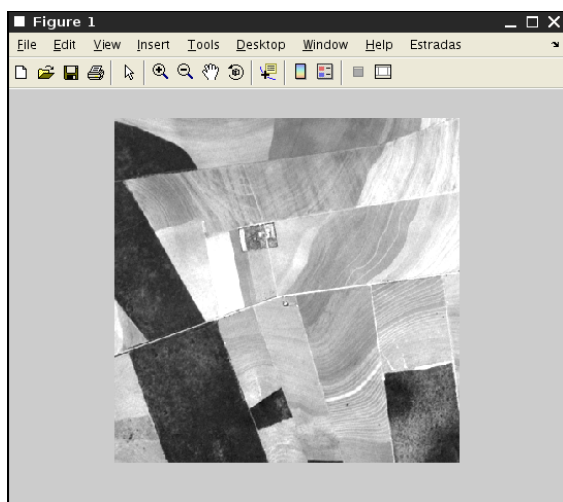


Figura 9. Janela principal do programa desenvolvido em MATLAB.

3.2. Aplicação em imagens PRISM/ALOS na região do Oeste da Bahia.

No presente trabalho foram selecionadas imagens para realizar testes considerando diferentes padrões existentes na região do Oeste da Bahia, com a intenção de avaliar a capacidade do algoritmo proposto em detectar estradas e pivôs centrais em distintas situações. Com o propósito de salientar as principais feições presentes é mostrada uma imagem com presença de estradas, e uma com área irrigada por pivô central.

Com relação aos parâmetros de entrada foram feitos testes com valores distintos para a profundidade de extração e os parâmetros da transformada de Hough. O parâmetro de prolongamento no processamento de seleção não foi alterado por não mostrar diferenças

significativas nos resultados finais.

A **Figura 10** mostra o resultado do processo de extração em diferentes profundidades. Observa-se que no presente caso o processamento até a quarta magnitude se mostrou mais promissor, evidenciando tanto o pivô central como as estradas (**Figura 10b**).

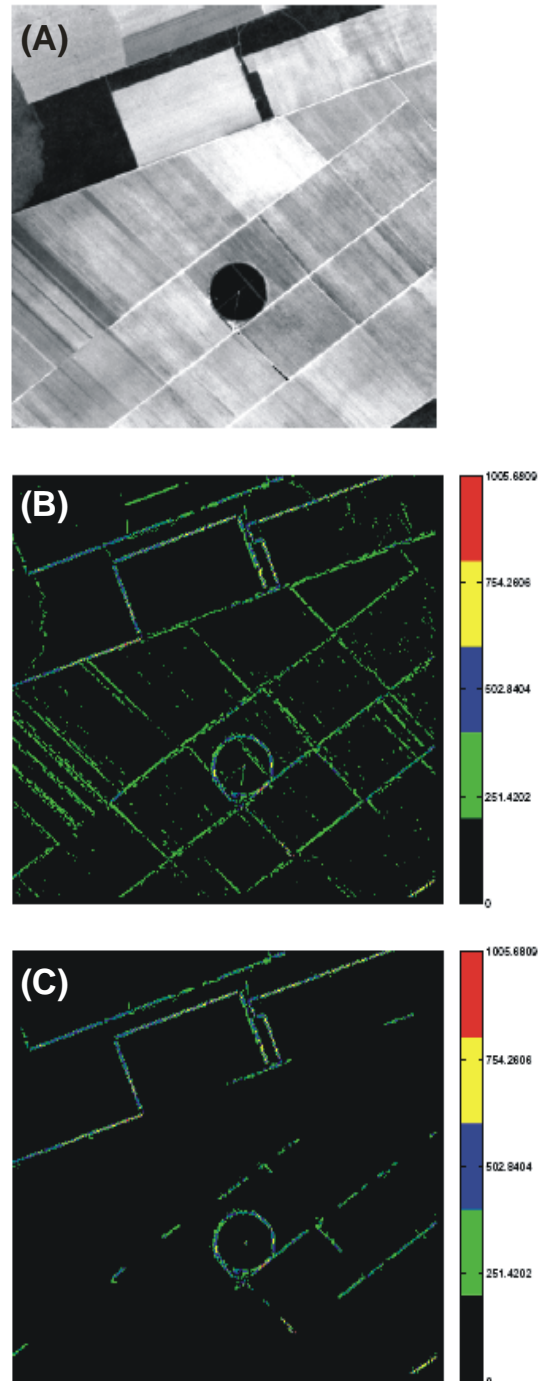


Figura 10. Resultado do processo de extração e ordenação de descontinuidades: (a) imagem da área teste, (b) feições extraídas considerando até a quarta ordem, (c) feições extraídas considerando até a terceira ordem.

No emprego da transformação de Hough foram testados diferentes valores para os parâmetros *FillGap* e *MinLength*, e o melhor resultado para ambos os

parâmetros é o valor de 30 (**Figura 11**). Para a busca de feições circulares relativos as áreas irrigadas com pivô central considerou um raio com dimensão de 27.

4. CONCLUSÕES

Este trabalho propôs um novo método para detecção automática de estradas e marcas de pivôs em imagens pancromáticas de satélite de alta resolução. O método consiste de módulos de extração e ordenação de descontinuidades, seleção de hipóteses e verificação de consistência, e formulação de hipóteses finais por parametrização.

O método necessita de poucos parâmetros como valores de entrada. Testes foram feitos em condições diferenciadas de imagens e quando comparados com a classificação manual apresentou resultados com alta porcentagem de acertos, facilitando enormemente a análise posterior das imagens.

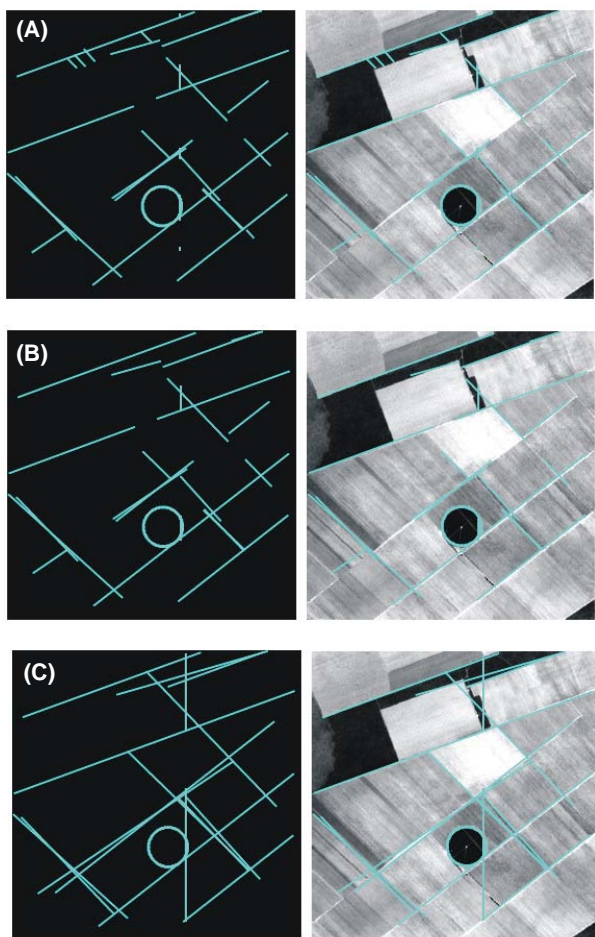


Figura 11. Resultado da transformação de Hough considerando os seguintes valores para os parâmetros FillGap e MinLength: (a) 30 e 3; (b) 30 e 30; e (c) 80 e 30.

AGRADECIMENTOS

O presente artigo está dentro das atividades previstas dos seguintes projetos: (a) “Desenvolvimento

de metodologias de processamento digital de imagens de satélite multisensores para o monitoramento do uso da terra e análise ambiental dos fragmentos florestais da bacia do Rio São Francisco” referente ao edital 35/2006 do CT-Hidro financiado pelo CNPq; e (b) “Evolução e análise ambiental na região do Cerrado da Bacia do Rio São Francisco” financiado pela FAP-DF relativo ao processo 193.000.49/2008. Além disso, os autores agradecem ao CNPq pela bolsa de produtividade fornecida ao pesquisador Osmar Abílio de Carvalho Júnior e aos três revisores anônimos da Revista Brasileira de Cartografia pelas sugestões e melhorias propostas ao artigo.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOURIS, P.; GYFTAKIS, S. & STEFANIDIS, A. Using a fuzzy supervisor for object extraction within an integrated geospatial environment. **International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 32, n. 3/1, p. 191-195, 1998.

AGOURIS, P.; STEFANIDIS, A. & GYFTAKIS, S. Differential Snakes for Change Detection in Road Segments. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 67, n. 12, p. 1391-1399, 2001.

AMINI, J.; LUCAS, C.; SARADJIAN, M.R.; AZIZI, A. & SADEGHIAN, S. Fuzzy logic system for road identification using Ikonos images. **Photogrammetric Record**, v. 17, n. 99, p. 493-503, 2002b.

AMINI, J.; SARADJIAN, M.R.; BLAIS, J.A.R.; LUCAS, C. & AZIZI, A. Automatic road side extraction from large scale image maps. **International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation**, v. 4, n. 2, p. 95-107, 2002a.

AMINI, J.; SARADJIAN, M.R.; BLAIS, J.A.R.; LUCAS, C. & AZIZI, A. 2002a. Automatic road side extraction from large scale image maps. **International Journal of Applied Earth Observation Geoinformation**, v. 4, n.2, p. 95-107.

BONNEFON, R.; DHERETE, P. & DESACHY, J. Geographic information system updating using remote sensing images. **Pattern Recognition Letter**, 23 (9): 1073-1083, 2002.

CHEN, T.; WANG, J. & ZHANG, K. A Wavelet Transform Based Method for Road Centerline Extraction. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 70 n. 12, p. 1423-1432, 2004.

CHENA, C.M.; HEPNERB, G.F. & FORSTER, R.R. Fusion of hyperspectral and radar data using the HIS transformation to enhance urban surface features. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, 58(1-2): 19-30, 2003.

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

- DAL-POZ, A.P. Extração semi-automática de rodovias através de uma metodologia cooperativa. **Boletim de Ciências Geodésias**, Curitiba, v. 7, n. 1, p. 41-52, 2001.
- DOUCETTE, P.; AGOURIS, P.; STEFANIDIS, A. & MUSA VI, M. Self-Organized Clustering for Road Extraction in Classified Imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing**, v. 55, n. 5-6, p. 347-358, 2001.
- DUDA R.O. & HART P.E. Use of the Hough Transformation to Detect Lines and Curves in Pictures. **Comm. ACM**, v.15, n. 1, p. 11-15, 1971.
- EGMONT-PETERSENA, M.; DE RIDDERB, D. & HANDELSC, H. Image processing with neural networks-a review. **Pattern Recognition**, v. 35, n. 10, p. 2279-2301, 2002.
- FABRE, S.; BRIOTTET, X. & APPRIOU, A. Impact of Contextual Information Integration on Pixel Fusion. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 40, n. 9, p. 1997-2010, 2001.
- GONZALEZ, R. WOODS R.E. & EDDINS, S.L. **Digital image processing using MATLAB**. Prentice-Hall, 2004. 624 p.
- GRUEN, A. & LI, H. Semi-automatic linear feature extraction by dynamic programming and LSB-Snakes. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 63, n. 8, p. 985-995, 1997.
- HINZ, S. & BAUMGARTNER, A. Automatic extraction of urban road networks from multi-view aerial imagery. **ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing**, v. 58, p. 1-2, p. 83-98, 2003.
- HOUGH, P.V.C. **Method and means for recognizing complex patterns**. U. S. Patent 3, 069 654, December 18. 1962.
- HU, X.; ZHANG, Z. & TAO, C.V. A Robust Method for Semi-Automatic Extraction of Road Centerlines Using a Piecewise Parabolic Model and Least Square Template Matching. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 70, n. 12, p. 1393-1398, 2004.
- IGARASHI, T. ALOS mission requirement and sensor specifications. **Advances in Space Research**, v. 28, n. 1, p. 127-131, 2001.
- JAXA. **ALOS Product Format Description**. 2006. Disponível em: <http://stage.tksj.jaxa.jp/eorcalos/PRISM_L1_J_ENa.zip>. Acesso: 7 Junho 2009.
- JIN, X. & DAVIE, C.H. An Integrated System for Automatic Road Mapping from High Resolution Multispectral Satellite Imagery by Information Fusion. **Information Fusion**, v. 6, n. 4, p. 257-273, 2005.
- KIM, T.; PARK, S.-R.; KIM, M.-G., JEONG, S. & KIM, K.-O. Tracking Road Centerlines from High Resolution Remote Sensing Images by Least Squares Correlation Matching. **Photogrammetric engineering and remote sensing**, v. 70, n. 12, p. 1417-1422, 2004.
- LI Y. & BRIGGS R. Automatic Extraction of Roads from High Resolution Aerial and Satellite Images with Heavy Noise. **World Academy of Science, Engineering and Technology** 54: 416-422, 2009.
- MATHWORKS. 2008. MATLAB. Acessado em 13 de Novembro de 2008. Disponível em: <<http://www.mathworks.com/>>.
- MENA, J.B & MALPICA J.A. An automatic method for road extraction in rural and semi-urban areas starting from high resolution satellite imagery. **Pattern Recognition Letters**, v. 26, p. 1201-1220, 2005.
- MENA, J.B. State of the art on automatic road extraction for GIS update: a novel classification. **Pattern Recognition Letters**, v. 24, n. 16, p. 3037-3057, 2003.
- MOHAMMADZADEH, A.; TAVAKOLI, A. & VALADAN ZOEJ, M.J. Road extraction based on fuzzy logic and mathematical morphology from pan-sharpened IKONOS images. **The Photogrammetric Record**, v. 21 n. 113, p. 44-60, 2006.
- NEVATIA, R. & BABU, K. R. Linear feature extraction and description. **Computer Graphics and Image Processing**, v. 13, p. 257-269, 1980.
- PAJARES, G. & DE LA CRUZ, J.M. A wavelet-based image fusion tutorial. **Pattern Recognition**, v. 37, n. 9, p. 1855- 1872, 2004.
- PARKER, J.R. **Algorithms for image processing and computer vision**. New York: John Wiley & Sons, Inc. 1997. 417 p.
- PÉTERI, R.; COULOIGNER, I. & RANCHIN, T., 2004. Quantitatively Assessing Roads Extracted from High-Resolution Imagery. **Photogrammetric Engineering & Remote Sensing**, v. 70, n. 12, p. 1449-1456.
- SETTEA, S. & BOULLART, L. Genetic programming: principles and applications. **Engineering Applications of Artificial Intelligence**, v. 14, n. 6, p. 727-736, 2001.
- TADONO T.; SHIMADA M.; WATANABE M.; HASHIMOTO T. & IWATA T. Calibration and Validation of PRISM Onboard ALOS. In: ISPRS Congress, 20., Istanbul, Turkey. 2004. **Proceedings**. v. 35, part. B1, p.13-18, 2004.
- ZHANG, C.; MURAI, S. & BALTSAVIAS, E. P. Road network detection by mathematical morphology. of In: ISPRS Workshop on 3D Geospatial Data Production: Meeting Application Requirements, Paris, France, 1999. **Proceedings**. p. 185-200, 1999.