

## **O uso de Imagens SRTM na modelagem de fenômenos hidrológicos (escoamento superficial)**

Tayná Freitas Brandão<sup>1</sup>  
Rosângela Leal Santos<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidade Estadual de Feira de Santana - UEFS/DTEC  
Av. Universitária, s/n - Km 03 da BR 116 - Campus Universitário - CEP: 44031-460  
Feira de Santana - BA - Brasil  
taynacivil@gmail.com; rosaleal@uefs.br

**Abstract.** This article describes the main applications of digital elevation models (DEM) in hydrology, which was widespread after the inclusion of hydrological models to geographical information systems (GIS) and after the free release of altimetric data of the Shuttle Radar Topography Mission. There is, in general, the main functions and their existing products available, its results and applications, seeking outline both the network of drainage and the river basin, in the main software on the market, whether proprietary or free.

**Palavras-chave:** DEM, SRTM, Hydrological Model, MDE, SRTM, Modelo Hidrológico.

### **1. Introdução**

Nos últimos anos a aplicação e o desenvolvimento de ferramentas adequadas à gestão ambiental têm sido alvo de inúmeros estudos e pesquisas, onde se destaca a aplicação das geotecnologias, que incluem os Sistemas de Informações Geográficas (SIG's) e o Sensoriamento Remoto e se encontram num estágio avançado de desenvolvimento, permitindo grande acessibilidade de recursos, a custos relativamente baixos Jacintho (2003). Todas estas atuais modificações e ampliação da gama de produtos ofertados pelo sensoriamento remoto orbital, indicam um crescente potencial do uso destes dados para estudos geomorfológicos, onde, as informações sobre as formas de uso e cobertura do solo, juntamente com os dados topográficos, possibilitam o desenvolvimento de modelos hidrológicos mais acurados.

Os SIG's têm grande importância na gestão ambiental por facilitarem o gerenciamento de informações espaciais e permitirem a elaboração de relatórios que subsidiam as tomadas de decisões. O Sensoriamento Remoto, por sua vez, devido à rapidez e periodicidade na obtenção de dados primários sobre a superfície terrestre, constitui-se uma das formas mais eficazes de monitoramento ambiental em escalas locais e globais. Neste contexto, para representar a informação espacial e temporal de bacias hidrográficas de maneira rápida por meio de mapas de uso do solo, são utilizadas técnicas de sensoriamento remoto, juntamente com um sistema de informação geográfica Jensen (2006); Tucci (2000).

Através da obtenção direta, ou estimada do valor de escoamento superficial de água sobre o solo, produzem-se informações importantes a respeito de infiltração de água no solo e da recarga de aquíferos subterrâneos. O escoamento superficial é um importante processo associado à erosão hídrica e ocorre em função da cobertura do solo, declividade do terreno e tipo do solo, intensidade e duração das chuvas basicamente. Ferreira et.al, (2007).

No Brasil, a grande maioria dos estudos hidrológicos, segue as informações topográficas existentes nas cartas planimétricas do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). No entanto, editadas em 1977, essas cartas não representam a paisagem atual. A recente coleta de dados topográficos por técnicas de sensoriamento remoto, como os dados SRTM ( Shuttle Radar Topography Mission), tem se mostrado como alternativa a falta de informações relativas ao relevo. Conforme Zeilhofer (2001) e Nobrega et. al (2004), o emprego destes dados como fonte de informação altimétrica pode suprir as necessidades decorrentes da ausência ou escassez de cartografia em muitas regiões do globo terrestre , por sua vez,

causadas pela dificuldade de acesso ou pela carência de projetos de mapeamento sistemático. Estas duas situações se enquadram na realidade da cartografia nacional.

Assim o presente trabalho teve como objetivo avaliar o uso das imagens SRTM para a modelação de fenômenos hidrológicos com ênfase no estudo do escoamento superficial.

## 2. Área de estudo

O município de Feira de Santana está localizado no Estado da Bahia na Região Econômica do Paraguaçu, situado cerca de 105 km a noroeste (NW) de Salvador, capital do estado baiano. O município se destaca por ser o maior entroncamento rodoviário do Norte-Nordeste com uma população em torno de 500 mil habitantes, possuindo uma extensão aproximada de 1350 km<sup>2</sup>. Geologicamente, é constituído por tabuleiros areno-argilosos, repousando concordantemente sobre o embasamento cristalino, formando pacotes sedimentares que variam de 1.5 m a 15m de profundidade. As altitudes são modestas, em torno de 250m, com exceção dos relevos residuais que ocorrem preferencialmente ao norte e oeste do município, podendo estes alcançarem mais de 600m. A drenagem principal do município é constituída pelos rios Jacuípe, à esquerda, e o Pojuca e Subaé à direita. (Figura 1).

Para região de estudo, assim como para quase todo globo terrestre, estão disponíveis dados de modelo numéricos de terreno com resolução de 90 metros, provenientes do NASA Shuttle Radar Topographic Mission (SRTM) de distribuição gratuita.

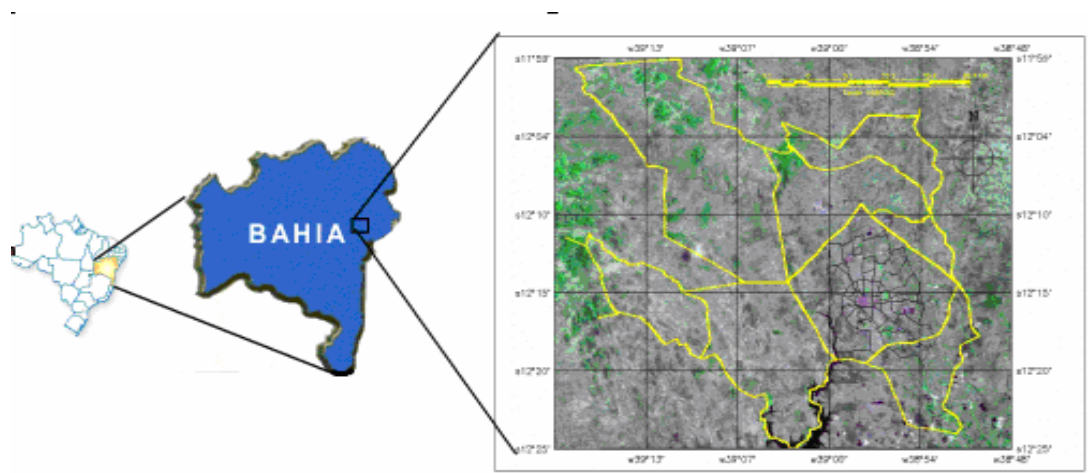


Figura 1: Município de Feira de Santana, no Estado da Bahia. Mapa do município com os Distritos (em amarelo) e destaque para a divisão da área urbana em bairros (preto). Informações sobrepostas a uma composição RBG 3-4-2 da imagem CCD do CBERS-2 de 06/03/2006.

## 3. Materiais e Métodos

### 3.1 Os MDE e as representações hidrológicas

Os dados topográficos, podem ser armazenados em formato digital através de três estruturas básicas:

- Modelos de elevação digital em formato de grade (os famosos DEM's – Digital Elevation Models ou MDE, Modelos Digitais de Elevação);
- Redes irregulares triangular (TIN's – Triangular irregular Networks); e
- Estruturas de armazenamento baseadas em contorno (isolinhas e/ou spiline).

As grades consistem de uma estrutura matricial de dados com as elevações topográficas correspondente a cada pixel armazenada nos nós da matriz. No armazenamento em formato de TIN, tanto a localização (x, y) como a elevação são armazenadas em nós irregularmente

espaçados. A estrutura de dados baseada em contornos armazenam suas estruturas como dados vetoriais, ao longo das linhas de contorno.

O modelo *grade* também conhecido como *grid* ou *matriz de altitude* é construído de modo a ter-se um conjunto de pontos tridimensionais dispostos convenientemente numa *malha retangular ou quadrada* gerada a partir dos pontos amostrais. A interseção das linhas com as colunas desta grade são chamadas de *nós*, que possuem a localização espacial definida pelas coordenadas tridimensionais (x,y,z). Os valores da ordenada z, devem retratar da forma mais fiel possível, a superfície a ser modelada. Como na maioria das vezes a grade apresenta seus nós regularmente espaçados (figura 26), é em geral conhecida como grade regular. A grade é arranjada de forma que sua área retangular coincida com a área a ser modelada.

A representação GRID pode ser definida de maneira sucinta como uma função polinomial por partes sobre retalhos retangulares, ou seja, a partir do modelo grid é definida uma função de interpolação para cada um de seus retalhos retangulares.

A representação do modelo digital de elevação por grade regular se dá através da definição de uma função para seus retalhos retangulares. A partir desta função, pode-se executar avaliações no modelo, construir contornos, etc.

### 3.1.2 Características de um MDE para aplicações hidrológicas

O modelo digital de elevação é utilizado para calcular os valores que descrevem a altimetria de uma localização geográfica específica (por exemplo fornecer a elevação de um ponto), ou dos arredores desta localização (por exemplo fornecer a declividade de uma região imediatamente próxima) e deve retratar de maneira precisa a área em estudo. O MDE deve ser capaz, também, de representar ou fornecer informações geomorfológicas, ou seja, *características especiais* do relevo, que traduzem formas específicas, tais como: cumeadas, talwegues, etc, bem como as descontinuidades da superfície, tais como falhas geológicas.

Um *modelador digital de terreno* é uma ferramenta computacional destinada a gerar uma superfície representativa da distribuição espacial de uma determinada *característica*, possibilitando sua análise, manipulação e avaliação. A *característica* a ser modelada pode ser qualquer grandeza que possua uma variação espacial contínua. Os dados de entrada para estes modeladores podem ser alguns *pontos amostrais* relativos ao fenômeno a ser modelado, ou até mesmo parâmetros extraídos da análise de um modelo digital de terreno já existente Simões (1993).

## 3.2 Procedimento

Muitos softwares foram desenvolvidos para trabalhar efetivamente com imagens raster, mais precisamente imagens onde os valores da radiância do pixel que representam a altimetria. Estas imagens são modelos de elevação (MDE) e são a base sobre a qual diferentes módulos de análise hidrológicas associados aos SIG trabalham. Geralmente estes módulos geram como saídas de processamento, tanto imagens raster como vetores (em muito dos casos já com a topologia embutida), esquematização de áreas de captação de água, bem como as próprias redes de drenagem, podendo ou não virem com parâmetros hidrológicos adicionais, como, por exemplo, uma tabela com o sistema de hierarquização de Strahler (1957) e as análises lineares decorrentes destes dados. Assim, todas estas informações podem ser extraídas a partir de uma simples imagem MDE, como por exemplo de uma imagem gerada pelo SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*).

Na grande maioria dos softwares utilizados em modelagem hidrológica, para extração automática características morfométricas (Arc Hydro, SAGA, MapWindows, SPRING), todo o procedimento é baseado num algoritmo determinístico de 8 direções de fluxo (D8).

Além da extração da rede de drenagem, estes módulos também permitem gerar tabelas. As áreas de captação identificadas podem ser facilmente ligados a uma tabela com coluna de

identificadores e podem ser exportados para outras aplicações. De qualquer modo, a rede de drenagem e as áreas de captação, em suas diferentes ordens de grandeza podem ser agregadas, segundo diferentes ordens da hierarquia da rede de drenagem. Também podem ser calculados uma série de índices compostos, utilizando fluxo acumulação de área e encosta ou rede de drenagem e mapas de direção de fluxo.

Para a realização deste estudo, utilizaram-se dados SRTM com resolução espacial de 92 metros (Figura 2).

Foi escolhido o plug-in TauDEM, rodando sobre o MapWindows 2.7. O TauDEM (Terrain Analysis Using Digital Elevation Models) é um conjunto de ferramentas para análise de terreno utilizando-se de modelos digitais de elevação. Este aplicativo incorpora os programas e funções de análise de MDE desenvolvidos por Tarboton (1997), Tarboton (1998). Este aplicativo é um pacote que funciona como uma componente extensível tanto para o ArcGIS (9.0 e superior) como para o MapWindow, um GIS de código aberto. O MapWindow é uma aplicação gratuita, extensível, que pode ser usado como um sistema de informações geográficas.

Primeiramente foi retirado os possíveis *sinks* (Fill Sinks) dos dados SRTM. Estes consistem em áreas rodeadas por elevações com valores de cotas superiores, que podem ser associadas à depressões. Estas depressões ou *sinks* são consideradas impedimentos ao escoamento, quando da aplicação de modelos chuva-vazão, modelos sedimentológicos e de poluentes de origem difusa sendo preenchidas levando em consideração as altitudes dos pixels vizinhos Mendes e Cirilo (2001).

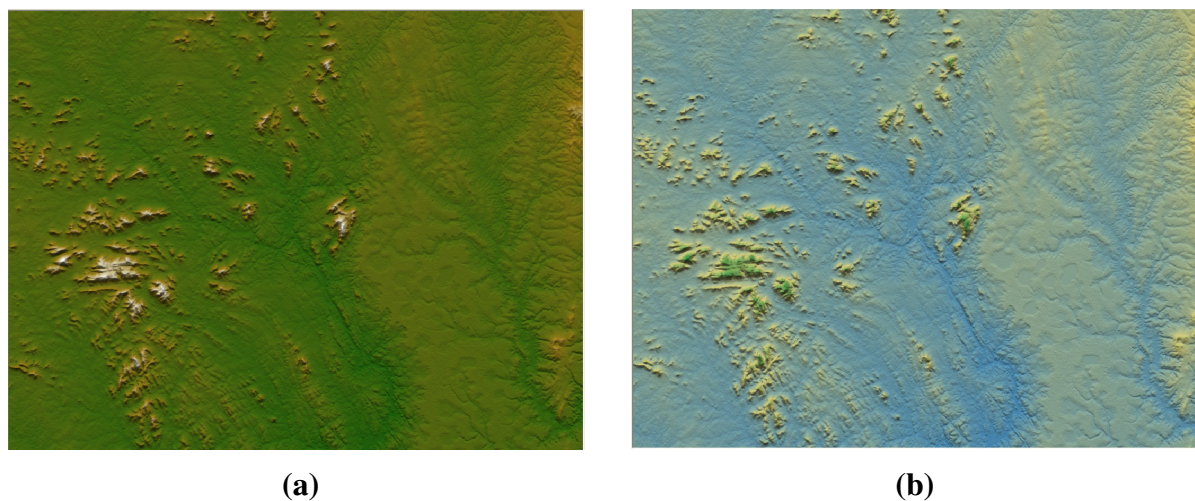


Figura 2 – Imagem SRTM abrangendo o Município de Feira de Santana (BA). (a) Imagem em composição falsa cor de hipsometria; (b) Imagem após a retirada dos sinks.

### 3.2.1 Direção de fluxo

O próximo passo foi definir a direção de fluxo de água (*Flow Direction*). Para tanto, utiliza-se a regra da maior declividade, atribuindo o sentido do escoamento para a célula vizinha que apresente a maior diferença de elevação do terreno em relação à célula em questão dividida pela distância entre elas, seguida do tratamento de situações particulares Jenson e Domingue (1988). A direção de fluxo determina a direção de maior declividade de um pixel em relação a seus 8 pixels vizinhos (Figura 3). Tem a finalidade de montar uma grade digital onde o valor de cada pixel representa a direção de escoamento da água. Cada pixel recebe um valor que representa a direção para onde a água segue (Figura 03). Esta direção será aquela que levará a água para o pixel vizinho de menor valor de altitude Mendes e Cirilo (2001). Para este procedimento utilizou-se o algoritmo D8 (Fluxo de direção D8): este algoritmo assume que, para a direção do fluxo, cada célula se dirige para uma vizinha

adjacente ou diagonal utilizando passos descendentes. A encosta é avaliada a medida em que o fluxo desce e é expressa como uma relação altura/distância, isto é, a tangente do ângulo. A direção do fluxo é considerado sem dado ou nula para qualquer célula adjacente da grade situada na borda do MDE, ou adjacente é uma célula sem valor. Em áreas planas, a direção do fluxo é determinado independente da altura da superfície indo em direção das superfícies mais baixas. O algoritmo de direção de fluxo D8 também pode ser aplicado sobre um MDE que não tenha seus *pits* preenchidos, posto que este se associarão a valores direcionais associados aos valores mais baixos da encosta.

O método D8 foi introduzido por O' Callaghan e Mark (1984) e tem sido amplamente utilizado. O conceito do D8 tem a desvantagem de resultar do processo de discretização do fluxo em somente uma das oito possíveis direções separados por 45°, isto tem motivado o desenvolvimento de outros métodos que possam inferir na múltipla direção de fluxos, métodos de direcionamento aleatório e métodos tubulares de fluxo em gride (Figura 4).

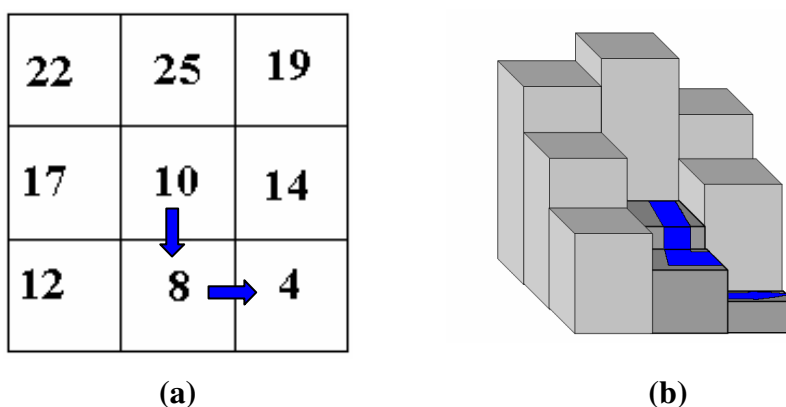


Figura 3 – Direção de escoamento de um pixel, determinado pela declividade. (a) Matriz de valores; (b) Representação altimétrica

A partir deste processo, se consegue gerar toda uma série de produtos indiretos, alimentados apenas como os dados do MDE como entrada, que possibilitam caracterizar e extrair as variáveis morfométricas mais importantes para análise fluvial.

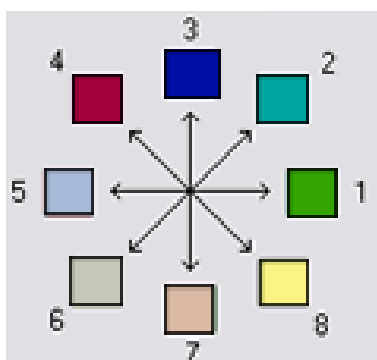


Figura 4 – Codificação do algoritmo D8. Onde 1 é Leste, 2 – Nordeste, 3 – Norte, 4 – Noroeste, 5 – Oeste, 6 – Sudoeste, 7 – Sul, e 8 - Sudeste. As encostas são avaliadas na direção de maior declividade descendente e é considerada como uma relação de altura/distância,, isto é a tangente do ângulo.

### 3.2.2 Área de contribuição

Uma área de aclave (contada em termos de números de células do gride) é calculada seja por direção de fluxo simples e múltiplo utilizando-se um procedimento recursivo que é uma extensão do algoritmo recursivo mais eficiente para direções simples. Esta área de aclave para cada área do gride é tomada como sua própria área mais do que a área dos aclives vizinhos que tenha alguma fração drenada. A área de contribuição específica é a área do aclave por unidade do comprimento do contorno, considerado aqui como o número de células multiplicado pelo tamanho da célula (área da célula dividido pelo tamanho da célula) Isto assume-se que o tamanho da célula do gride é o comprimento do contorno efetivo na definição da área de contribuição específica e não pode se distinguir qualquer diferença do comprimento do contorno sobre a direção do fluxo.

### 3.2.3 Redes de canais

Quando o mapa da área de contribuição é visualizado utilizando um limiar escolhido, a rede de canais se forma a partir dessas células com área de contribuição maior que o limiar da área de contribuição. Cabe-se então decidir qual é o mais apropriado limiar ou a partir de que valor se estima a contribuição da encosta para esse limiar. Uma vez que o limiar tenha se estabelecido, a rede de canais pode ser definida (mapeada) com todas as células do *gride* com áreas de contribuição maior que o limiar.

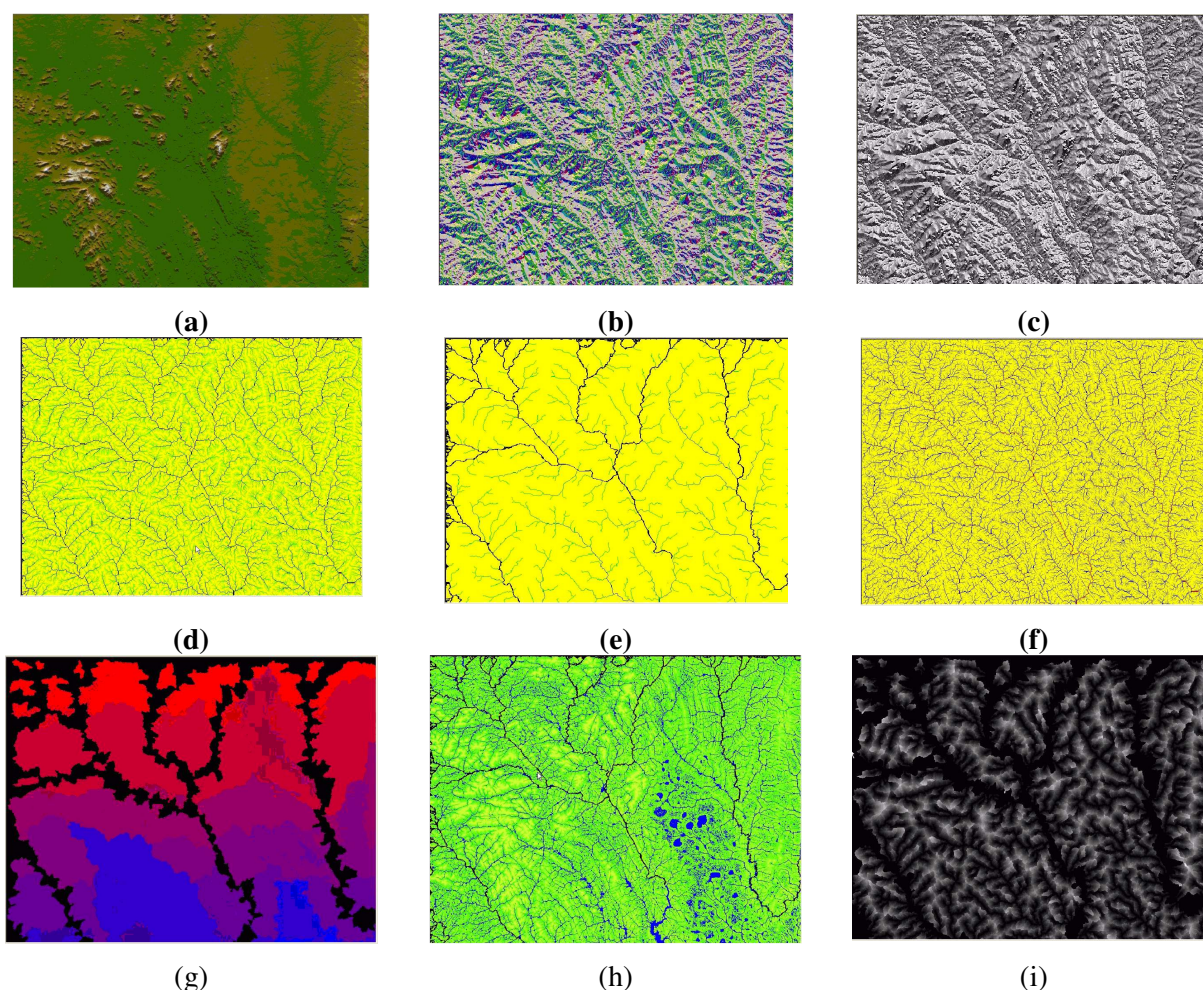


Figura 5 – Imagens resultantes de processamento do SRTM. (a) Imagem original, composta por falsa cor, simulando hipsometria; (b) Direção de fluxo do escoamento; (c) Direção do fluxo calculado pelo Dinf; (d) Área de contribuição calculado pelo algoritmo D8; (e) Área de captação específica dinf; (f) Ordenamento da rede segundo Strahler; (g) Bacias e sub-bacias hidrográficas; (h) Índice de umidade (Vertente/Área); (i) Distâncias entre canais fluviais.

#### 4. Resultados e Discussão

A partir da imagem SRTM os dados processados foram geradas 14 novas imagens raster, representando os resultados da ação do algoritmo D8 além de duas saídas vetoriais, representando a rede de drenagem em formato *shape* (Figura 5).

Estes arquivos no formato gride são especialmente usadas para representar fenômenos geográficos que variam no tempo e no espaço como os fenômenos hidrológicos.

As falsas depressões constituem um problema importante na geração de modelos de predição do escoamento, pois interrompem o escoamento superficial. Devem ser removidas, portanto, para se ter um MDE consistente sob o ponto de vista hidrológico.

Essas imperfeições são muito frequentes nos MDE's e derivam-se de erros presentes nos dados de entrada ou introduzidos no processo de interpolação.

Os resultados apresentados nos mostrou uma tendência de quanto mais elementos existem no dado vetorial que impossibilitam a indeterminação (limites diferentes de bacias ou sub-bacias hidrográficas ou corpos d'água não devidamente representados) maior é o percentual de segmentos indeterminados. Por outro lado, a topografia plana do terreno também prejudicou a correta formação contínua da rede no seu formato final de exportação (vetorial). Este fato deve-se principalmente a natureza do método determinístico do algoritmo utilizado, quando aplicado ao relevo plano, onde o fluxo dos rios sofre infiltração nos solos bastante permeáveis e profundos formando uma rede de drenagem pouco marcada.

#### 5. Conclusões

Utilizando os dados orbitais da SRTM na geração de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes, viabiliza-se a extração de variáveis físicas das bacias hidrográficas em SIG em menor intervalo de tempo auxiliando na tomada de decisões relativas à gestão ambiental. As técnicas de sensoriamento remoto, aliadas às técnicas de SIG se mostram eficientes para avaliações referentes a dados hidrológicos.

Conforme Valeriano (1999), as principais vantagens do uso do SRTM estão ligadas ao evidenciamento dos canais de drenagem e divisores de água cujos limites podem ser diretamente digitalizados, assim como apoiar o georreferenciamento de imagens de sensoriamento remoto. Porém, este dado apresenta como desvantagem o fato das feições serem estruturadas no formato raster e não vetorial o que dificulta a aplicação de recursos, como a manipulação de arcos e sobreposição de bases.

A aplicação de pacotes hidrológicos contidos nos SIG's baseados em DEM aqui descritos, apesar de todos os problemas apresentados no decorrer deste trabalho, vem favorecer a pesquisa hidrológica oferecendo novos recursos, aumentando a flexibilidade necessária para extrair uma rede completa topologicamente baseada em modelos hidrológicos com relevantes atributos associados. Com a utilização de produtos orbitais, como os fornecidos pelo SRTM, pode se formar uma rede realísticamente produzida. Futuramente, ações mais complexas podem ser adicionadas como a modificação de fluxo topológico e outros processos hidrológicos mais complexos. Também pode ser agregado outros métodos de hierarquização além do de Strahler (1957) como o das Ottobacias. Os dados espaciais e tabulares podem ser exportados em diferentes formatos, podendo assim, serem utilizados em outros aplicativos facilitando a parametrização de modelos hidrológicos.

#### 6. Referências bibliográficas

- EBNER, H. e EDER, K., (1992) State of the Art in Digital Terrain Modelling. In: European Conference and Exhibition on GIS, EGIS 92, pp 681-690.
- FERREIRA, D. E. Estimativa do escoamento superficial na bacia do córrego João Pedro através de técnicas de geoprocessamento. **Anais I seminário de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Paraíba do Sul: o Eucalipto e o Ciclo Hidrológico**, Taubaté, Brasil, 07-09 novembro de 2007, IPABHi, p. 163-169.

JENSEN, J. R. **Remote sensing of the environment: earth resource perspective**. London: Princite-Hall, 2006. 544 p.

MENDES, C. A. B., CIRILO, J. A. **Geoprocessamento em Recursos Hídricos: Princípios, integração e Aplicação**. Porto Alegre: ABRH, 2001.

NOBREGA, R. A. A. ; QUINTANILHA, J. A.; BARROS, M. T. L. Modelagem digital do terreno como subsidio para a geração da altimetria e das ortofotos para o sistema de suporte a decisões da bacia do Cabuçu de Baixo em São Paulo. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 2004.

RENNÓ, Camilo Daleles. Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas. **Tese de Doutorado do Curso da Pós-Graduação e Sensoriamento Remoto**, São José dos Campos: INPE, 2004.

RUBERT, O.; RIBEIRO, C.; CHAVES, M. (1999). “Um novo divisor de águas na geração de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes” in **XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, Belo Horizonte (MG).

SHAW, D.; MARTZ, L.; PIETRONIRO, A. (2005). “Flow routing in large-scale models using vector addition”. **Journal of Hydrology**. 307, pp. 38-47.

SIMÕES, Margareth Gonçalves. Modeladores digitais de terreno em sistemas de informação geográfica. **Dissertação de Mestrado em Engenharia de Sistemas e Computação**. Rio de Janeiro: COPPE/UFRJ, 1993, 167 pag.

STARHLER, A. N. **Quantitative analysis of watershed geomorphology**. Trans. American Geophysical Union, 1957.

TARBOTON, D. G. ; AMES, D.P. Advances in the mapping of flow networks from digital elevation data, in **World Water and Environmental Resources Congress Anais**, Orlando, Florida, May 20-24, ASCE, 2001.

TARBOTON, D. G., A New Method for the Determination of Flow Directions and Contributing Areas in Grid Digital Elevation Models, **Water Resources Research**, 33(2): 309-319, 1997..

TARBOTON, D. G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. **Hydrologic Processes**, 5(1): 81-100, 1991.

TARBOTON, D. G.; BRAS, R.L.; RODRIGUEZ-ITURBE, I. Physical Basis for Drainage Density, **Geomorphology**, 5(1/2): 59-76, 1992.

TONELLO, Kelly Cristina. Análise Hidroambiental da Bacia Hidrográfica da Cachoeira das Pombas, Guanhães, MG. **Tese de Doutorado em Ciência Florestal**. Viçosa: UFV, 2005.

TUCCI, C. E. M. **Hidrologia Ciência e Aplicação**. Rio Grande do Sul: Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. 943 p.

VALERIANO, M. M. **Estimativas de variáveis topográficas por geoprocessamento para a modelagem da perda de solos**. 172 p. Tese (Doutorado em Geociências e Meio Ambiente) – Universidade Estadual de São Paulo, Rio Claro, 1999.

ZEILHOFER, P. Modelação do relevo e obtenção de parâmetros fisiográficos na bacia do Rio Cuiabá. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, v. 6, 2001.