

EXTRAÇÃO DE RODOVIAS EM IMAGENS DIGITAIS DE ALTA RESOLUÇÃO COM O USO DA TEORIA DE MORFOLOGIA MATEMÁTICA

Road Extraction in High Resolution Digital Imagery Using Mathematical Morphology Theory

Aline Sayuri Ishikawa¹
Erivaldo Antonio da Silva¹
Rodrigo Affonso de Albuquerque Nóbrega²

¹**Universidade Estadual Paulista – UNESP**
Faculdade de Ciências e Tecnologia - Departamento de Cartografia
Rua Roberto Simonsen, 305 - Caixa Postal 467, CEP 19060-900, Presidente Prudente – SP.
aline.ishikawa@gmail.com
erivaldo@fct.unesp.br

²**Mississippi State University**
Geosystems research Institute
2 Research Boulevard, Starkville-MS 39759 – USA
sal@gri.msstate.edu

RESUMO

Este artigo propõe um método de extração de rodovias em imagens de alta resolução baseado na teoria de Morfologia Matemática. O método proposto consistiu no desenvolvimento de rotina baseada em operadores morfológicos e elementos estruturantes contidos na *SDC Morphology Toolbox for MATLAB*. A rotina utiliza operadores como abertura, fechamento, esqueletização, erosão, dilatação, gradiente morfológico, entre outros. Devido à limitação do MATLAB em processar imagens de grande dimensão utilizando os recursos computacionais então disponíveis, tornou-se necessário recortar a área teste em 11 sub-imagens. Desse modo, a rotina morfológica teve que ser capaz de extrair feições do tipo rodovia nas 11 sub-imagens, alterando-se apenas os valores dos limiares, os quais diferem para cada tipo de imagem. Após a extração dos trechos de rodovias, foi necessário realizar o mosaico para obter a área teste total e na seqüência gerar os vetores para fins de análise da qualidade do resultado obtido com a extração. A avaliação do resultado foi através da análise correspondência linear. O alto grau na medida de completude revelou resultados bastante satisfatórios, comprovando a eficácia da teoria de Morfologia Matemática no processo de extração de feições.

Palavras chaves: Morfologia Matemática, Extração de Rodovias, Análise de Correspondência.

ABSTRACT

This paper proposes a method for road extraction from high resolution imagery based on Mathematical Morphology theory. The proposed method consisted on the development of mathematical morphology and structuring elements based routine using the *SDC Morphology Toolbox for MATLAB*. The routine uses operators as opening, closing, skeletonisation, erosion, dilation, morphologic gradient, among others. Prior to processing, the whole study area was subset into 11 sub-images due to the limitation of MATLAB and available hardware on computing large raster data. Thus, the developed morphologic routine was capable to be replicable for all 11 sub-images by considering only changes for the thresholds values, which differ for each image. The 11 sub-images were mosaicked later than the road extraction to recompose the overall test area. Next, the road vectors were generated to compute the quality analysis of the result obtained with the extraction. The assessment of the result was based on linear correspondence analysis. The high degree of the completeness metric indicated quite satisfactory results. It proves the effectiveness of the Mathematical Morphology theory as part of the features extraction process.

Keywords: Mathematical Morphology, Road Extraction, Correspondence Analysis.

1. INTRODUÇÃO

O processo de extração de rodovias utilizando imagens de Sensoriamento Remoto tem sido o propósito de muitos trabalhos na área de processamento de imagem e visão computacional. Estas pesquisas têm sido motivadas, sobretudo pela crescente importância do Sistema de Informações Geográficas (SIG) e a necessidade de aquisição e atualização de dados espaciais. Na área de planejamento urbano existe uma forte demanda para obtenção de informações atualizadas e acuradas sobre rodovias, sendo estas um importante recurso para diversas áreas de atuação, principalmente para o gerenciamento, planejamento e tomada de decisões (GALLIS, 2006, HINZ; BAUMGARTNER, 2000, PÉTERI; CELLE; RANCHIN, 2003).

Na área de Ciências Cartográficas, o problema de extração de feições tem sido de fundamental importância, há mais de duas décadas, na automação dos processos de coleta de feições cartográficas, como edifícios, rios, rodovias etc. Nesta área do conhecimento a automação é muito difícil devido à alta complexidade das cenas envolvidas, as quais são capturadas através de sensores geralmente embarcados em aeronaves e satélites, como as câmaras CCD (*Charge Coupled Device*) e os sistemas de varredura a laser (DAL POZ, 2003).

O advento de imagens de satélite com alta resolução espacial (por exemplo, IKONOS ou Quickbird) abriu novas possibilidades para o processo de extração de rodovias. A vantagem destes dados em relação as fotografias aéreas resume-se no custo de aquisição destes produtos. Embora a resolução espacial das fotografias aéreas seja melhor do que as imagens de satélite, para fins de extração de rodovias, a resolução das imagens de satélite é suficiente. Um problema ao trabalhar com imagens de alta resolução é a complexidade de sua estrutura, ou seja, a diversidade de alvos com diferentes formas, tonalidades e texturas, tais como casas, sombras de edifícios, automóveis e árvores (BACHER; MAYER, 2005, PÉTERI; CELLE; RANCHIN, 2003). Desse modo, devido a esta complexidade, o processo de extração de rodovias ainda é um tópico bastante desafiador.

Para a obtenção de bons resultados com a extração de rodovias é necessário que a estratégia adotada seja eficiente e confiável. Assim, optou-se por utilizar a teoria de Morfologia Matemática (MM) como ferramenta alternativa para o processo de extração. A escolha da MM se dá, entre outras razões, pelo fato desta estar em crescente utilização no meio científico, principalmente na área de extração e detecção de feições lineares, e ser uma excelente ferramenta não-linear que resolve de forma eficiente problemas de extração de informação a partir da análise das estruturas geométricas dos alvos contidos nas imagens digitais. Deve-se ressaltar que vários trabalhos sobre extração de feições empregam métodos lineares para realizar a detecção de bordas, o que não é suficiente para extrair estruturas geométricas dos objetos que formam uma

imagem e por isto, o domínio de aplicação desta abordagem torna-se restrito. Desse modo, técnicas não-lineares, como a Morfologia Matemática, têm sido mais eficientes devido a sua capacidade em remover ruídos e preservar informações de bordas simultaneamente.

Nesse sentido, este trabalho propõe um método de extração de rodovias em imagens Quickbird baseado em ferramentas de Morfologia Matemática. Na seção 2 tem-se uma breve revisão sobre conceitos e operadores morfológicos que envolvem a teoria de Morfologia Matemática utilizada no desenvolvimento deste trabalho. A seção 3 apresenta o método proposto para a extração de rodovias. Os resultados obtidos no processo de extração e a análise da qualidade do resultado estão apresentados na seção 4. E na seção 5 tem-se as considerações finais sobre o trabalho.

2. MORFOLOGIA MATEMÁTICA (MM)

A origem da MM remonta a 1964, com trabalhos de Matheron e Serra na Escola Superior de Minas de Paris localizada em Fontainebleau (BANON; BARRERA, 1994). A palavra morfologia é composta pelas palavras gregas *morphos* (formas) e *logia* (estudo), ou seja, a morfologia baseia-se na forma que a matéria assume (FACON, 1996).

Soille (1999) define a MM como uma teoria para análise das estruturas espaciais. Ela é chamada de morfologia, pois consiste na análise da forma e estrutura dos objetos. Ela é matemática no sentido que a análise baseia-se na teoria de conjunto, integrais geométricas e álgebra booleana.

Goutsias e Heijmans (2000) citam que a MM é considerada uma poderosa ferramenta para análise de imagens, em particular para aquelas aplicações onde aspectos geométricos são relevantes. Os autores mencionam ainda que a idéia principal da MM é analisar a forma dos objetos através de um modelo geométrico denominado elemento estruturante.

2.1 Elemento Estruturante

Facon (1996) define um elemento estruturante como um conjunto completamente definido e conhecido (forma, tamanho), o qual é comparado, a partir de uma transformação, ao conjunto desconhecido da imagem. O resultado dessa transformação permite avaliar o conjunto desconhecido.

Alterando-se o formato ou o tamanho do elemento estruturante é possível obter respostas sobre a estrutura geométrica do objeto contido na imagem. O tipo e a natureza da informação extraída dependem da escolha do elemento estruturante e da imagem estudada. A maior dificuldade está na escolha do elemento estruturante mais adequado para o resultado procurado (FACON, 1996). Para tanto, pode-se considerar a forma dos objetos, ou definir um tamanho específico e, para alguns elementos estruturantes considera-se uma orientação específica (SOILLE, 1999). Têm-se alguns

exemplos de elementos estruturantes ilustrados na Figura 1.

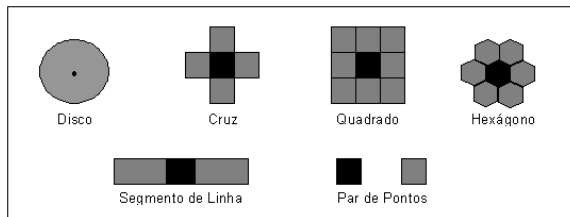


Figura 1. Formas de alguns elementos estruturantes. Fonte: Adaptado de Soille (1999).

Neste trabalho, será dado maior enfoque ao elemento segmento de linha, pois este é o que melhor se adequou a estrutura geométrica do objeto a ser detectado (pistas de rodovias).

2.1.1 Segmento de linha

Segmentos de linha são freqüentemente utilizados para remover ou extrair estruturas geométricas lineares presentes em uma imagem. Existem dois parâmetros associados a este elemento: comprimento e orientação. A orientação é dada em unidades de grau e o comprimento em número de *pixels*. Este número deve ser fixado de acordo com a largura ou comprimento dos objetos que serão processados. O comprimento de uma linha é definido pelo elemento estruturante através do número fixo de *pixels* e varia de acordo com o grau de inclinação do segmento de linha (SOILLE, 1999). A Figura 2 ilustra exemplos de elementos estruturantes linha.

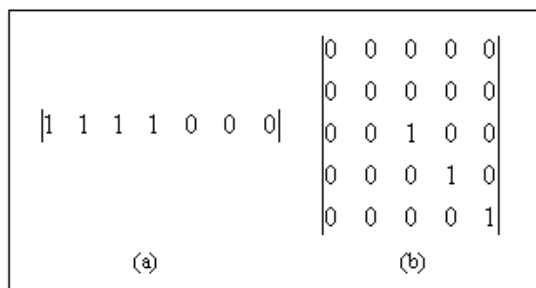


Figura 2. Elemento estruturante Linha. (a) Largura de 4 *pixels* e orientação de 180°, (b) Largura de 4 *pixels* e orientação de 45°.

2.2 Operadores Elementares

A extração de informações relativa a estrutura geométrica de uma entidade na imagem é obtida a partir de transformações que envolvem o elemento estruturante e a imagem em estudo. As transformações são realizadas com o uso dos operadores elementares. As operações morfológicas foram elaboradas inicialmente para imagens binárias, sendo posteriormente ampliadas para imagens em tons de cinza e atualmente para imagens coloridas. É importante ressaltar que todo o formalismo desenvolvido para imagens binárias pode ser aplicado a MM em níveis de

cinza, isto é, pode-se mostrar que a MM binária é um caso particular da MM em níveis de cinza. Nas próximas seções serão discutidas as transformações morfológicas elementares denominadas erosão e dilatação, sobre imagens binárias e em níveis de cinza.

2.2.1 Morfologia Binária

Na morfologia binária, as imagens de entrada são conjuntos do espaço bidimensional de números inteiros Z^2 , em que cada elemento do conjunto corresponde às coordenadas (x, y) do pixel que pertencente a vizinhança de *pixels* pretos e brancos.

A *erosão binária* de um conjunto X por um elemento estruturante B ($\varepsilon_B(X)$) é definida como a posição dos pontos, x , tal que B está incluído em X quando sua origem está localizada em x (SOILLE, 1999):

$$\varepsilon_B(X) = \{x \mid B_x \subseteq X\} \quad (01)$$

O elemento estruturante Bx corresponde ao elemento estruturante B centrado no *pixel* x . Segundo a equação 03, o elemento estruturante B desliza sobre a imagem X , comparando cada *pixel* com a vizinhança de x . Se o *pixel* de B corresponder a mesma posição na vizinhança de x preservam-se os *pixels* onde as vizinhanças coincidem. Essa idéia é apresentada na Figura 3, onde verifica-se a aplicação da erosão binária utilizando o elemento estruturante cruz.

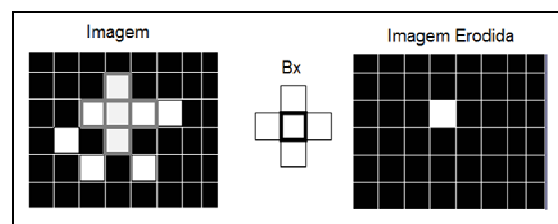


Figura 3. Erosão binária a partir o elemento cruz. Fonte: Adaptado de Facon (1996)

Em geral, a erosão binária apresenta os seguintes efeitos em seus resultados (FACON, 1996): diminuição de partículas; eliminação dos grãos de tamanho inferior ao tamanho do elemento estruturante; aumento dos buracos e separação de grãos próximos.

A *dilatação binária* de um conjunto X pelo elemento estruturante B ($\delta_B(X)$) é definida como a posição dos pontos x tal que B toca X quando sua origem coincide com x (SOILLE, 1999):

$$\delta_B(X) = \{x \mid B_x \cap X \neq \emptyset\} \quad (02)$$

Por esta definição, segundo Facon (1996), o elemento estruturante Bx , posicionado e centrado em cada *pixel* x de X , verifica uma possível interseção com a vizinhança de x . Caso seja verdadeiro, o ponto central na imagem resultante será um *pixel* relevante (1), caso contrário será irrelevante (0). A Figura 4 mostra a dilatação de uma imagem binária através de um elemento estruturante cruz.

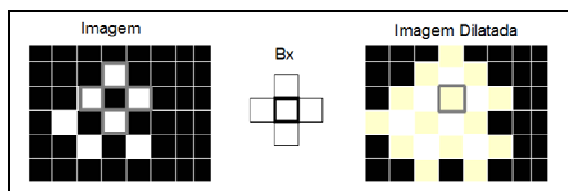


Figura 4. Dilatação binária a partir do elemento cruz.
Fonte: Adaptado de Facon (1996).

A aplicação desse operador produz os seguintes efeitos visuais na imagem (FACON, 1996): aumenta os objetos da imagem; preenche pequenos buracos e conecta objetos próximos.

2.2.2 Morfologia em Níveis de Cinza

Na morfologia cinzenta, as imagens de entrada são funções em Z^3 , onde dois componentes referem-se às coordenadas do *pixel* (x, y) e a terceira corresponde ao valor discreto de intensidade, sendo necessário conhecer o valor do *pixel* mais escuro MIN e o valor do *pixel* mais claro MAX.

A *erosão em níveis de cinza* de uma imagem f por um elemento estruturante B ($\varepsilon_B(f)(x)$) é definida como, o valor da erosão num dado *pixel* x é o valor mínimo da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em x (SOILLE, 1999):

$$[\varepsilon_B(f)](x) = \min_{b \in B} \{f(x+b) - B(b)\} \quad (03)$$

A erosão em níveis de cinza consiste em verificar se o elemento estruturante centrado em x encontra-se abaixo do sinal f , não sendo definida num ponto onde o elemento estruturante estiver acima do sinal f , ou seja, não haverá resposta se o elemento estruturante B não estiver contido na função f (MEDEIROS, 2003).

A *dilatação em níveis de cinza* da imagem f pelo elemento estruturante B ($\delta_B(f)(x)$) é definida como o máximo valor da imagem na janela definida pelo elemento estruturante quando sua origem está em x (SOILLE, 1999):

$$[\delta_B(f)](x) = \max_{b \in B} \{f(x+b) + B(b)\} \quad (04)$$

A dilatação em níveis de cinza consiste em verificar se o elemento estruturante centrado em x encontra-se acima da função f . A operação não terá resposta quando o elemento estiver totalmente fora da função f (MEDEIROS, 2003).

Os operadores dilatação e erosão morfológicos, quando aplicados isoladamente são transformações que não evidenciam características das imagens. De qualquer forma, permitem construir algumas funções importantes, como por exemplo, gradiente morfológico, fechamento, abertura, segmentação etc.

2.2.3 Filtros Morfológicos

Segundo Goutsias e Heijmans (2000), a filtragem de imagens é um importante passo no processamento e análise de imagens. Filtros são usados para pré-processar imagens para remover ruídos, bordas aguçadas e realçar a qualidade das imagens. Os filtros morfológicos são considerados não-lineares, sendo adaptados para outras tarefas de filtragem. Primeiro, um filtro morfológico pode ser usado para restaurar imagens corrompidas por algum tipo de ruído. Existem muitos filtros lineares para filtrar ruídos nas imagens, mas ao contrário dos filtros não-lineares, como os morfológicos, eles geralmente falham na preservação das formas das bordas. Segundo, um filtro morfológico pode ser usado para seletivamente remover estruturas ou objetos na imagem enquanto preservam outros. A seleção baseia-se na geometria e contraste local dos objetos na imagem (SOILLE, 1999). A abertura e fechamento são os filtros morfológicos básicos, sendo a base para a construção de outros filtros.

2.2.3.1 Abertura Morfológica

Segundo Soille (1999), a *abertura* γ de uma imagem f por um elemento estruturante B ($\gamma_B(f)$) é definida como a erosão de f por B ($\varepsilon_B(f)$) seguido da dilatação com o elemento estruturante transposto \tilde{B} ($\delta_{\tilde{B}}$):

$$\gamma_B(f) = \delta_{\tilde{B}}[\varepsilon_B(f)] \quad (05)$$

A Figura 5 apresenta um exemplo do processo de abertura morfológica da imagem f pelo elemento estruturante cruz B . Verifica-se o resultado da aplicação da erosão de f por B ($\varepsilon_B(f)$) seguido da dilatação com o elemento estruturante transposto \tilde{B} ($\delta_{\tilde{B}}$).

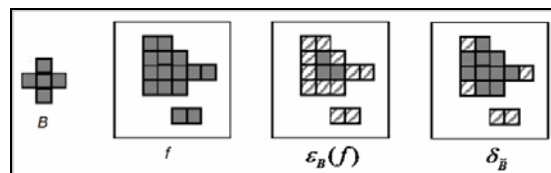


Figura 5. Processo de abertura morfológica utilizando um elemento cruz.

Fonte: Adaptado de Facon (1996).

Facon (1996) cita que os efeitos visuais da abertura são: separação de padrões claros próximos; eliminação de padrões claros menores que o tamanho do elemento estruturante; e conservação de padrões escuros distantes. Em geral, a imagem resultante do processo de abertura possui menos detalhes que a imagem original.

2.2.3.2 Fechamento Morfológico

Segundo Soille (1999), o *fechamento* da imagem f pelo elemento estruturante B ($\phi_B(f)$) é definido como a dilatação de f com elemento

estruturante B ($\delta_B(f)$) seguido da erosão com o elemento estruturante transposto \tilde{B} ($\varepsilon_{\tilde{B}}$):

$$\phi_B(f) = \varepsilon_{\tilde{B}}[\delta_B(f)] \quad (06)$$

A Figura 6 apresenta um exemplo do processo de fechamento morfológico da imagem f pelo elemento estruturante cruz B . Verifica-se o resultado da aplicação da dilatação de f por B ($\delta_B(f)$) seguido da erosão com o elemento transposto \tilde{B} ($\varepsilon_{\tilde{B}}$).

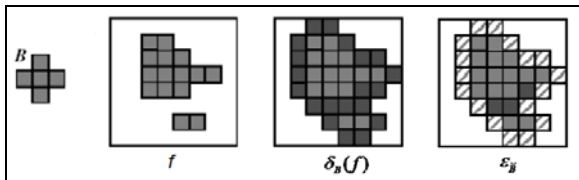


Figura 6. Processo de fechamento morfológico utilizando elemento cruz.

Fonte: adaptado de Facon (1996).

Os efeitos do fechamento são: separação de padrões escuros próximos; preenchem buracos no interior de partículas com tamanho inferior ao elemento estruturante; conservação dos padrões claros distantes; e conexão dos padrões claros próximos (FACON, 1996). Escolhendo cuidadosamente o tamanho e a forma do elemento estruturante, é possível construir filtros morfológicos para remover feições nas imagens de acordo com seu tamanho, orientação e forma.

2.2.4 Esqueletização por Regiões de Influência

Esqueleto ou eixo médio consiste em uma representação compacta que preserva somente pontos de um conjunto cuja distância mínima em relação ao limite do conjunto é a menor entre dois pontos do limite. Aplicações de esqueleto são muito utilizadas na análise de formas, reconhecimento de padrões e para reduzir a espessura dos objetos para uma linha com 1 *pixel* (SOILLE, 1999). A esqueletização por regiões de influência (*SKIZ*) consiste num processo utilizado para determinar a região de influência de cada conjunto pertencente a uma imagem binária, para posteriormente separá-los.

Seja uma imagem binária X , constituída de X_1, X_2, \dots, X_n , n conjuntos individuais conexos. Para cada conjunto X_i pode ser associada uma região de influência $IZ(X_i)$ que representa o conjunto de todos os pontos do plano que estão mais próximos de X_i que de qualquer outro $X_j, j \neq i$ (SOILLE,

$$1999): IZ(X_i) = \{x | \forall j \in \{1, \dots, n\}, i \neq j \Rightarrow d(x, X_i) < d(x, X_j)\} \quad (07)$$

Na prática, a imagem de zonas de influência IZ de uma imagem binária é representada como uma imagem rotulada por meio da qual cada região rotulada corresponde à zona de influência de um componente conectado da imagem binária de entrada.

O esqueleto por regiões de influência *SKIZ* do conjunto X , é definido como sendo os pontos que não pertencem a qualquer zona de influência:

$$SKIZ(X) = \left[\bigcup_i IZ(X_i) \right] \quad (08)$$

Isso é equivalente as bordas das zonas de influência. Segundo Facon (1996), esse esqueleto por regiões de influência divide a imagem X no mesmo número de regiões que o número de conjuntos X_i . O *SKIZ* constitui um sub-conjunto do esqueleto do complementar X^c . Portanto, o *SKIZ* pode ser obtido por espessamentos homotópicos de X .

3. MÉTODO DE EXTRAÇÃO DE RODOVIA

O processo de extração de rodovias consistiu em 2 etapas:

- 1) Detecção do eixo médio das pistas de rodovia via Morfologia Matemática; e
- 2) Extração das pistas de rodovia através de método de vetorização manual.

Para a detecção das pistas de rodovia, elaborou-se uma rotina combinando operadores e elementos estruturantes morfológicos contidos na SDC Morphology Toolbox. A rotina morfológica foi desenvolvida na plataforma MATLAB 7.0, e devido a limitação do *software* em trabalhar com arquivos de grande dimensão, tornou-se necessário recortar a área teste em 11 sub-imagens para realizar os processamentos.

Inicialmente, com base no tipo de alvo presente na imagem (i.e., rodovias), foram selecionados os operadores e elementos estruturantes morfológicos mais adequados para serem utilizados no processo de detecção. Vários testes foram realizados com o intuito de propor uma rotina que permitisse detectar feições do tipo rodovia nos 11 trechos. Ressalta-se que nesta rotina foram alterados apenas os valores dos limiares, os quais diferem para cada tipo de imagem. A rotina proposta utilizou operadores como, abertura, fechamento, esqueletização, erosão, dilatação, gradiente morfológico, entre outros. O fluxograma da Figura 7 apresenta as etapas da rotina morfológica proposta para a detecção das pistas de rodovias.

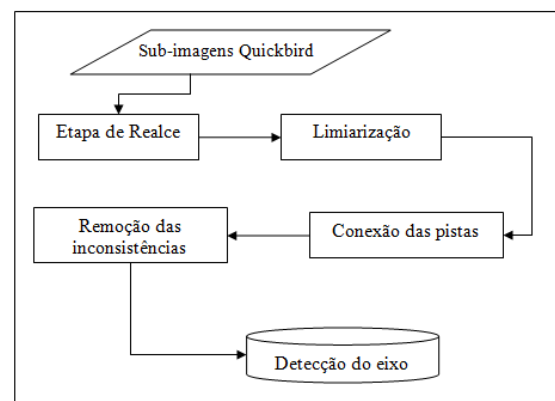


Figura 7. Fluxograma das etapas do processo de detecção das pistas de rodovias.

As etapas da rotina morfológica estão detalhadas na seqüência.

- a) *Etapa de Realce*: Realça a feição de interesse do restante da cena, permitindo que a extração seja realizada com mínima segmentação ao redor da feição. Para esta etapa foram aplicados os filtros morfológicos de abertura por reconstrução, contraste máximo e fechamento morfológico. A abertura por reconstrução foi aplicada com objetivo de remover os ruídos presentes na imagem, ocasionados principalmente pela presença dos automóveis. O contraste máximo foi aplicado para aumentar o contraste da cena e o fechamento morfológico minimizou pequenas inconsistências presentes na cena.
- b) *Limiarização ou binarização*: Etapa de segmentação da imagem. Neste processo, analisa-se a similaridade dos níveis de cinza da imagem extraindo os objetos de interesse através da seleção de um limiar λ que separa os agrupamentos de níveis de cinza. Todos os *pixels* com valor maior que o limiar estipulado na função são rotulados como “1” (branco), e os com valor menor recebem o valor “0” (preto). Uma das dificuldades do processo de limiarização é a escolha do valor do limiar, ou seja, do ponto de separação dos *pixels*. Para tanto, a escolha do limiar foi realizada com base na análise do histograma.
- c) *Conexão das Pistas*: Conexão dos segmentos de pistas que foram separados durante o processamento pela presença de sombras de árvores e carros no instante de aquisição da imagem. Para tanto, realizou-se uma filtragem morfológica através do operador fechamento. Este operador requer a definição de dois parâmetros em sua função, a imagem de entrada (binária ou em tons de cinza) e o elemento estruturante. A imagem de entrada corresponde ao resultado obtido na etapa anterior da limiarização e o elemento estruturante escolhido foi o segmento de linha. Para a utilização do elemento linha foi necessário definir dois parâmetros, a espessura da linha em *pixels* e o ângulo de rotação. Ressalta-se que devido as diferentes orientações das pistas de rodovia, os valores dos parâmetros do elemento linha foram alterados para cada trecho.
- d) *Remoção das Inconsistências*: Considerou-se como inconsistência todos os objetos presentes na cena que não fazem parte da feição de interesse, sendo classificados em ruídos e segmentação. Entende-se por ruído todos os alvos presentes na cena conectados à feição de interesse e, segmentação são os alvos que não fazem parte da feição de interesse (alvos isolados). Para a remoção dos ruídos e segmentação foram utilizadas as operações de erosão e abertura por área. A erosão foi aplicada através do elemento estruturante linha para desconectar os ruídos da feição, e a abertura por área removeu estes ruídos e a segmentação

contida na cena. Nesta etapa, foram considerados também os “buracos” presentes nas pistas da rodovia ocasionados principalmente pela presença de automóveis. Para eliminar estes buracos foi aplicado o operador fechamento por área, o qual elimina pixels menores que um determinado limiar estipulado pelo usuário.

- e) *Deteção do eixo médio das pistas*: Para a deteção do eixo médio aplicou-se o operador esqueletização. Para este operador, o principal parâmetro a ser definido é o elemento estruturante, o qual tem grande influência na qualidade do resultado final. O elemento estruturante representa a conectividade para a medida de distância. Este operador gera a imagem esqueleto através da deteção das linhas cuja equidistância varia de dois ou mais componentes conectados à imagem de entrada binária, segundo a conectividade definida pelo elemento estruturante cruz.

Após a deteção das pistas de rodovia nos 11 trechos a partir da rotina morfológica, realizou-se um processo de mosaicagem a fim de obter a área teste total. Na seqüência, fez-se a extração do eixo médio das pistas de rodovia através da geração dos arquivos vetoriais. Este procedimento foi realizado de forma manual no software Microstation.

4. RESULTADOS E ANÁLISES

4.1 Área Teste

A área teste corresponde a um trecho da Rodovia Raposo Tavares, localizado na região de Presidente Prudente (SP). Este trecho foi obtido a partir de uma cena coletada pelo satélite de alta resolução Quickbird, sendo esta uma imagem *pancromática* com resolução espacial de 0,60 metros, data de aquisição 23/02/2007. O trecho escolhido abrange uma área de 4535 x 4950 *pixels*, conforme ilustra a Figura 8. Devido à limitação do *software* MATLAB, em relação ao tamanho dos arquivos de entrada, foi necessário recortar a área teste em 11 sub-imagens

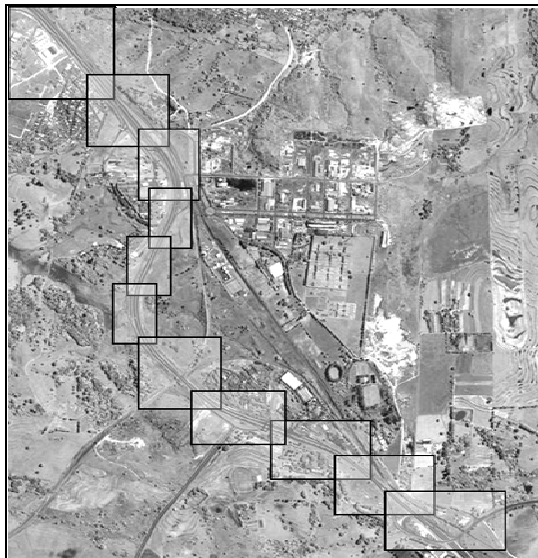


Figura 8. Área Teste.

4.2 Análise dos Resultados

A análise de qualidade da feição extraída tomou por base os desenvolvimentos de Wioldemann (2003) e Seo e O'Hara (2004), que utilizam parâmetros de análise de correspondência linear entre rodovias. A metodologia então apresentada abrange as principais funções de correspondência linear e parâmetros para verificar a qualidade da malha viária extraída de imagens, de receptores GPS ou digitalizada de cartas, e é passível de ser reproduzida em programas SIG.

A análise de correspondência linear baseia-se na comparação entre as seguintes entidades: rodovia extraída e rodovia de referência. A rodovia de referência corresponde ao vetor do eixo central da rodovia extraída pela metodologia apresentada; e a rodovia de referência é o vetor extraído manualmente, representando o eixo central da rodovia e considerado correto. A correspondência entre as linhas de referência e extraídas tem como base a análise do casamento geométrico entre ambas as feições, sendo essa análise realizada por meio de faixas de abrangência com larguras pré-definidas (*buffers*), conforme ilustra a Figura 9. Observa-se nesta figura, acima o casamento com a linha de referência (zona de referência) e abaixo o casamento com a linha extraída (zona de extração).

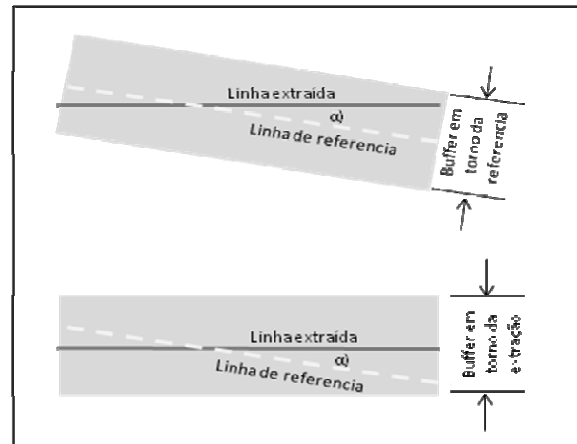


Figura 9. Princípio da análise de correspondência linear.
Fonte: Nobrega (2007)

Wioldemann (2003) cita que quanto maior a tolerância para o casamento entre as linhas, menor o rigor do processo de extração. No entanto, uma tolerância maior gera resultados aparentemente mais precisos e, na prática, menos confiáveis, uma vez que a área de abrangência dos buffers passa a ser aumentada. O emprego de *buffers* com largura próxima da largura real das vias implica em resultados mais próximos do real.

Entre os parâmetros que permitem inferir sobre a qualidade da rodovia extraída, escolheu-se para este trabalho a medida de completeza. Seo e O'Hara (2004) e Wioldemann (2003) definem a completeza como o percentual dos dados de referência que podem ser explicados pelos dados extraídos, ou seja, percentual da rede de referência detectada no processo de extração. O valor ótimo da completeza é de 100%. A equação 09 apresenta o critério de completeza:

$$Completeza = \frac{\text{comprimento da linha extraída}}{\text{comprimento do buffer de referência}} \quad (09)$$

4.3 Resultados e Discussões

A Figura 10 apresenta os resultados obtidos com a detecção das pistas de rodovia por meio da rotina morfológica proposta em cada um dos 11 trechos selecionados como área teste..

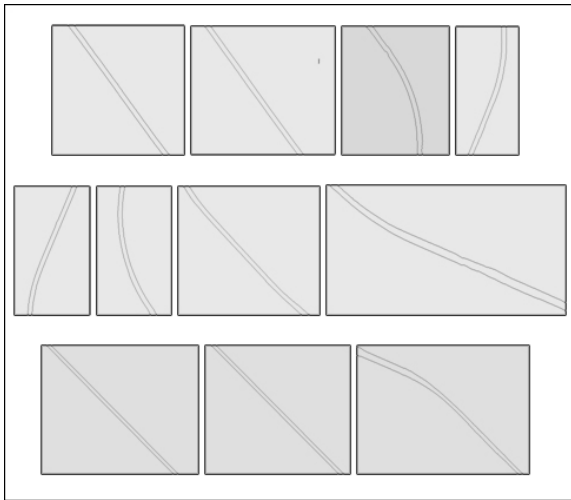


Figura 10. Detecção das pistas de rodovias com a rotina morfológica.

Da análise visual dos resultados apresentados na Figura 10, verifica-se que a rotina morfológica apresentou grande eficácia na detecção das pistas de rodovia. A Figura 11 mostra um exemplo da análise visual que foi realizada para verificar se a detecção foi realizada a contento. Nessa análise levou-se em consideração se o eixo médio das rodovias detectado coincidia com a linha que divide as pistas de rodovias.



Figura 11. Análise visual de um trecho linear.

Observa-se na Figura 11 que a rotina morfológica apresentou bons resultados na detecção das pistas de rodovia com estrutura linear, devido a utilização de elementos estruturantes lineares como parâmetro nas funções. Em trechos com curvas acentuadas os resultados foram satisfatórios, mas a detecção não foi tão eficaz, apresentando algumas falhas no delineamento das pistas de rodovias. Para a melhora dos resultados em rodovias com curvas, testes foram realizados utilizando elementos estruturantes em forma de disco ou semi-disco, porém não houve uma melhora significativa nos processamentos. A Figura 12 apresenta a análise visual realizada em um dos resultados obtidos de rodovias com curvas.

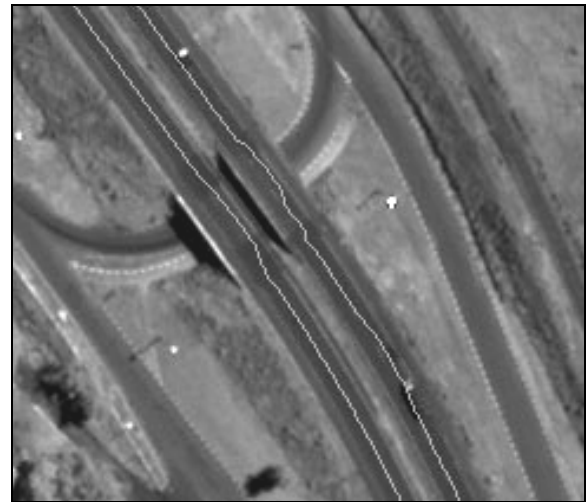


Figura 12. Análise visual de rodovias com curvas.

Para a extração da rodovia, inicialmente, gerou-se o mosaico dos 11 trechos contendo as pistas de rodovia detectadas para obter a área teste total. Na sequência, fez-se a vetorização da rodovia detectada via Morfologia Matemática mosaificada. A Figura 13 mostra o resultado do processo da extração de jusão rodovia.

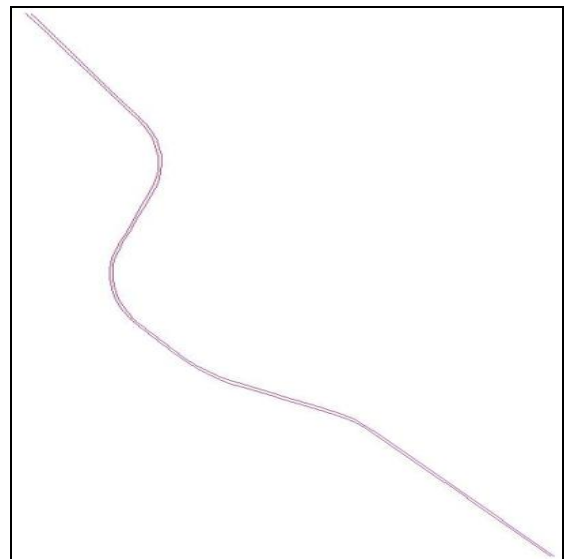


Figura 13. Rodovia Extraída.

Para a análise de qualidade da rodovia extraída, a metodologia obteve 93,56% de completude, ou seja, quase 94% das pistas da rodovia presentes na imagem foram extraídas corretamente pela rotina morfológica elaborada, considerando uma resolução espacial de 1m e *buffer* de 1 *pixel*.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Da análise dos resultados, verificou-se que a rotina morfológica elaborada foi bastante eficaz no processo de detecção de feições rodovias, possibilitando que a detecção das mesmas fosse realizada com êxito nos 11 trechos de sub-imagens. A rotina morfológica

apresentou adequada combinação entre os operadores morfológicos, elementos estruturantes e valores dos limiares, resultando em boa detecção dos eixos das pistas e sem segmentação ao redor da feição. Ressalta-se a importância em realizar a etapa de realce, para auxiliar na obtenção de bons resultados nos processos posteriores, permitindo que a detecção da feição seja realizada a contento e com pouca segmentação em seu entorno. A escolha dos limiares utilizados nas funções deve ser feita com bastante cautela, pois quando este não for escolhido adequadamente pode ocasionar a destruição da feição.

A escolha do elemento estruturante a ser utilizado nas funções é o fator principal para que sejam obtidos bons resultados com a detecção utilizando técnicas de Morfologia Matemática, uma vez que este é o parâmetro que identifica a forma do objeto a ser detectado. Verificou-se com os resultados obtidos, que a combinação entre operadores morfológicos e o elemento estruturante linha permitiu solucionar alguns dos problemas encontrados ao trabalhar com feições do tipo rodovias, como é o caso da desconexão das pistas ocasionadas principalmente pela presença de sombras e automóveis.

Entre os resultados obtidos, obviamente, observou-se que as rodovias com estruturas lineares foram as que obtiveram os melhores resultados na detecção, devido a utilização do elemento estruturante linha nas funções. As pistas de rodovia com curvas tiveram resultados satisfatórios, porém devido a dificuldade em encontrar elementos estruturantes que se adequassem a este tipo de estrutura, a rodovia detectada apresentou algumas falhas no seu delineamento. Alguns trechos apresentaram falhas na detecção devido à presença de alvos com tonalidades próximas a feição rodovia, e isso contribui negativamente para a detecção da feição em alguns trechos..

Como consideração final sobre o método proposto, tem-se que a utilização de técnicas morfológicas resultou em resultados positivos no processo de extração de pistas de rodovias em imagens digitais de sensoriamento remoto na área de cartografia. A análise dos resultados obtidos indica que os objetivos do trabalho foram atingidos de forma satisfatória. O valor de completude de 93,56% indica que o processo de extração foi realizado de forma correta.

Ressalta-se que a maior dificuldade do trabalho foi a limitação do *software* Matlab em relação à manipulação de imagens com grande dimensão, restringindo o processamento a pequenas áreas teste e tornando-o mais custoso em tempo de execução

A continuação do trabalho terá como foco estudar e definir procedimentos para que a dimensão das imagens não seja dificultador no processo morfológico de extração de feições. Com isto, o particionamento da imagem deixará de ser necessário e os resultados podem melhorar ainda mais, principalmente em relação ao custo computacional.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES e a FAPESP - Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo pelo apoio financeiro recebido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BACHER, U.; MAYER, H. Automatic Road Extraction from Multispectral High Resolution Satellite Images. In: The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences, 36, 2005, Vienna. **Proceedings**, 2005. p. 29-34.

BANON, G.J.F.; BARRERA, J. **Bases da Morfologia Matemática para a Análise de Imagens Binárias**. UFPe. Recife, 1994.

DAL POZ, A. P. **Metodologias semi-automáticas para extração de rodovias em imagens digitais usando programação dinâmica, análise de bordas de rodovia e teste ativo**. 2003. 159 f. Tese (Livre Docência em Fotogrametria) – Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente.

FACON, J. **Morfologia Matemática: Teorias e Exemplos**. Editor Jacques Facon, Gráfica Universitária Champagnat da Pontifícia Universidade Católica do Paraná, Curitiba, xii, 320p, 1996.

GALLIS, R. B. de A. **Extração semi-automática da malha viária em imagens aéreas digitais de áreas rurais utilizando otimização por programação dinâmica no espaço objeto**. 2006. 169f. Tese (Doutorado em Ciências Cartográficas). Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências e Tecnologia, Presidente Prudente.

GOUTSIAS, J., HEIJMANS, H.J.A M. **Mathematical Morphology**. Amsterdam: IOS Press, 2000. 258 p.

HINZ, S.; BAUMGARTNER, A. Road extraction in urban areas supported by context objects. In: International Society of Photogrammetry and Remote Sensing, 19, 2000, Amsterdam. **Proceedings**. v. 33, p. 405 – 412.

MATHERON, G. **Radom sets and integral geometry**. New York: John Wiley, 1975. 261p.

MEDEIROS, N. das G. **Segmentação morfológica aplicada à cartografia**. 2003. 131 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Cartográficas) – Faculdade de Ciências e Tecnologia, Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.

NÓBREGA, R. A. A. **Detecção da malha viária na periferia urbana de São Paulo utilizando imagens**

orbitais de alta resolução espacial e classificação orientada a objetos. 2007. 166 p. Tese (Doutorado em Engenharia de Transportes) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo.

PÉTERI, R.; CELLE, J.; RANCHIN, T.; Detection and extraction of road networks from high resolution satellite images. In: IEEE International Conference on Image Processing (ICIP'03), 2003, Barcelona. **Proceedings**, 2003, p. 301-304.

SEO, S; O'HARA, C. G. A toolkit for quantifying linear feature extraction performance. In: ASPRS Annual Conference, 2004, Denver , USA. **Proceedings...** Denver, USA, 2004.

SERRA, J. **Image analysis and mathematical morphology.** London: Academic Press, 1982. 610p.

SILVA, E.A. Extração de feições cartográficas de imagens multiespectrais fundidas. São Paulo:USP, 1995. 114p. Tese (doutorado em Engenharia) – Escola Politécnica da USP, 1995.

_____. Extração de feições cartográficas de imagens multiespectrais fundidas usando morfologia matemática. Revista de Cartografia e Cadastro, n.06:63-70. 1997.

_____. Use of mathematical morphology in cartography. IN: BRAZILIAN WORKSHOP ON MATHEMATICAL MORPHOLOGY, 3., São José dos Campos - SP, 1997.

SOILLE, P. **Morphological image analysis: principles and applications.** Berlin: Springer-Verlag, 1999. 316 p.

WIELDEMANN, C. External evaluation of road network. In: ISPRS Workshop Photogrammetry and Remote Sensing, 2003, Munich, Germany. **Proceedings...** Munich, Germany, v.34, part 3/W8, 2003. p. 93-98.