

# **AVALIAÇÃO DE MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO PARA DELIMITAÇÃO AUTOMÁTICA DE BACIAS HIDROGRÁFICAS**

## *Assessment of Digital Elevation Models for Automated Watersheds Delimitation*

**Levindo Cardoso Medeiros<sup>1, 2</sup>**  
**Nilson Clementino Ferreira<sup>1, 3</sup>**  
**Laerte Guimarães Ferreira<sup>1</sup>**

<sup>1</sup>**Universidade Federal de Goiás**  
**Instituto de Estudos Sócio-Ambientais**  
**Laboratório de Processamento de Imagens e Geoprocessamento**  
UFG - Campus Samambaia (Campus II) - Prédio da Reitoria  
CEP:74001-970 - Caixa Postal: 131 – Goiânia – GO, Brasil  
laerte@iesa.ufg.br

<sup>2</sup>**Secretaria de Indústria e Comércio do Estado de Goiás**  
**Superintendência de Geologia de Mineração**  
**Gerência de Geoinformação**  
Av. Laurício Pedro Rasmussen, nº 2535, Vila Yate  
CEP 74620-030 – Goiânia – GO, Brasil  
levindocm@gmail.com

<sup>3</sup>**Centro Federal de Educação Tecnológica**  
**Coordenação de Geomática**  
Rua 75 - nº 46 - Centro  
CEP 74055-110 – Goiânia – GO, Brasil  
ncferreira@uol.com.br

## **RESUMO**

A oferta de dados altimétricos, particularmente úteis na delimitação de bacias hidrográficas, vem aumentando de forma significativa nos últimos anos. Especificamente, neste trabalho avaliamos o uso de modelos digitais de elevação, derivados dos dados SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*), e de curvas de nível do Mapeamento Sistemático Nacional na escala 1:100.000, produzidos nas décadas de 70 e 80 do século passado através de levantamentos aerofotogramétricos, quanto à delimitação automática de bacias hidrográficas para o Estado de Goiás e Distrito Federal. Conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrica definido nas Normas Técnicas da Cartografia Nacional, o MDE SRTM pode ser classificado como padrão classe A (para escala 1:100.000), enquanto os modelos gerados a partir da base cartográfica por meio dos métodos de interpolação TopoGrid, IDW, TIN/GRID e TIN/GRID<sup>5</sup> foram classificados como padrão classe B. A qualidade dos dados SRTM não apresentou variação significativa em função do tipo de cobertura e uso do solo. Por outro lado, a precisão destes dados é altamente correlacionada à declividade. Comparativamente às Ottobacias delimitadas manualmente para toda a área de estudo, o uso do MDE SRTM também resultou em delimitações mais precisas, ainda que bastante similares àquelas obtidas com o uso do MDE TopoGrid, bem como sujeitas à erros, principalmente em regiões mais planas. Os nossos resultados corroboram o uso de sistemas de informações geográficas para delimitação automática de bacias, em particular a partir de dados SRTM, haja vista a excelente relação custo-benefício e uso de critérios mais objetivos.

**Palavras chaves:** bacias hidrográficas, Modelo Digital de Elevação, SRTM, Mapeamento Sistemático Nacional.

## ABSTRACT

Elevation data, which are particularly useful for watershed delimitation, is becoming increasingly available. Specifically, in this study we evaluated the use of digital elevation models, derived from SRTM data (Shuttle Radar Topographic Mission) and aerial photo based contour lines obtained within the scope of the Brazilian Systematic Mapping (during the 70's and 80's), for the automated delimitation of watersheds for the entire State of Goiás and the Federal District (i.e. Brasília region). According to the Cartographic Accuracy Standard (as defined by the National Cartography Technical Reference), the SRTR derived DEM falls within the class A category (at the 1:100,000 scale), while the other DEMs generated via interpolation (TopoGrid, IDW, TIN/GRID e TIN/GRID<sup>5</sup>) of the contour lines are class B. The quality of the SRTM data, while apparently invariant regarding the dominant land cover type, was highly correlated to the terrain slope. Comparatively to the manually delimited "Ottobacias", the use of the SRTM DEM also yielded more precise delimitations. Nevertheless, these delimitations, quite similar to those based on the TopoGrid DEM, were locally affected by errors, mainly in flatter regions. Our results corroborate the use of geographic information systems for the automated delimitation of watersheds, particularly based on SRTM data, for both the favorable cost-benefit relation, as well as for the more objective criteria involved.

**Keywords:** watersheds, Digital Elevation Model, SRTM, Brazilian Systematic Mapping.

### 1. INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural de disponibilidade limitada, essencial à vida, ao desenvolvimento e ao bem-estar social. Portanto, se faz necessária a observação dos aspectos qualitativos e quantitativos das bacias hidrográficas envolvendo a sustentabilidade do desenvolvimento regional, que deve se pautar pela garantia do equilíbrio entre as ações voltadas para a promoção do crescimento econômico e a conservação do meio ambiente (CARVALHO, 2005).

Ainda que desde o fim dos anos 60 do século XX, a bacia hidrográfica seja reconhecida como unidade espacial na Geografia Física (BOTELHO; SILVA, 2004), somente na última década essa unidade básica de análise passou a ser utilizada na pesquisa e na gestão territorial. Atualmente, vários profissionais se interessam pelo mapeamento de bacias hidrográficas (NEWSON, 1992). A bacia hidrográfica permite conhecer e avaliar seus diversos componentes, os processos e interações que nela ocorrem. A visão sistêmica e integrada do ambiente está implícita na adoção desta unidade fundamental (BOTELHO; SILVA, 2004).

Em fato, o uso da bacia hidrográfica, como unidade de estudo e gestão territorial, para o gerenciamento das diferentes formas de ocupação têm como objetivo planejar, coordenar, executar e manejar as melhores formas de apropriação e exploração dos recursos ambientais (BORDALO, 1995).

Uma bacia hidrográfica pode ser entendida como um conjunto de terras drenadas por um rio principal e seus afluentes. Nas depressões longitudinais se verifica a concentração das águas das chuvas, isto é, do lençol de escoamento superficial, formando o lençol concentrado – os rios. A noção de bacia hidrográfica obriga naturalmente a existência de cabeceiras ou nascentes, divisores d'água, cursos d'água principais, afluentes e subafluentes. Em todas as bacias hidrográficas deve existir uma hierarquização na rede, e

a água escoar dos pontos mais altos para os mais baixos (GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J., 1997).

O Estado de Goiás e Distrito Federal estão integralmente inseridos na área central de distribuição do Cerrado. O Cerrado é um complexo mosaico de formações campestres, savânicas e florestais. Ocupa 23% do território Brasileiro, constituindo-se no maior conjunto de ecossistemas de savana neotropical no mundo, ao longo de 2.036.448 km<sup>2</sup> do Planalto Central Brasileiro (IBGE, 2004). Apesar do pouco tempo de ocupação agropecuária, em torno de 40 anos, a região do Cerrado já contribui com 25% da produção de grãos e 40% do rebanho nacional (CARMO; GAMA, 2002; LIMA; SILVA, 2002).

No bioma Cerrado está situada grande parte das zonas de planalto e várias nascentes de rios. Contudo, e apesar de ter uma boa rede de drenagem, muitos corpos d'água deixam a região ainda sem volume expressivo disponível para utilização. Além disso, o fato de constituir zona de nascentes de seis das oito grandes bacias hidrográficas brasileiras, Bacia Amazônica, Bacia do Tocantins, Bacia Atlântico Norte/Nordeste, Bacia do São Francisco, Bacia do Atlântico Leste e Bacia do Paraná, torna-se indispensável a utilização racional de seus recursos naturais, pois nestas áreas, problemas como assoreamento, contaminação ou super-exploração dos recursos hídricos são realçados em função da baixa capacidade de suporte (LIMA; SILVA, 2002; SANO, S. et al., 2008).

A grande importância do bioma Cerrado e, em particular, do Estado de Goiás e Distrito Federal, em relação aos recursos hídricos do Brasil fazem com que os dados e as informações produzidas para o conhecimento científico e formulação de políticas públicas necessárias para a gestão territorial sejam orientadas às bacias hidrográficas.

Atualmente, com a disseminação de dados digitais e aplicativos de sistema de informações geográficas, técnicas automáticas de delimitação de bacias hidrográficas substituíram as antigas técnicas de delimitação manual. Modelos Digitais de Elevação

(MDE), que podem ser obtidos por meio de vetorização e interpolação de curvas de nível, a partir de uma folha topográfica, e também através de dados aéreos e orbitais, são elementos fundamentais para a delimitação automática de bacias hidrográficas (DIAS et al., 2004; FURNANS, 2001). Ao mesmo tempo, vem ocorrendo um aumento significativo na oferta de dados altimétricos que podem ser utilizados na delimitação de bacias hidrográficas.

Tendo em vista a necessidade de se avaliar tais dados em relação aos custos e benefícios quanto à delimitação automática de bacias hidrográficas, neste trabalho comparamos as bacias hidrográficas geradas a partir do MDE oriundo da missão SRTM (*Shuttle Radar Topographic Mission*) com bacias derivadas de curvas de nível do Mapeamento Sistemático Nacional na escala 1:100.000, produzidos nas décadas de 70 e 80 do século passado através de levantamentos aerofotogramétricos.

## 2. ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo engloba o Estado de Goiás e o Distrito Federal, onde se localizam as nascentes de três grandes bacias hidrográficas nacionais, Bacia do Tocantins (57% da área de estudo), Bacia do Paraná (42% da área) e Bacia do São Francisco (1% da área), com população de aproximadamente sete milhões habitantes (90% residente em área urbana), compreendendo 246 municípios de Goiás, além do Distrito Federal (Figura 1).



Fig. 1 - Mapa de localização do bioma Cerrado, Estado de Goiás, Distrito Federal e bacias hidrográficas.

Fonte: SIEG/IBGE/ANA

Com aproximadamente 347.000 km<sup>2</sup>, a área de estudo apresenta uma diferença de elevação de 1.462 m (cota mínima 188 metros e cota máxima 1.650 metros), compreendendo assim, várias formas de relevo, desde áreas planas com pequena diferença de altitude (regiões oeste e noroeste) às áreas com relevo movimentado,

com grandes diferenças de altitude (região nordeste) (figura 2).

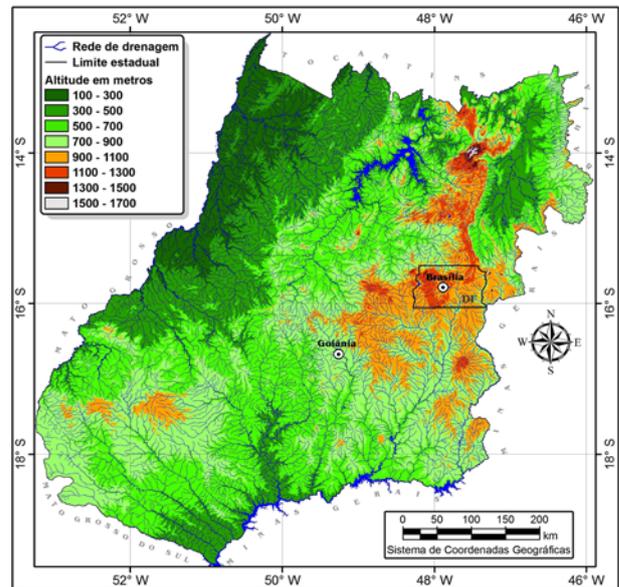


Fig. 2 - Mapa hipsométrico e rede de drenagem para o Estado de Goiás e Distrito Federal.

Fonte: SIEG/EMBRAPA

Outra característica importante da área de estudo é a diversidade do uso do solo, onde 63% da área são utilizados para agricultura, área urbana e pastagem, 36% cobertos por vegetação remanescente (cerrado, floresta e formação pioneira) e 1% por corpos d'água (SANO, E. et al., 2008) (figura 3). Esta diversidade do uso do solo pode interferir de forma significativa na qualidade dos dados originários de equipamentos SAR (*Synthetic Aperture Radar*) interferométrico, como as imagens SRTM.

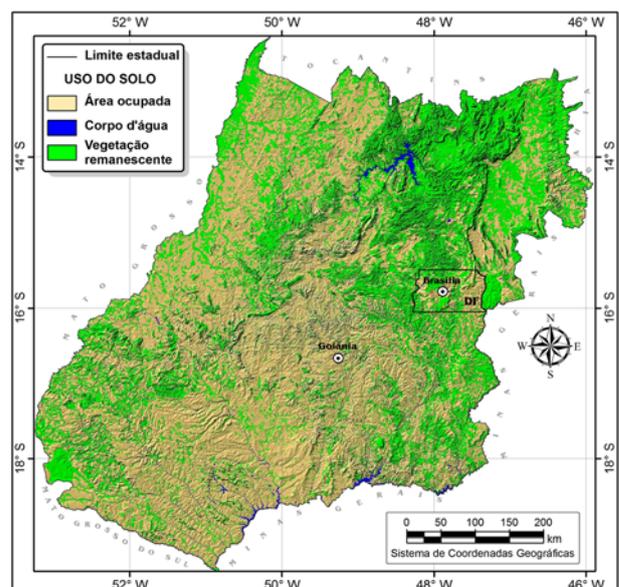


Fig. 3 - Mapa de uso do solo associado à relevo sombreado.

Fonte: SIEG/EMBRAPA

### 3. METODOLOGIA

#### 3.1. BASE DE DADOS

##### 3.1.1. SRTM

Os dados de elevação SRTM são resultado da missão realizada em conjunto pela NASA (*National Aeronautics and Space Administration*) e NIMA (*National Imaging and Mapping Agency*), dos EUA, com participação das agências espaciais DLR (*Deutsche Zentrum für Luft-und Raumfahrt*), da Alemanha, e ASI (*Agenzia Spaziale Italiana*), da Itália. Estes dados foram obtidos em fevereiro de 2000, a partir do ônibus espacial *Endeavour*, que levou em seu compartimento de carga um equipamento SAR interferométrico, operando nas bandas X ( $\lambda = 3,1$  cm) e C ( $\lambda = 5,6$  cm). Ao longo de 11 dias, utilizando a técnica de interferometria de uma passagem, com duas antenas receptoras do SAR presas à uma haste mecânica, foram recobertos 80% da superfície terrestre (entre os paralelos 60° N e 56° S), o que resultou em modelos tridimensionais com amplitude da grade de 30 metros (SRTM 1) e 90 metros (SRTM 3), projetados para uma acurácia vertical e horizontal absoluta de 16 e 20 metros, respectivamente, com 90% de confiança (BERRY, et al., 2007; CHIEN, 2000; LUDWIG; SCHNEIDER, 2006; NIMA, 2004; RABUS et al., 2003).

Os modelos em banda C com resolução espacial de 90 metros (SRTM 3) utilizados neste estudo foram adquiridos gratuitamente, em formato geotiff com unidade de altitude em metros e Sistema de Coordenadas Geográficas (articulação à escala de 1:250.000), *Datum* Horizontal WGS-84 (*World Geodetic System* 1984) e *Datum* Vertical EGM96 (*Earth Gravitational Model* 1996) (CGIAR, 2007; NIMA, 2004), junto ao Centro Nacional de Pesquisa de Monitoramento por Satélite da EMBRAPA, no âmbito da Coleção “Brasil em Relevo” ([www.relevobr.cnpem.embrapa.br](http://www.relevobr.cnpem.embrapa.br)), o qual realizou trabalhos de correção e padronização, eliminando depressões espúrias, picos e pontos anômalos e áreas com ausência de dados (MIRANDA, E., 2005).

##### 3.1.2. Base Cartográfica 1:100.000

Realizado nas décadas de 70 e 80 do século passado pelo IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) e DSG (Diretoria de Serviço Geográfico do Exército Brasileiro), através de levantamentos aerofotogramétricos, o Mapeamento Sistemático Nacional, disponibilizado de forma analógica em diversas escalas, é tido como fonte de informações para o conhecimento do território, possibilitando, entre várias outras aplicações, a identificação, o mapeamento e gerenciamento de bacias hidrográficas.

A Secretaria de Indústria e Comércio (SIC) do Estado de Goiás, por intermédio da Gerência de Geoinformação da Superintendência de Geologia e

Mineração (SGM), realizou a sistematização e revisão topológica, para estruturação em SIG (Sistema de Informações Geográficas), das 151 folhas do Mapeamento Sistemático Nacional na escala 1:100.000 que recobrem todo o Estado de Goiás e Distrito Federal. Os arquivos digitais vetoriais relativos a estas folhas foram adquiridos entre 2004 e 2007, em formato CAD (*Computer Aided Design*) a partir de licitação (82 folhas - custo de R\$ 90.000,00), *download* (47 folhas - IBGE) e cessão (22 folhas - Ministério do Meio Ambiente). Os temas curva de nível, referência de nível e drenagem, resultado do trabalho da SGM e utilizados neste projeto, foram adquiridos gratuitamente em formato digital *shapefile* em Sistema de Coordenadas Geográficas, *Datum* Horizontal SAD-69 (*South American Datum* 1969) e *Datum* Vertical Imbituba - SC.

##### 3.1.3. Uso do Solo

As informações sobre o uso do solo foram obtidas através do portal do Sistema Estadual de Estatística e de Informações Geográficas do Estado de Goiás ([www.sieg.go.gov.br](http://www.sieg.go.gov.br)), em formato digital *shapefile*, em Sistema de Coordenadas Geográficas e *Datum* Horizontal SAD-69. Este mapeamento, à escala de 1:250.000, foi realizado pelo Consórcio WWF Brasil – IMAGEM, no âmbito do projeto “Identificação de Áreas Prioritárias para Conservação da Biodiversidade no Estado de Goiás”, com base na interpretação de imagens LANDSAT 7 ETM+ de 2001/2002, compilação de informações do projeto Radambrasil e reconhecimento de campo (SANO, E. et al., 2008).

##### 3.1.4. Ottobacias

O sistema de codificação de bacias hidrográficas, desenvolvido pelo engenheiro Otto Pfasterer em 1989, no âmbito do extinto Departamento Nacional de Obras de Saneamento (DNOS), conhecido pelo nome de “Ottobacias”, caracteriza-se pela sua racionalidade. Este sistema associa um número de identificação único para cada bacia hidrográfica, as quais são organizadas em uma estrutura hierárquica, baseada na topografia da área drenada. Assim, é possível deduzir, através de uma pequena quantidade de números (código), quais bacias hidrográficas se localizam a jusante e a montante daquela em estudo (GALVÃO; MENESES, 2005).

A compartimentação do Estado de Goiás em bacias hidrográficas, segundo esta metodologia, foi realizada pela SIC/SGM no ano de 2001 utilizando-se cartas topográficas do IBGE na escala 1:250.000 e formato analógico, sobre as quais foram traçadas as linhas dos divisores de água, ligando os pontos mais elevados da região em torno da drenagem considerada. Este conjunto de bacias, está disponível, em formato *shapefile*, através do portal SIEG, em sistema de coordenadas geográficas e *datum* horizontal SAD-69.

### 3.2. ANÁLISE DOS DADOS

A metodologia para análise da delimitação automática de bacias hidrográficas a partir de dados oriundos da missão SRTM banda C e curvas de nível do Mapeamento Sistemático Nacional à escala de 1:100.000, estruturou-se em seis etapas, conforme descritas a seguir e ilustradas na figura 4.

#### 3.2.1. Aquisição e Organização dos Dados

Após adquiridos, os dados foram organizados em ambiente SIG, utilizando-se o programa computacional *ArcGis* 9.2, que dispõe de ferramentas para delimitação automática de bacias hidrográficas, análise e cruzamento de dados altimétricos.

#### 3.2.2. Geração de MDE's a partir das Curvas de Nível

Vários algoritmos de interpolação para geração de MDE, os quais podem ser construídos através de GRID (grades retangulares regulares) ou TIN (redes triangulares irregulares), são disponibilizados em programas computacionais de geoprocessamento, sendo que a escolha do melhor modelo depende diretamente da finalidade de uso, do tipo de terreno que se necessita estimar e da disponibilidade de dados de entrada.

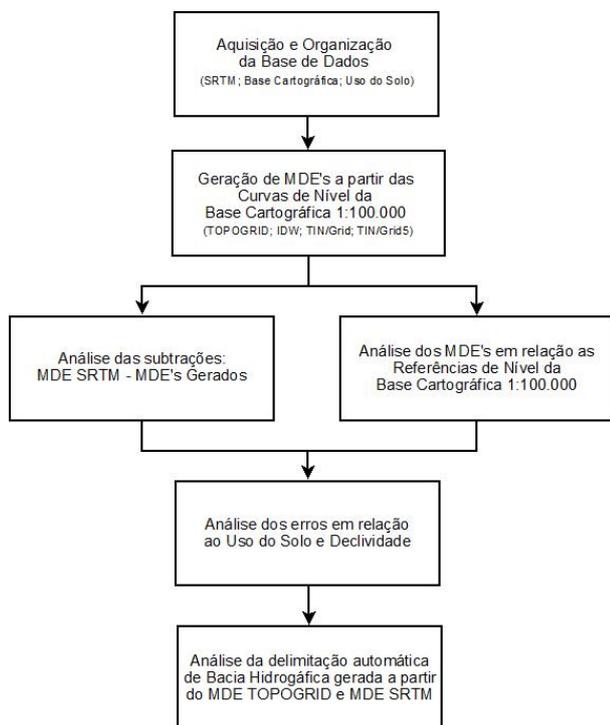


Fig. 4 - Etapas relativas à organização e análise dos dados.

Especificamente, foram utilizados quatro algoritmos de interpolação, mundialmente consagrados, para geração de MDE (células de 90 metros) a partir das curvas de nível da base cartográfica 1:100.000, com

vistas à comparação com o MDE SRTM 3 banda C. Os métodos foram:

- **IDW** (*Inverse Distance Weighted*) - Nesse método de interpolação, o valor do ponto ou célula que se deseja interpolar é calculado através da média ponderada entre os valores dos pontos vizinhos, onde os pontos vizinhos amostrados mais próximos do ponto interpolado recebem um peso maior do que os pontos mais distantes. Vários programas que utilizam a interpolação IDW permitem que o usuário informe parâmetros tais como, número máximo de pontos amostrais vizinhos, raio máximo de busca a pontos amostrais e aumento da potência para elevar o peso da distância (ESRI, 2006; FERREIRA, 2003; MIRANDA, J., 2005).

- **TopoGrid** - Módulo disponibilizado pelo software *ArcInfo Workstation 7.x.*, baseado no programa *ANUDEM* desenvolvido por Hutchinson (1989). Utiliza método de interpolação especificamente projetado para criar um MDE hidrologicamente correto a partir de dados altimétricos representados por pontos, linhas e polígonos. Este método usa a técnica de interpolação de diferença finita, aperfeiçoada para ter a eficácia computacional de um método de interpolação local, como o IDW, sem perder a continuidade da superfície dos métodos de interpolação globais, como *Splines* e *Kriging* (ESRI, 2006; FERNANDES; MENEZES, 2005; SINHA, 2000).

- **TIN/GRID** e **TIN/GRID<sup>5</sup>** - A rede de triângulos irregulares foi projetada por Peucker *et al.* (1978) para a modelagem de elevação digital usando pontos de elevação irregularmente espaçados para formar uma rede de facetas triangulares. Dentre os algoritmos que implementam a abordagem TIN, o mais utilizado é a triangulação de Delaunay. Comparado ao modelo GRID, a geração e manipulação do modelo TIN demanda um esforço computacional bem maior (FERREIRA, 2003; MIRANDA, J., 2005). Para este estudo, com base na rede de triângulos irregulares, foram gerados dois GRID's, utilizando-se um interpolador linear (TIN/GRID) e um interpolador de polinômio bivariado de quinto grau (TIN/GRID<sup>5</sup>).

#### 3.2.3. Delimitação de Bacias Hidrográficas

Vários profissionais que tratam da gestão de recursos hídricos sempre necessitam do mapeamento de bacias hidrográficas (NEWSON, 1992). Antes do desenvolvimento e difusão dos mapas digitais e programas computacionais de Sistemas de Informações Geográficas, a delimitação de bacias hidrográficas era executada a partir de cartas topográficas analógicas, traçando-se, em torno da drenagem considerada e a partir dos pontos mais elevados da região, a linha dos divisores de água.

A precisão do limite de uma bacia está diretamente relacionada à subjetividade do traçado da mesma. Assim sendo, métodos automáticos que adotam critérios bem definidos e passíveis de serem replicados para outras regiões, mantendo um mesmo padrão de

qualidade na geração do limite, podem obter um melhor resultado em relação ao método manual (DIAS et al., 2004).

As operações para geração automática de bacias hidrográficas a partir de MDE com programas computacionais de SIG envolvem os seguintes procedimentos: eliminação de reentrâncias e saliências do MDE (*Fill Sinks*), produção do mapa de direção de fluxo (*Flow Direction*), elaboração do mapa de fluxo acumulado (*Flow Accumulation*), mapeamento da rede de drenagem (*Stream Networks*) e a delimitação da bacia hidrográfica (*Watershed Delineation*).

Em relação ao *Fill Sink*, este se faz necessário, haja vista que áreas com depressões rodeadas por elevações com valores de cotas superiores, em geral, imperfeições dos MDE's, provocam erros no mapeamento do fluxo de escoamento dos modelos (MENDES; CIRILO, 2001).

A segunda etapa consiste no mapeamento da direção de fluxo, que torna explícita a direção do fluxo de água para cada célula da estrutura de um MDE. Baseado no conceito de que há no máximo oito células vizinhas para cada célula dentro do MDE, gera-se um dado em estrutura matricial definindo um valor de direção, para cada célula, que indica a célula vizinha de maior declividade. O cálculo da declividade fundamenta-se no modelo de ponto de vertente com oito direções, o qual utiliza números binários ( $2^x \{0, 1, 2...7\}$ ) para representar a direção do fluxo de água, sendo o cálculo feito para cada célula do MDE, conforme ilustra a figura 5 (DIAS et al., 2004; ESRI, 2006; FURNANS, 2001).

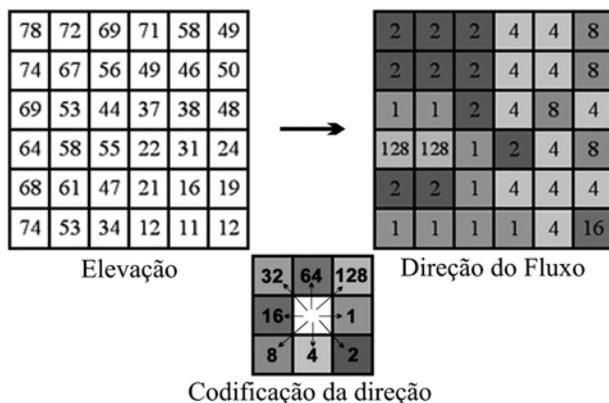


Fig. 5 - Geração do mapa de direção de fluxo utilizando o modelo de ponto de vertente com 8 direções (adaptado ESRI, 2006).

Fica evidente o relacionamento topológico entre as células do MDE quando se utiliza setas, cuja direção é definida pelo modelo de ponto de vertente com 8 direções, para representar a rede de fluxo (figura 6). A rede de fluxo possibilita a determinação da conectividade a montante e a jusante do fluxo.

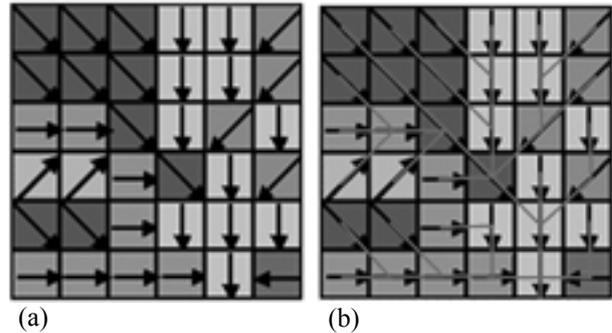


Fig. 6 - Representação física do mapa de direção de fluxo - a) Com setas direcionais; b) Como uma rede de fluxo (adaptado FURNANS, 2001).

O mapa de acumulação de fluxo, criado a partir do mapa de direção de fluxo, armazena o número de células que drenam para cada célula do mapa, sendo então, a medida de quanto a jusante está a célula em relação à nascente de água. É a medida da magnitude relativa de fluxo que pode ser acumulada em cada célula. Células com valores altos são áreas de concentração de fluxo, possibilitando assim identificar os canais de drenagem. Já as regiões de altitudes mais elevadas dentro da bacia hidrográfica são representadas por células com valores zero, as quais definem a borda da bacia (figura 7) (DIAS et al., 2004; ESRI, 2006; FURNANS, 2001).

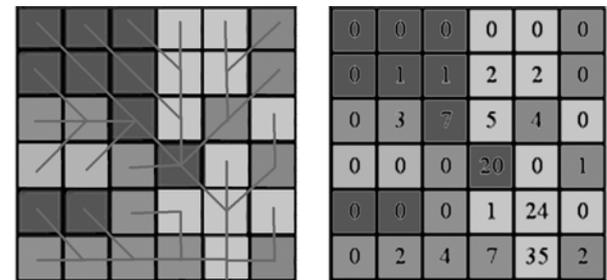


Fig. 7 - Mapa de acumulação de fluxo - os valores representam o número de células que drenam para cada célula do mapa (adaptado ESRI, 2006).

A partir da geração dos mapas de direção e acumulação de fluxo, pode-se então obter a rede de drenagem e o limite da bacia. A rede de drenagem é gerada a partir de um valor de limiar, definido pelo usuário, aplicado ao mapa de acumulação de fluxo. Esse limiar classifica todas as células do mapa de acumulação de fluxo em zero (menor que o limiar) ou um (maior ou igual ao limiar), criando um mapa de rede de drenagem. Por exemplo, especificando um limiar de valor três, todas as células do mapa de acumulação de fluxo com valores maiores ou iguais a três serão consideradas parte da rede de drenagem, conforme se pode observar na figura 8.

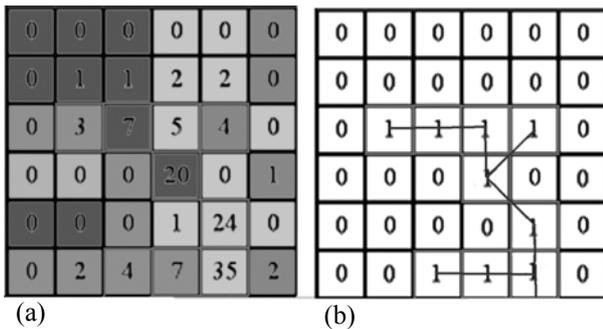


Fig. 8 - Definição da rede de drenagem utilizando o GRID de acumulação de fluxo - a) Com contorno cinza claro, células com valor maior ou igual a 3; b) GRID de rede de drenagem (adaptado FURNANS, 2001).

O valor do limiar define o número de células necessárias para formar um fluxo de drenagem, bem como a área da bacia a ser delimitada. Os MDE's utilizados neste trabalho possuem células de 90 metros, equivalentes à uma área de 8.100 m<sup>2</sup>. Então, se utilizarmos o limiar de valor três, como no exemplo anterior, serão delimitadas bacias com áreas de 24.300 m<sup>2</sup>. Quanto menor o valor desse limiar, maior será o número de bacias hidrográficas geradas.

### 3.2.4. Análise dos Modelos Digitais de Elevação

As análises dos MDE's foram realizadas em ambiente "ArcGIS 9.2" utilizando-se a extensão "Spatial Analyst". Primeiramente, e com vistas à analisar a qualidade altimétrica dos MDE's, foram utilizadas as referências de nível da base cartográfica 1:100.000, que são estações geodésicas altimétricas determinadas através de nivelamentos geométricos de alta precisão. Posteriormente, foram utilizados os mapas resultantes das subtrações entre o MDE SRTM e os MDE's gerados a partir da base cartográfica 1:100.000 para análise de similaridade entre os mesmos.

Foram utilizadas 559 referências de nível para cruzamento com os MDE's, conforme se pode observar na figura 9. Utilizando ferramentas disponíveis em programas SIG, gerou-se uma tabela com as altitudes das referências de nível e as altitudes dos pontos homólogos nos MDE's. A altitude de referência foi subtraída das altitudes dos MDE's, obtendo-se valores positivos nas regiões onde os MDE's subestimam as referências de nível e valores negativos em regiões onde os MDE's superestimam as referências de nível.

De posse dos dados dos cruzamentos, foram realizadas análises estatísticas (regressão linear, média, desvio padrão, coeficiente de variação, valor máximo e mínimo, erro médio quadrático e distribuições de frequências) para se avaliar a precisão de cada MDE com relação às referências de nível. Também foi utilizado o critério do PEC (Padrão de Exatidão Cartográfico), definido nas Normas Técnicas da Cartografia Nacional (Tabela 1) Decreto nº 89.817 de 20 de Julho de 1984 (CONCAR, 1984), para classificar os MDE's quanto à sua exatidão altimétrica.

TABELA 1 - CLASSIFICAÇÃO DE DOCUMENTOS CARTOGRÁFICOS ATRAVÉS DO PEC.

Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrica		
Categoria	Tolerância	EMQ
Classe A	25 m	16,6 m
Classe B	30 m	20 m
Classe C	37,5 m	25 m

Obs: Valores para a escala 1:100.000

Subtrações entre dados matriciais (imagens diferença) são largamente utilizados para visualização da distribuição espacial dos erros. Desta forma, o MDE SRTM foi subtraído dos MDE's gerados a partir dos dados altimétricos da base cartográfica, obtendo-se um novo mapa em estrutura matricial, com valores positivos nas regiões onde os MDE's subestimam o MDE SRTM e valores negativos nas regiões onde os MDE's gerados superestimam o MDE SRTM.

A partir dos mapas resultantes das subtrações, também foram realizadas análises estatísticas (média, desvio padrão, coeficiente de variação, erro médio quadrático e valor máximo e mínimo e distribuições de frequência de erros) para se avaliar a similaridade dos MDE's gerados e o MDE SRTM.

Os dados de uso do solo e declividade foram utilizados para analisar o comportamento dos erros obtidos. Diversos autores (ex., LUDWIG; SCHNEIDER, 2006; RABUS et al., 2003) salientam a dependência da qualidade dos dados da SRTM em relação à topografia e uso do solo, haja vista as características do equipamento SAR interferométrico utilizado na missão SRTM.

Foram definidas três classes para análise da relação do uso do solo na qualidade dos dados SRTM: área ocupada, vegetação remanescente e corpo d'água. Das 559 referências de nível utilizadas neste trabalho, 466 se localizam em áreas ocupadas, 91 estão em áreas com vegetação remanescente e duas são localizadas em corpos d'água e, portanto, descartadas da análise. O mapa resultante da subtração entre o MDE SRTM e MDE TopoGrid foi selecionado para análise da relação do uso do solo na qualidade dos dados da SRTM, devido a maior similaridade entre eles.

A partir do MDE SRTM, gerou-se o mapa de declividade utilizado para analisar a influência das inclinações do terreno na qualidade dos dados SRTM. Conforme o Sistema Brasileiro de Solos, foram definidas seis classes de relevo: plano (0% a 3% de declividade); suave ondulado (3% a 8%); ondulado (8% a 20%); forte ondulado (20% a 45%); montanhoso (45% a 75%) e escarpado (> 75%) (figura 9).

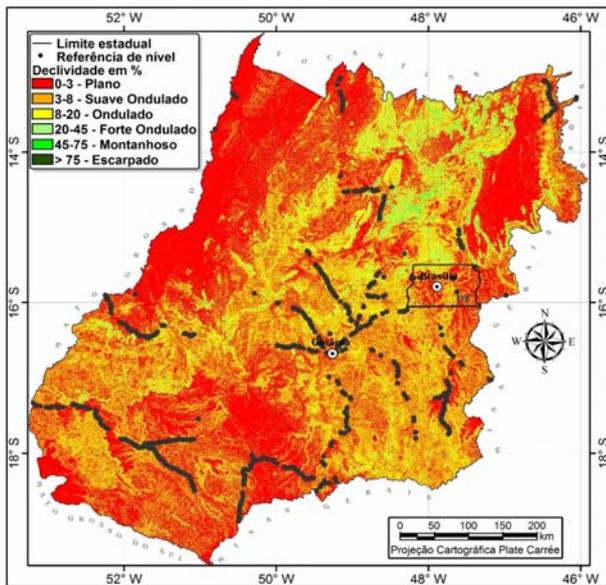


Fig. 9 - Mapa de declividade SRTM com referências de nível da base cartográfica IBGE.

Fonte: SIEG/EMBRAPA

Devido quase 100% das referências de nível estarem localizadas em regiões de classe plano e suave ondulado, somente utilizou-se o mapa resultante da subtração entre o MDE SRTM e MDE TopoGrid para análise da influência da topografia na precisão do dado SRTM, utilizando os mesmos métodos de análise das etapas anteriores. A porcentagem de cada classe para a área de estudo é de 32,9% plano, 40% suave ondulado, 20% ondulado, 6% forte ondulado, 1% montanhoso e 0,1% escarpado.

### 3.2.5. Análise da Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas

Foi utilizada a extensão “*Watershed Delineation Tools*” (*Arcgis 9.2*) para geração automática dos limites das bacias hidrográficas do Estado de Goiás e Distrito Federal a partir dos modelos digitais de elevação SRTM e TopoGrid. Com a aplicação de um limiar de 1.235 pixels, foi possível delinear bacias hidrográficas com áreas de aproximadamente 1.000 ha.

Após esta delimitação, foi executada uma padronização das áreas das bacias hidrográficas geradas automaticamente, conforme as áreas das Ottobacias (figura 10), com vistas à possibilitar a comparação entre a delimitação gerada automaticamente a partir dos modelos e os limites das Ottobacias delimitadas manualmente pela SGM/SIC com base nas cartas topográficas à escala de 1:250.000 elaboradas pelo IBGE.

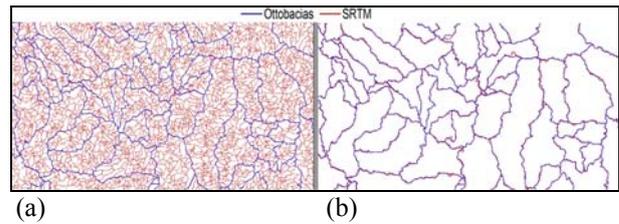


Fig. 10 - Padronização das áreas das bacias hidrográficas geradas automaticamente com as áreas das Ottobacias geradas manualmente - a) limites das bacias geradas a partir do MDE SRTM sobrepostos pelos limites das Ottobacias; b) limites das bacias geradas a partir do MDE SRTM padronizadas pelos limites das Ottobacias.

Foram utilizadas técnicas de análise espacial para comparar a porcentagem de limites coincidentes entre as delimitações geradas automaticamente e as geradas manualmente. Executada a padronização, foram criadas cinco zonas de influência (*buffers*), i.e. 100 metros, 200 metros, 300 metros, 400 metros e 500 metros.

As zonas de influência foram utilizadas para recortar os limites das Ottobacias, sendo então medida a porcentagem de limites das Ottobacias dentro de cada zona de influência. Os limites do Estado de Goiás e Distrito Federal não foram considerados na análise, tendo sido utilizados somente os limites das bacias hidrográficas (figura 11).

A porcentagem de limites das Ottobacias dentro da zona de influência de 500 metros das bacias hidrográficas geradas automaticamente também foi quantificada em relação à compartimentação do relevo.

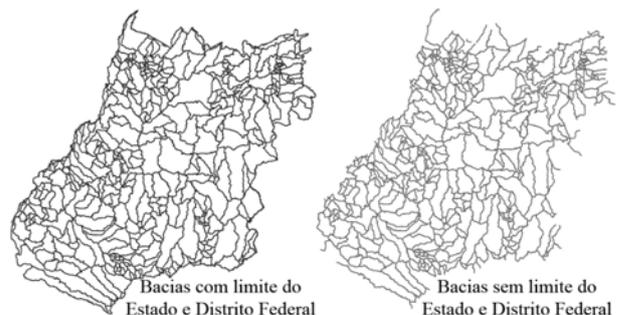


Fig. 11 - Limites das bacias utilizados na análise. Os limites do Estado de Goiás e Distrito Federal não foram considerados na análise.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os MDE's gerados a partir da base cartográfica 1:100.000 por meio dos métodos de interpolação TopoGrid, IDW, TIN/GRID e TIN/GRID<sup>5</sup>, apresentaram grande similaridade em relação ao MDE produzido a partir dos dados SRTM, conforme se pode observar na tabela 2.

TABELA 2 - DADOS ESTATÍSTICOS DOS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO UTILIZADOS (metros).

	SRTM	IDW	TIN/GRID	TIN/GRID <sup>5</sup>	Topo Grid
Média	636,40	632,9	633,4	633,22	629,97
Desvio Padrão	225,43	222,7	222,5	223,61	224,65
Coefficiente de Variação	0,35	0,35	0,35	0,35	0,36
Valor Máximo	1670	1680	1676	1680	1695
Valor Mínimo	178	200	208	156	192

Em relação às 559 referências de nível, e comparativamente aos MDE's obtidos a partir de interpolação de curvas de nível na escala 1:100.000, o MDE SRTM apresentou uma menor diferença (tabela 3).

TABELA 3 - ANÁLISE DAS DIFERENÇAS ENTRE AS REFERÊNCIAS DE NÍVEL E OS MODELOS DIGITAIS DE ELEVAÇÃO (metros).

	SRTM	Topo Grid	TIN/GRID	TIN/GRID <sup>5</sup>	IDW
Média	-3	8	7	6	7
Desvio Padrão	10	13	17	17	17
Coefficiente de Variação	-3,33	1,63	2,43	2,83	2,43
Valor Máximo	53	58	81	96	50
Valor Mínimo	-63	-44	-44	-51	-47
EMQ	11	15	18	18	18

Conforme a distribuição de frequência dos erros, calculados a partir das subtrações entre as referências de nível e os modelos digitais de elevação, é possível notar que a menor dispersão dos erros (em torno da média de -3 metros), ocorre entre as referências de nível e o modelo digital de elevação SRTM, enquanto que o MDE TopoGrid mostra a segunda menor dispersão (figura 12).

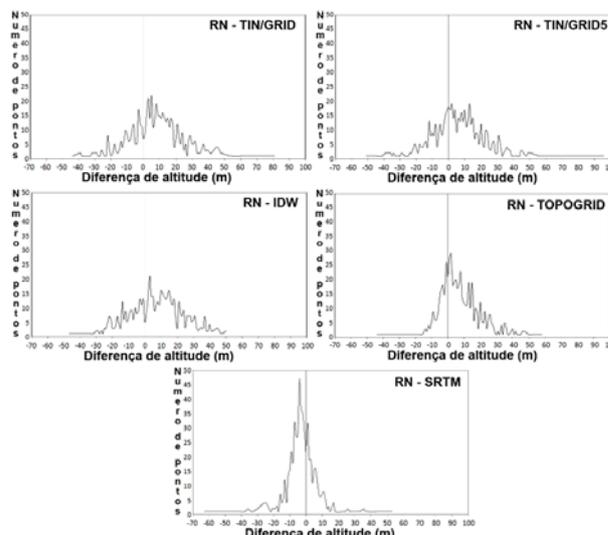


Fig. 12 - Distribuições de frequências mostrando as diferenças de altitude entre as referências de nível e os modelos digitais de elevação.

As análises por regressões lineares confirmam o excelente ajuste entre os modelos digitais de elevação utilizados e as 559 referências de nível existentes na área de estudo (figura 13). Os valores de  $r^2$  acima de 0,99 indicam que quase 100% das células dos modelos digitais de elevação, que geograficamente coincidem com as referências de nível, possuem grandezas compatíveis com aquelas das referências de nível, além de resíduos de baixa magnitude. É importante observar que a regressão linear entre o modelo digital de elevação SRTM e o conjunto de referências de nível foi o que apresentou melhor ajuste.

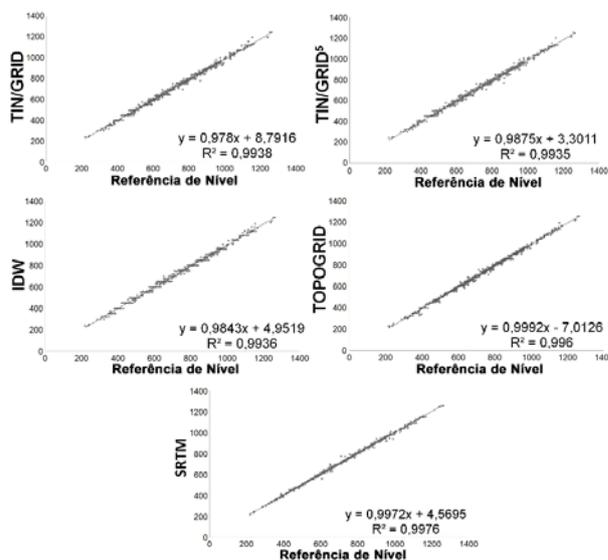


Fig. 13 - Resultados das regressões lineares entre as referências de nível (x) e os modelos digitais de elevação (y).

Considerando as normas da cartografia nacional, somente o modelo digital de elevação da SRTM atingiu a classe A, i.e. em relação aos 559 pontos de referência de nível, 90% dos valores altimétricos

apresentaram incertezas menores que 25 metros e erro médio quadrático inferior a 16,6 metros. No entanto, é importante ressaltar que os outros modelos digitais de elevação chegaram muito próximos da classe A, em particular, o modelo digital de elevação interpolado com a utilização do algoritmo TopoGrid, único com erro médio quadrático inferior a 16,6 metros (tabela 3), e TIN (polinômio de quinto grau) (figura 14).

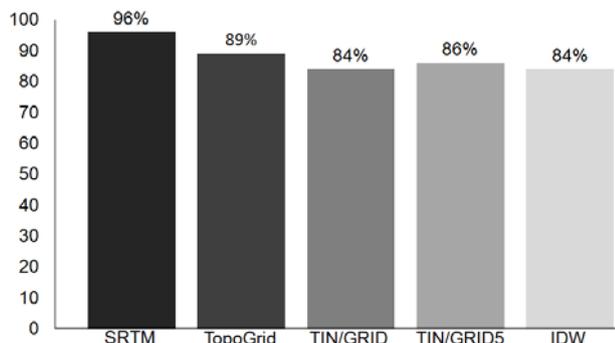


Fig. 14- Porcentagem de referências de nível com diferença de altitude entre 0 e 25 metros (em relação aos respectivos MDE's).

Em todos os resultados dos procedimentos de avaliação anteriormente descritos, o modelo digital de elevação produzido a partir de dados SRTM foi o que mais se ajustou aos 559 pontos de referência de nível distribuídos pela área de estudo. Assim, o MDE SRTM foi tomado como referência para a comparação com todos os outros MDE's obtidos por processos de interpolação distintos. Como se pode observar na tabela 4, o MDE produzido com o interpolador TopoGrid, ainda que tenha a maior média nas diferenças entre os MDE's, apresentou menores valores para desvio-padrão e erro médio quadrático, o que sugere um deslocamento constante entre os MDE's SRTM e TopoGrid. Contudo, as diferenças de nível entre estes dois MDE's são bastante equivalentes.

TABELA 4 - ANÁLISE DAS DIFERENÇAS ENTRE O MDE SRTM E OS MDE'S GERADOS (METROS).

	SRTM - IDW	SRTM - TIN/GRID	SRTM - TIN/GRID <sup>5</sup>	SRTM - TopoGrid
Média	3,49	2,91	3,16	6,43
Desvio Padrão	21,25	21,21	21,6	18,85
Coefficiente de Variação	6,09	7,29	6,84	2,93
Valor Máximo	290	304	320	405
Valor Mínimo	-270	-294	-305	-320
EMQ	22	21	22	20

As distribuições das diferenças de altitude entre os MDE's são apresentadas na figura 15, onde é

possível notar que as diferenças entre os MDE's SRTM e TopoGrid apresentam as menores dispersão.

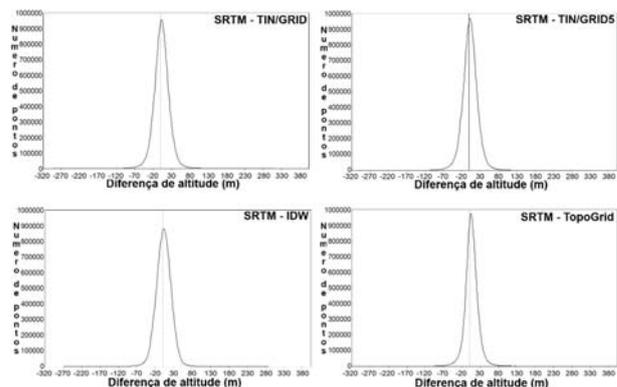


Fig. 15 - Distribuições de freqüências em relação às diferenças de altitude entre o MDE SRTM e os MDE's gerados a partir da interpolação de curvas de nível.

A análise das diferenças entre as 559 referências de nível e o MDE SRTM com relação ao uso do solo, onde 466 referências se localizam em áreas ocupadas e 91 referências em áreas com vegetação remanescente, mostrou não haver uma interferência significativa do tipo de uso do solo na qualidade do MDE SRTM (tabela 5), onde a média, desvio padrão e o erro médio quadrático apresentados são praticamente iguais para as duas classes de uso de solo definidas.

TABELA 5 - ANÁLISE DAS DIFERENÇAS ENTRE AS REFERÊNCIAS DE NÍVEL E O MDE SRTM COM RELAÇÃO AO USO DO SOLO.

	Área Ocupada	Vegetação Remanescente
Média	-3 m	-2 m
Desvio Padrão	10 m	9 m
Coefficiente de Variação	-3,33 m	-4,50 m
Valor Máximo	53 m	32 m
Valor Mínimo	-63 m	-45 m
EMQ	11 m	10 m

A baixa correlação entre o tipo de uso do solo e a qualidade dos dados SRTM também pode ser observada através das respectivas distribuições de freqüências (figura 16) dos erros calculados a partir da subtração entre as referências de nível e o modelo digital de elevação SRTM.

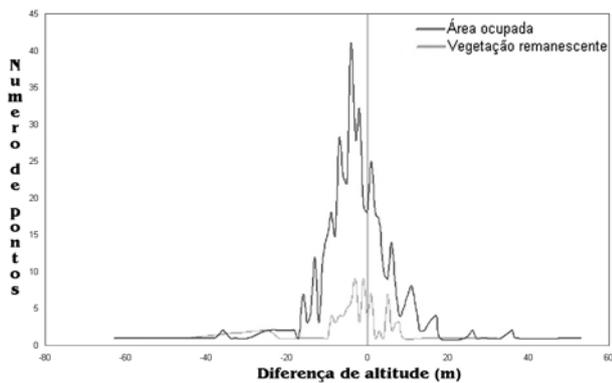


Fig. 16 - Distribuições de frequências mostrando as diferenças de altitude entre as referências de nível e o MDE SRTM com relação ao uso do solo.

É interessante observar que a estrutura matricial, gerada a partir da subtração entre os MDE's SRTM e TopoGrid, também não apresenta correlação significativa com as classes de uso do solo (tabela 6 e figura 17).

TABELA 6 - ANÁLISE DAS DIFERENÇAS ENTRE O MDE SRTM E O MDE TOPOGRID COM RELAÇÃO AO USO DO SOLO.

	Área ocupada	Vegetação remanescente
Média	6,31 m	6,18 m
Desvio Padrão	16,56 m	21,73 m
Coefficiente de Variação	2,62 m	3,52 m
Valor Máximo	367 m	405 m
Valor Mínimo	-283 m	-320 m
EMQ	14 m	13 m

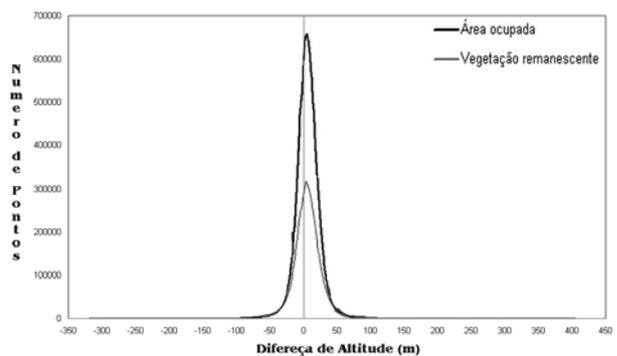


Fig. 17 - Distribuições de frequências mostrando as diferenças de altitude entre o MDE SRTM e o MDE TopoGrid com relação ao uso do solo.

De acordo com as características do equipamento SAR interferométrico utilizado na missão SRTM, a topografia local é considerada um fator primário para determinar o ângulo de incidência local do sinal do radar, influenciando assim na qualidade do dado gerado. Conforme os dados mostrados na tabela 7, pode-se observar um aumento progressivo nos valores de desvio padrão e erro médio quadrático em função do aumento na declividade, o que confirma a dependência da qualidade dos dados SRTM em relação à topografia.

Através da distribuição dos erros calculados a partir da diferença entre o MDE SRTM e o MDE TopoGrid para cada classe de relevo, é possível notar a alta correlação entre o aumento da dispersão dos erros e a declividade do terreno, onde quanto maior a declividade, maior a dispersão (figura 18). Para a classe de menor declividade, o erro médio quadrático foi de 17 metros, enquanto que para a classe de maior declividade, o erro médio quadrático foi de 69 metros.

TABELA 7 - ANÁLISE DAS DIFERENÇAS ENTRE O MDE SRTM E O MDE TOPOGRID COM RELAÇÃO À DECLIVIDADE.

	0% - 3%	3% - 8%	8% - 20%	20% - 45%	45% - 75%	> 75%
Média	6,70 m	5,97 m	6,46 m	7,11 m	5,78 m	0,01 m
Desvio Padrão	15,99 m	16,65 m	21,99 m	33,71 m	51,27 m	68,75 m
Coefficiente de Variação	2,39 m	2,79 m	3,40 m	4,74 m	8,87 m	6875 m
Valor Máximo	367 m	405 m	405 m	318 m	289 m	271 m
Valor Mínimo	-215 m	-252 m	-283 m	-320 m	-285 m	318 m
EMQ	17 m	18 m	23 m	34 m	52 m	69 m

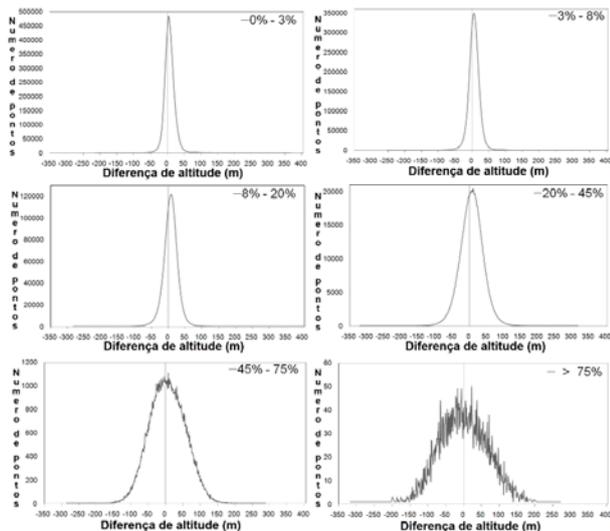


Fig. 18 - Distribuições de frequência mostrando as diferenças de altitude entre o MDE SRTM e o MDE TopoGrid com relação à declividade.

As delimitações automáticas geradas a partir dos modelos digitais de elevação SRTM e TopoGrid, apresentaram boa simetria em relação à delimitação gerada manualmente pela SGM/SIC, tendo o MDE SRTM um melhor desempenho em três das cinco zonas de influência utilizadas, conforme se pode observar na tabela 8.

TABELA 8 - PORCENTAGEM DE LIMITES DE OTTOBACIAS DENTRO DE CADA ZONA DE INFLUÊNCIA DOS LIMITES GERADOS A PARTIR DOS MDE'S.

MDE	100 m	200 m	300 m	400 m	500 m
SRTM	31%	52%	67%	76%	83%
TopoGrid	32%	53%	66%	75%	80%

Em fato, os valores apresentados na tabela 8 podem ser considerados satisfatórios, haja vista que 2 milímetros na carta topográfica na escala de 1:250.000 (equivalente a 500 metros no terreno) é um erro possível de ocorrer na delimitação manual, devido a falta de informação de altitude entre as curvas de nível, o que aumenta a subjetividade no traçado do limite da bacia hidrográfica (figura 19a).

Essa simetria entre os limites também pode ser constatada na tabela 9, onde são apresentados, para cada classe de relevo, os valores da porcentagem de limites de Ottobacias dentro da zona de influência de 500 metros dos limites gerados a partir dos MDE's. É possível notar menor simetria entre os limites das

Ottobacias e os limites gerados a partir dos MDE's SRTM e TopoGrid em regiões mais planas.

TABELA 9 - PORCENTAGEM DE LIMITES DE OTTOBACIAS DENTRO DA ZONA DE INFLUÊNCIA DE 500 METROS DOS LIMITES GERADOS A PARTIR DOS MDE'S PARA CADA CLASSE DE RELEVO.

Declividade	SRTM - <i>buffer</i> 500 m	TopoGrid - <i>buffer</i> 500 m
0% - 3%	80%	76%
3% - 8%	83%	84%
8% - 20%	87%	87%
20% - 45%	90%	88%
45% - 75%	92%	87%
> 75%	87%	81%

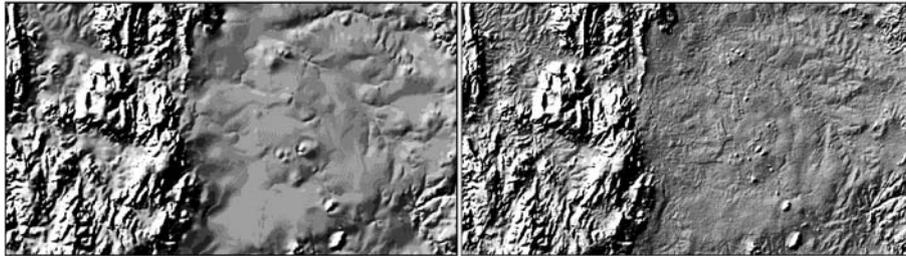
Devido à característica do equipamento SAR interferométrico utilizado na missão SRTM, que obtém informações altimétricas de forma contínua da superfície, o MDE SRTM possui maior amostragem de informação altimétrica do que as cartas topográficas, onde o relevo é representado somente por curvas de nível e pontos altimétricos. Os relevos sombreados gerados a partir dos modelos digitais de elevação TopoGrid e SRTM (figuras 19b e 19c respectivamente) possibilitam a visualização dessa falta de informação altimétrica entre as curvas de nível, sendo possível observar maior detalhamento das feições dos elementos que compõem a paisagem no relevo sombreado gerado a partir do MDE SRTM, o que favorece a obtenção de limites de bacias hidrográficas mais coincidentes com a realidade.

Apesar dos valores obtidos nas análises estatísticas efetuadas demonstrarem boa simetria entre as delimitações das bacias hidrográficas geradas automaticamente e manualmente, foi observado alguns erros nas delimitações geradas automaticamente (figura 20), o que torna necessária a execução de correções, principalmente em regiões com pouca declividade, como a região da planície do Araguaia (figura 20a) e em regiões com presença de grandes corpos d'água, como na região do reservatório de Serra da Mesa (figura 20b). Por outro lado, a figura 20c demonstra uma região com boa simetria entre os limites das bacias hidrográficas.

No âmbito da inspeção visual realizada, foi possível observar uma maior quantidade de limites errôneos na delimitação gerada a partir do MDE TopoGrid em relação à delimitação gerada a partir do MDE SRTM.



(a) equidistância das curvas de nível de 40 metros.



(b) elevação solar 45° e azimute solar 315°. (c) elevação solar 45° e azimute solar 315°.

Fig. 19 - Vão do Paranã região nordeste do Estado de Goiás - a) curvas de nível da base cartográfica 1:100.000; b) relevo sombreado gerado a partir do MDE TopoGrid; c) relevo sombreado gerado a partir do MDE SRTM.

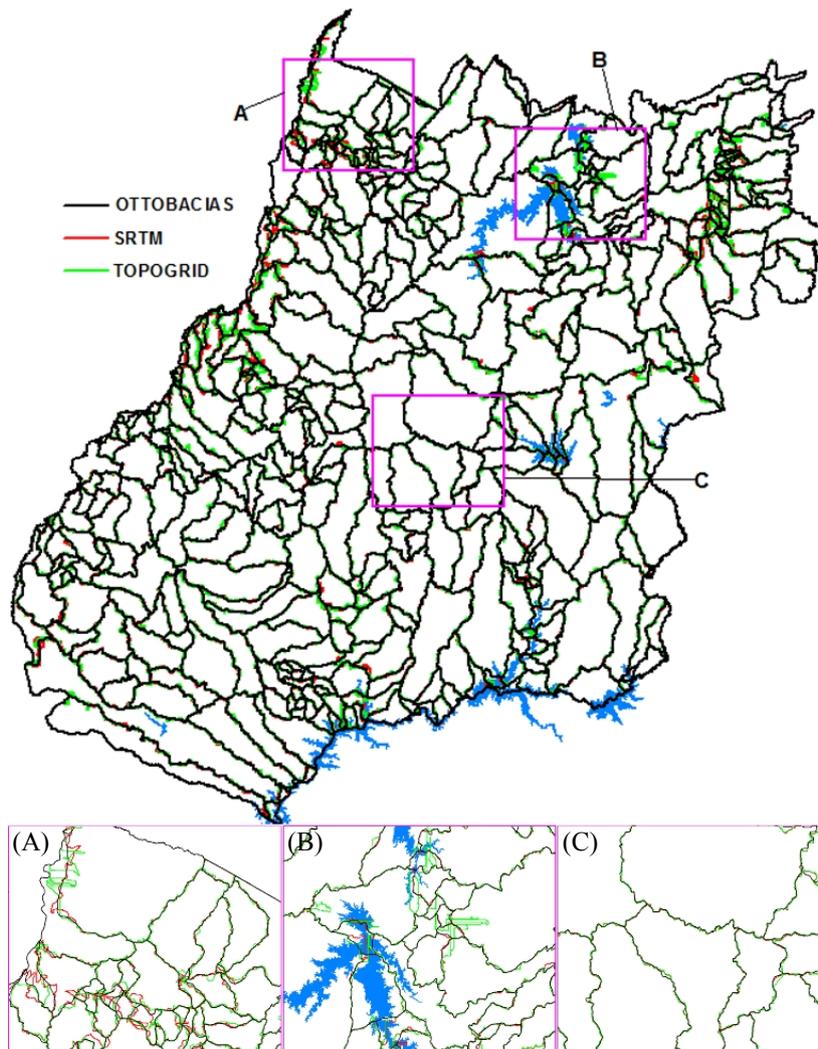


Fig. 20 - Limites das bacias hidrográficas do Estado de Goiás e Distrito Federal gerados automaticamente a partir dos modelos SRTM e TopoGrid sobrepostos aos limites das Ottobacias geradas manualmente - A) região com baixa declividade; B) região com presença de grandes corpos d'água; C) região com boa simetria dos limites das bacias hidrográficas.

## 5. CONCLUSÕES

Os resultados obtidos demonstram que o MDE SRTM, além da facilidade de aquisição e manipulação dos dados, apresenta melhores resultados altimétricos, comparativamente aos MDE's gerados a partir da base cartográfica na escala 1:100.000, podendo ser considerado uma excelente fonte de informação altimétrica para o Estado de Goiás e Distrito Federal. Em fato, e conforme o Padrão de Exatidão Cartográfica - Altimétrica definido nas Normas Técnicas da Cartografia Nacional, o MDE SRTM pode ser classificado como padrão classe A (para escala 1:100.000).

Em relação aos modelos gerados a partir da base cartográfica por meio dos métodos de interpolação TopoGrid, IDW, TIN/GRID e TIN/GRID<sup>5</sup>, estes foram classificados como padrão classe B (escala 1:100.000) segundo o PEC - Altimétrico. O método de interpolação TopoGrid obteve o melhor desempenho entre os métodos de interpolação utilizados, sendo o único MDE gerado a partir da base cartográfica com erro médio quadrático inferior a 16,6 metros quando comparado com as referências de nível.

A qualidade dos dados SRTM não apresentou variação significativa em função do tipo de cobertura e uso do solo. Por outro lado, a precisão destes dados é altamente correlacionada à declividade, onde quanto maior a declividade, menor a precisão.

Apesar de ser necessária a execução de correções nas delimitações geradas automaticamente pela extensão "Watershed Delineation Tools" (ArcGIS 9.2) a partir do MDE SRTM, devido a ocorrência de erros, principalmente em regiões com pouca declividade ou com presença de grandes corpos d'água, a delimitação gerada demonstrou uma boa simetria em relação aos limites das Ottobacias delimitadas manualmente. Comparativamente à delimitação gerada a partir do MDE TopoGrid, o uso do MDE SRTM resultou em uma delimitação mais precisa dos limites, ainda que em termos gerais, os resultados tenham sido bastante similares.

As regiões com baixa declividade resultaram em menor simetria entre os limites gerados e os limites das Ottobacias. Enquanto 80% dos limites das Ottobacias estão a uma distância de 500 metros dos limites gerados a partir do MDE SRTM na classe de relevo plano, na classe de relevo montanhoso, esta "coincidência" chega a 92% dos limites.

Considerando os resultados obtidos, pode-se afirmar que a utilização de programa computacional de SIG para geração automática de bacias hidrográficas a partir dos dados SRTM apresenta uma excelente relação custo-benefício, pois, ao mesmo tempo que proporciona uma economia de tempo e recursos financeiros, automatizando processos mecânicos, diminui a subjetividade da delimitação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERRY, P.A.M.; GARLICK, J.D.; SMITH, R.G. Near-global validation of the SRTM DEM using satellite radar altimetry. *Remote Sensing of Environment*, v.106, p.17-27, 2007.

BORDALO, C. A. L. *Gestão Ambiental em Bacias Hidrográficas: Gestão Ambiental da Microbacia do Igarapé Murutucum-PA.1995. 178 f. Monografia (Especialização em Gestão Ambiental) - NUMA/UFPA. Belém, 1995.*

BOTELHO, R. G. M.; SILVA, A. S. Bacia Hidrográfica e Qualidade Ambiental. In: VITTE, A. C.; GUERRA, A. J. T. (orgs.). *Reflexões sobre a Geografia Física no Brasil*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 2004, p.153-192.

CARMO, R. L.; GAMA, I. População e Recursos Hídricos no Centro-Oeste: Disponibilidade, Demandas e Conflitos. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS O CENTRO-OESTE, 2, 2002. Campo Grande (MS). Anais... Campo Grande (MS), 2002. 1CD.

CARVALHO, P. R. S. Expansão urbana na bacia do Ribeirão Mestre d'Armas (DF) e a qualidade da água. *Estudos Geográficos*, Rio Claro (SP), v. 3, n. 1, p. 71-91, 2005.

CGIAR - Consultative Group on International Agricultural Research. *SRTM Data Processing Methodology*. Disponível em: <<http://srtm.csi.cgiar.org/SRTMdataProcessingMethodology.asp>>. Acesso em: 26 fev. 2007.

CHIEN, P. Endeavour maps the world in three dimensions. *Geoworld*, n.37, p.32-38, 2000.

CONCAR - Comissão Nacional de Cartografia. Decreto nº89.817 de 20 de Julho de 1984. Disponível em: <<http://www.concar.ibge.gov.br/>>. Acesso em: 24 fev. 2007.

DIAS, L. S. O., ROCHA, G. A., BARROS, E. U. A., MAIA, P. H. P. Utilização do Radar Interferométrico para Delimitação Automática de Bacias Hidrográficas. In: *Bahia Análise & Dados*. Salvador, v.14, n.2, p.265-271, set. 2004.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. *ArcGIS Desktop help*. Redlands, 2006.

FERNANDES, M. C.; MENEZES, P. M. L. Comparação entre Métodos para Geração de MDE para a Obtenção de Observações em Superfície Real no Maciço da Tijuca - Rj. *Revista Brasileira de Cartografia*, n.57/02, p.154-161, 2005.

- FERREIRA, N. C. *Princípios para elaboração de MDT*. Goiânia, 2003. (Nota de aula).
- FURNANS, J. E. *Topologic Navigation and the Pfafstetter System*. 2001. 214f. Dissertação (Mestrado em Ciência da Engenharia) - The University of Texas, Austin, 2001.
- GALVÃO, W. S.; MENESES, P. R. *Avaliação dos sistemas de classificação e codificação das bacias hidrográficas brasileiras para fins de planejamento de redes hidrométricas*. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE SENSORIAMENTO REMOTO, 12; 2005, Goiânia (GO). Anais... Goiânia (GO), 2005. p. 2511-2518.
- GUERRA, A. T.; GUERRA, A. J. T. *Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico*. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. 648 p.
- HUTCHINSON, M. F. A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits. *Journal of Hydrology*, n.106, p.211-232, 1989.
- IBGE - Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Mapa de Biomas do Brasil*. Escala 1:5.000.000, 2004. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/biomas2/viewer.htm>>. Acesso em: 25 ago. 2006.
- LIMA, J. E. F. W.; SILVA, E. M. Contribuição Hídrica do Cerrado para as Grandes Bacias Hidrográficas Brasileiras. In: SIMPÓSIO DE RECURSOS HÍDRICOS O CENTRO-OESTE, 2; 2002. Campo Grande (MS). Anais... Campo Grande (MS), 2002. 1CD.
- LUDWIG, R.; SCHNEIDER, P. Validation of digital elevation models from SRTM X-SAR for applications in hydrologic modeling. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v.60, p. 339-358, 2006.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. *Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação*. Porto Alegre: Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 2001, 536 p.
- MIRANDA, E. E. de (Coord.). *Brasil em Relevo*. Campinas: Embrapa Monitoramento por Satélite, 2005. Disponível em: <<http://www.relevobr.cnpm.embrapa.br>>. Acesso em: 22 Jul. 2007.
- MIRANDA, J. I. *Fundamentos de Sistemas de Informação Geográficas*. Brasília, DF: Embrapa Informação Tecnológica, 2005. 425p.
- NEWSON, M. *Land, Water, and Development: Sustainable Management of River Basin Systems*. London: Routledge, 1992. 351p.
- NIMA - National Imaging and Mapping Agency . Information about WGS84 and EGM96, 2004. Disponível em: <<http://www.nima.mil/>>. Acesso em: 04 ago. 2007.
- PEUCKER, T. K. et al. The triangulated irregular network. In: *AMERICAN SOCIETY OF PHOTOGRAMMETRY DIGITAL TERRAIN MODELS SYMPOSIUM*, 1978, St. Louis. Proceedings. St. Louis: American Society of Photogrammetry, 1978. p.516-540.
- RABUS, B.; EINEDER, M.; ROTH, A.; BAMLER, R. The Shuttle Radar Topography Mission - a new class of digital elevation models acquired by spaceborne radar. *ISPRS Journal of Photogrammetry & Remote Sensing*, v.57, p.241-262, 2003.
- SANO, E. E.; DAMBRÓS, L. A.; OLIVEIRA, G. C.; BRITES, R. S. Padrões de cobertura de solos do estado de Goiás. In: FERREIRA, L. G. (Org.). *A encruzilhada socioambiental - biodiversidade, economia e sustentabilidade no cerrado*. Goiânia: Ed. UFG, 2008. p.91-106.
- SANO, S. M.; ALMEIDA, S. P.; RIBEIRO, J. F. *CERRADO: Ecologia e Flora*. Brasília: Ed. Embrapa Informação Tecnológica, 2008. v.1, 406p.; il.
- SINHA, J. *Creating DEMs using TopoGrid*. 2000. Disponível em: <[http://www.geog.ubc.ca/courses/geog570/talks\\_2000/topogrid.html](http://www.geog.ubc.ca/courses/geog570/talks_2000/topogrid.html)>. Acesso em: 12 mar. 2007.