

## Delimitação de ottobacias a partir de modelo digital de elevação hidrologicamente consistente para a bacia do Verde Grande

Felipe Lima Ramos Barbosa<sup>1,2</sup>  
Marco Antônio Silva<sup>2</sup>  
Alexandre de Amorim Teixeira<sup>2</sup>  
Alexandre do Prado<sup>2</sup>  
Morris Scherer-Warren<sup>2</sup>  
Regiane Maria Paes Ribeiro<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Universidade de Brasília – UnB  
Campus Universitário Darcy Ribeiro  
CEP - 70910-900 – Brasília – DF, Brasil  
felipelrb@gmail.com

<sup>2</sup> Agência Nacional de Águas - ANA  
Setor Policial Sul, Área 5, quadra 3, Bloco B e L  
CEP - 70610-200 - Brasília - DF, Brasil  
{marcosilva, alexandre.amorim, aleprado, morris, regiane}@ana.gov.br

**Abstract.** This article provides a methodology to construct and assess a digital elevation model hydrologic consist to catch watershed from the vector of hydrograph in scale 1:1.000.000 to management of water resources. The objective of this work is to aid the Brazil National Water Agency's efforts in water resources' maintenance and preservation.

**Palavras-chave:** hidrology, remote sensing, consistent hydrologic digital elevation model, hidrologia, sensoriamento remoto, modelagem de terreno hidrologicamente consistente.

### 1. Introdução

O Sistema Nacional de Informações sobre Recursos Hídricos (SNIRH), instrumento de ação presente na Política Nacional dos Recursos Hídricos - PNRH (Lei Federal nº 9433/97), é uma importante ferramenta de gestão das bacias hidrográficas brasileiras. Esse é composto por diversos módulos em sua estruturação, sendo que o que integra todos é o modulo referente aos dados espaciais.

Dentro do módulo espacial existe um conjunto de ferramentas para a construção de uma base de dados específica para a gestão de recursos hídricos, conhecida como base hidrorreferenciada. O conjunto de procedimentos para a construção desta base é conhecido como hidrorreferenciamento, no qual engloba o tratamento topológico da rede hidrográfica, a codificação de Otto Pfafstetter (Pfafstetter, 1989), a associação e extração de informações geográfica a jusante e a montante de cada trecho da rede.

Para a codificação de Otto Pfafstetter é necessária à delimitação das *ottobacias*, sendo essas as áreas de contribuição de cada trecho de curso d'água<sup>1</sup>. Atualmente, a delimitação dessas áreas é realizada por *equidistância*, procedimento na qual o divisor d'água se encontra na distância média entre os trechos da rede hidrográfica, não considerando a geomorfologia da região (curvas de nível e pontos cotados). Á época de sua elaboração, em meados dos anos noventa, os modelos digitais de elevação não eram tão amplamente difundidos e disponíveis para todo o país em formato digital.

---

<sup>1</sup> Entende-se por trecho de curso d'água o segmento entre uma foz e sua confluência, ou segmento entre confluências, ou segmento entre uma confluência e sua nascente.

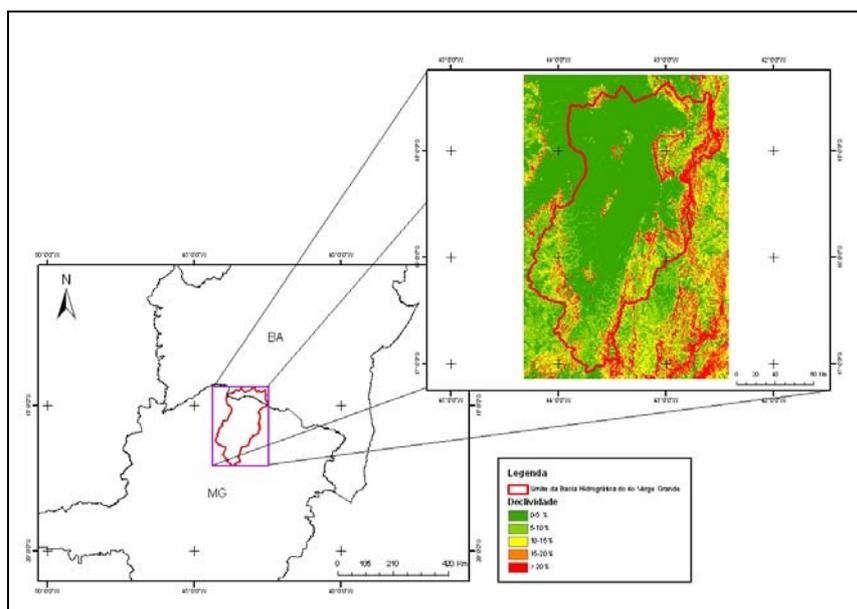
Neste sentido, os modelos digitais de elevação (MDE) e sua posterior consistência hidrológica (MDEHC) permitem que as delimitações das *ottobacias* sejam realizadas com maior precisão, pois consideram os dados altimétricos do terreno em suas etapas de processamento.

Os MDE's podem ser implementados em malhas regulares ou irregulares. As malhas regulares modelam matematicamente o terreno a partir de representações poligonais como quadrados e retângulos (Santos *et al.*, 2000). Os modelos baseados em malhas irregulares ou de Rede Irregular de Triangulação (*Triangulated Irregular Network - TIN*) utilizam triângulos de delaunay em sua implementação. Esses consistem de triangulações a partir de pontos irregularmente distribuídos pelo terreno com atributos X,Y e Z, que equivalem, respectivamente, à longitude, latitude e altitude. Esse modelo, dependendo do grau do polinômio empregado e da quantidade e qualidade dos pontos utilizados (Arckermann, 1996; Santos *et al.*, 2000).

Além da construção do modelo matemático é de suma importância consisti-lo hidrológicamente, isto é, garantir que a drenagem numérica<sup>2</sup> do MDE assemelhe-se a rede hidrográfica vetorial de referência. Desta forma, o objetivo principal deste estudo é assegurar uma metodologia de delimitação de *ottobacias* a partir da altimetria sistemática na escala 1:1.000.000. Para tal foram definidas uma metodologia de geração de Modelo Digital de Elevação (MDE) e sua subsequente consistência hidrológica (MDEHC).

## 2. Área de Estudo

A área de estudo, utilizada na aplicação e validação da modelagem proposta, consiste na sub-bacia do Rio Verde Grande, componente da Bacia Hidrográfica do São Francisco. Essa área foi escolhida por apresentar baixas declividades na parte Noroeste e central e altas declividades na porção Nordeste, Sudoeste e Sudeste, ideal para validação do método proposto. A **Figura 1** mostra a localização da área de estudo e a declividade gerada a partir da imagem SRTM na resolução de 90 metros.



**Figura 1** – Mapa de localização da área de estudo

## 3. Material e método

<sup>2</sup> Comportamento do fluxo superficial da água no modelo matemático.

Nesse trabalho foi gerado e avaliado um modelo digital de elevação hidrologicamente consistente (MDEHC), bem como o processamento das *ottobacias* na escala do milionésimo. Os processamentos foram realizados a partir de dados vetoriais provindos das cartas topográficas do mapeamento sistemático nacional, na escala do milionésimo.

A metodologia foi subdividida em quatro partes:

- 3.1. Tratamento das informações vetoriais e geração do MDE
- 3.2. Pós-Processamento de consistência hidrológica do MDE
- 3.3. Delimitação das *ottobacias* condizentes na escala 1:1.000.000
- 3.4. Avaliação dos resultados

Os produtos cartográficos foram analisados quanto seus erros e precisões através das Normas Técnicas da Cartografia Nacional, descritas no Decreto nº 89.817 de 20/06/1984.

### **3.1. Tratamento das informações vetoriais e geração do MDE**

O processamento das informações vetoriais é a etapa fundamental na geração dos modelos digitais de elevação, uma vez que a maioria dos interpoladores necessita de dados digitais de entrada consistidos topologicamente (Chaves, 2002). Assim foram realizados ajustes topológicos e direcionais da hidrografia, das curvas de nível e dos pontos cotados. Para solucionar o problema de efeito de borda na elaboração do MDE foi gerado um *buffer* de 0.5° no polígono que delimita a bacia.

O MDE foi gerado pelo interpolador TOPOGRID (Hutchinson, 1989) com resolução espacial de 180 metros, compatível com o padrão classe A na escala do milionésimo. O TOPOGRID é um interpolador de diferenças finitas com eficiência dos interpoladores locais sem perder a continuidade do terreno dos interpoladores globais (Sinhá, 2000).

Este processamento não garante a total consistência hidrológica do modelo, devido à geração de depressões espúrias no decorrer do processamento, sendo necessária uma etapa de pós-processamento.

### **3.2. Pós-processamento de consistência hidrológica do MDE; geração do MDEHC**

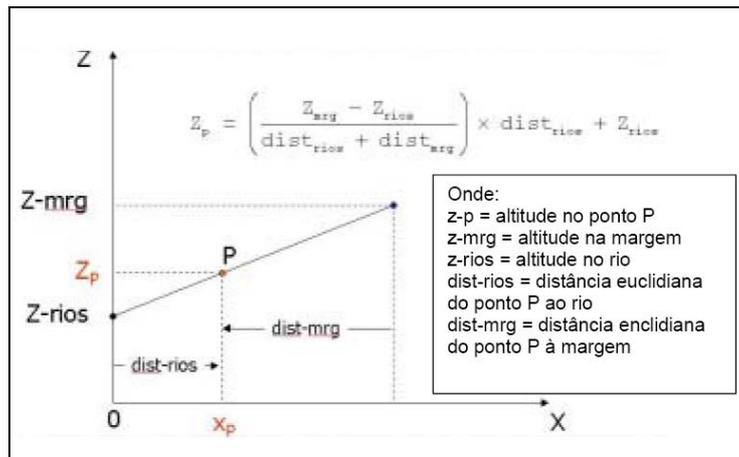
O primeiro passo para a consistência hidrológica do modelo compreende da aplicação do algoritmo *Agree* (Hellweger, 1997), um tipo de *stream burning*, ou seja, um procedimento que realiza a diminuição do valor de altitude das células do MDE ao longo da drenagem vetorial (Chaves, 2002). Na presente aplicação, foi utilizado um valor constante de 1.000 metros de rebaixamento.

O segundo passo corresponde ao preenchimento das depressões espúrias a partir do processamento do algoritmo *Fill Sinks*, que corrige as depressões espúrias, por convolução, geradas na etapa de interpolação dos dados vetoriais. Esse garante a conectividade do fluxo superficial do MDE. Finalizado esse passo, os valores altimétricos alterados na primeira etapa de consistência hidrológica são restaurados com base no MDE.

O terceiro passo compreende na estruturação dos *TALVEGUES*<sup>3</sup>, isto é, processo matemático que utiliza distância euclidiana na estruturação das margens referentes à drenagem vetorial, explicitada na **Figura 2**, que garante a convergência do escoamento superficial das células vizinhas do canal de drenagem numérico.

---

<sup>3</sup> Segundo Guerra (1997), é a linha de maior profundidade no leito fluvial. Resulta da intersecção dos planos das vertentes com dois sistemas de declives convergentes.



Fonte: Chaves, 2002, pg. 82

**Figura 2** – Processo matemático de consistência dos TALVEGUES.

### 3.3. Delimitação das ottobacias condizentes com a escala do milionésimo

Realizada a consistência hidrológica do MDE, procede à delimitação das ottobacias para cada trecho de curso d'água. A maioria dos algoritmos utiliza valores pré-fixados de células, escolhido pelo usuário, para a captura dessas áreas de contribuição. Porém, para a presente aplicação, os trechos de curso d'água possuem extensões heterogêneas, o que torna difícil a implementação dessas ferramentas.

Com a aplicação do *TRACEGRID* (Duncan, duncan@geo.umass.edu) foi possível delimitar a drenagem numérica, a partir dos pontos de nascentes retirados da hidrografia vetorial, sobe o MDEHC. Com a implementação dessa rotina, o resultado foi 100% de coerência, uma vez que a hidrografia numérica (área de contribuição) utilizada está coerente com a escala do milionésimo.

### 3.4. Avaliação dos resultados

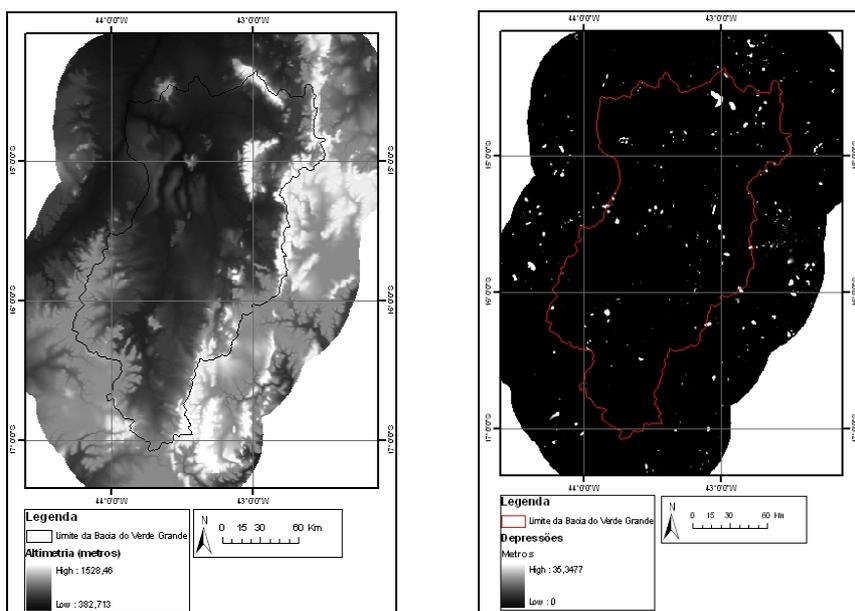
Todo modelo digital de elevação, hidrológicamente consistente ou não, deve ter a capacidade, a partir de seus parâmetros, de representar a realidade do espaço de forma precisa (Chaves, 2002). Assim essa etapa teve por finalidade avaliar os dados altimétricos do MDEHC.

Para essa avaliação foi calculado o erro médio quadrático (EMQ) do MDEHC e analisado junto as Normas Técnicas de Cartografia Nacional. O EMQ foi estimado por meio das referências de nível (RRNN) pertencentes do Sistema Geodésico Brasileiro (SGB), num total de 931 pontos de controle, e seus respectivos valores Z no MDEHC.

## 4. Resultados e Discussão

A constituição do MDEHC e a delimitação de suas estruturas morfométricas seguiram a linha metodologia apresentada acima. A **Figura 3** a seguir mostra o MDE gerado.

Uma vez processado o MDE foi aplicado o pós-processamento de consistência hidrológica. Esta etapa envolveu aplicações dos algoritmos *Agree* e *Fill Sinks*. A **Figura 4** mostra as depressões espúrias (em coloração branca) preenchidas nessa etapa.

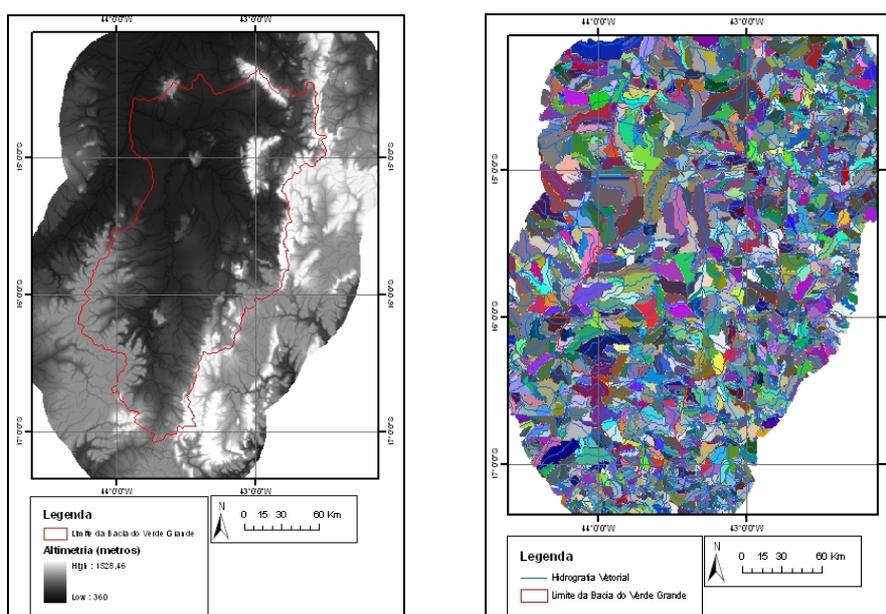


**Figura 3** – MDE da área de estudo gerado por meio do algoritmo TOPOGRID.

**Figura 4** – Depressões espúrias preenchidas da área de estudo no processamento de consistência hidrológica.

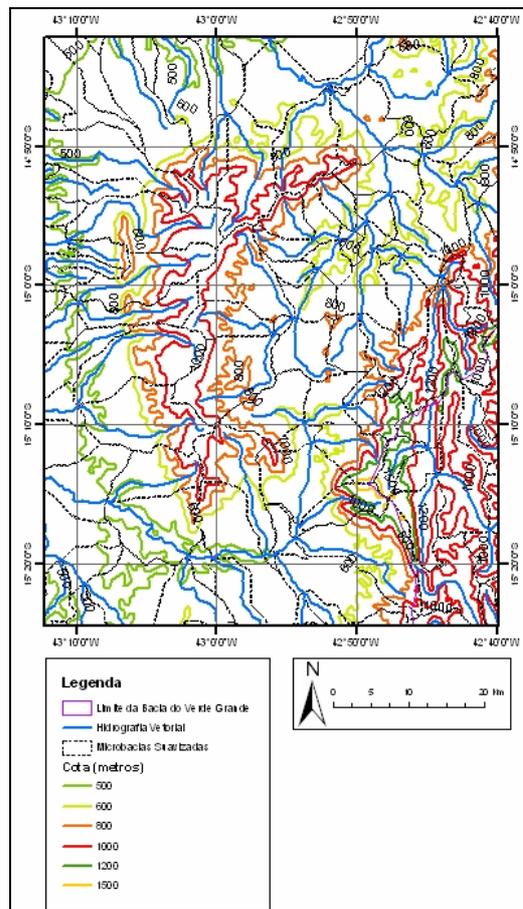
É importante destacar que o modelo teve seus valores alterados (depressões preenchidas) apenas em localidades que não compreende calhas dos canais de drenagem, mantendo assim a consistência de fluxo numérico do modelo.

Para garantir o escoamento superficial do modelo para a drenagem numérica foi implementado TALVEGUE de três células de largura e rebaixamento de trinta metros, valores que melhor se adaptaram a escala e a bacia em questão. A **Figura 5** mostra o resultado da consistência hidrológica. A **Figura 6** mostra todas as microbacias processadas (em cores) a partir da drenagem numérica do TRACEGRID. A **Figura 7** ilustra as ottobacias pertencentes à porção Nordeste da bacia hidrográfica.



**Figura 5** – MDEHC com os TALVEGUES constituídos

**Figura 6** - Microbacias Processadas



**Figura 7** – Microbacias suavizadas na porção nordeste da bacia hidrográfica

Além da consistência hidrológica, o modelo deve ser representativo altimetricamente para o correto traçado dos divisores d’água. Para tal, a bacia foi sub-dividida em duas áreas: uma composta pelas curvas de nível de 100 metros, e outra pelas curvas de nível de 200 metros, uma vez que os dados vetoriais hipsométricos que serviram de entrada para elaboração do MDE não possuem uma única equidistância entre as isoietas. A **Tabela 1** mostra os resultados do EMQ, da Média, do Mínimo e do Máximo, em metros, da diferença altimétrica entre os dados das RRNN e o MDEHC.

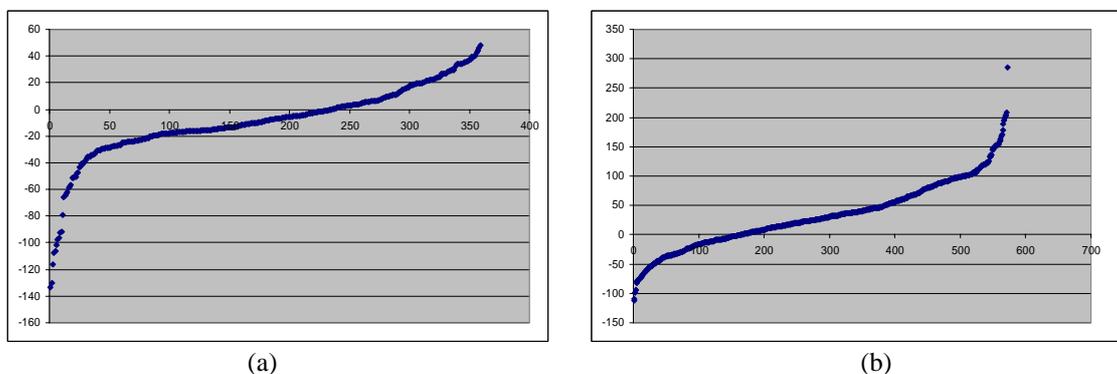
	EMQ (metros)	Média (metros)	Mínimo (metros)	Máximo (metros)
Eqüidistância de 100 metros (359 RRNN)	<b>28,685</b>	<b>-9,791</b>	<b>0,0454</b>	<b>133,456</b>
Eqüidistância de 200 metros (572 RRNN)	<b>65,243</b>	<b>32,895</b>	<b>0,0996</b>	<b>285,107</b>

**Tabela 1** – Diferença entre os dados altimétricos das RRNN e os gerados no MDEHC

Na área de equidistância de 100 metros o EMQ obtido está dentro do limite de tolerância da EP da classe A, sendo que 93,87% de seus valores estão abaixo da PEC A. Já na área de equidistância de 200 metros, o EMQ está dentro o limite de tolerância da EP da classe B, com 94,05% dos valores abaixo da PEC B.

A alta amplitude nos valores de mínimo e máximo mostra uma grande variação altimétrica dos dados amostrais, necessitando de análises mais complexas. Assim o gráfico de dispersão, das áreas de equidistância de 100 e 200 metros, mostra uma variação dos dados

dentre um patamar, respectivamente, de 50 e 100 metros. Os valores que estão além desse são explicados pela ineficiência do interpolador TOPOGRID, devido à escassez de informações vetoriais altimétricas de entrada na elaboração do MDE. A **Figura 8** mostra a dispersão dos dados (na coloração azul) para a área de equidistância de 100 e 200 metros.



**Figura 8** – (a) Gráfico de Dispersão na área de equidistância de 100 metros. (b) Gráfico de Dispersão na área de equidistância de 200 metros. O eixo X representando a quantidade de RRNN e o eixo Y o valor diferencial (metros) entre as RRNN e o MDEHC.

Essas RRNN, de ambos os gráficos de dispersão, estão localizadas, principalmente, nas porções planas da bacia, tais como a parte noroeste e centro-leste.

## 5. Conclusão

A metodologia, proposta e efetivamente testada, apresentou resultados satisfatórios para a área de estudo da bacia do Rio Verde Grande, apenas ocorrendo incoerência nos traçados dos divisores d'água nas áreas planas no MDEHC, devido à escassez de dados vetoriais altimétricos na escala do milionésimo. As otobacias obtidas estão coerentes tanto hidrologicamente, devido à aplicação da rotina TRACEGRID, quanto altimetricamente, como constatou as etapas de validação.

Com o desenvolvimento do trabalho pode-se constatar que o método se torna mais eficiente quão maior for à qualidade e quantidade dos dados altimétricos de entrada.

A aplicação do método descrito em escalas maiores – como, por exemplo, 1:500.000, 1:250.000, 1:100.000 – é perfeitamente admissível e pode, inclusive, apresentar resultados e MDEHC ainda mais consistente.

## 6. Referência bibliográfica

### Livro:

Ackermann, F. Techniques and Strategies for DEM Generation. In: Digital Photogrammetry An Addendum to the Manual of Photogrammetry. ASPRS - *American Society for Photogrammetry and Remote Sensing* Ed. Cliff Greve, Chapter 6 pp 135 – 149, 1996.

Guerra, A. J. T.; Guerra, A. T. **Novo Dicionário Geológico-Geomorfológico**. Rio de Janeiro: Bertrand Brasil, 1997. 648p.

### Tese:

Chaves, M. C. **Modelos Digitais de Elevação Hidrologicamente Consistente para a Bacia Amazônica**. 2002. 115 p. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Minas Gerais. 2002

### Eventos:

Santos, C. J. B. dos; Silva, J. F. C. da; Mello, M. P. de. Avaliação da qualidade de Modelos Digitais do Terreno construídos a partir de diferentes fontes de aquisição de dados. In: Congresso de Cartografia. **Anais...** Porto Alegre. Seção Pôster, Fotogrametria. [CD ROM]. 2001.

**Outros:**

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Normas Cartográficas [On line] <<http://www.concar.ibge.gov.br/indexf7a0.html?q=node/41>> . Acesso em: 25 set. 2006.

Brasil. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística – IBGE. Sistema Geodésico Brasileiro [On line] <<http://mapas.ibge.gov.br/website/geodesia2/viewer.htm>> . Acesso em: 04 out. 2006.

Brasil. Lei Federal 9433, de 8 de janeiro de 1997. Dispõe sobre a Política nacional de recursos hídricos [On Line] <[https://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9433.htm](https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm)>. Acesso em: 24 set. 2006.

Duncan, C. **Tracegrid** [mensagem pessoal]. Mensagem recebida por <felipe.barbosa@ana.gov.br> em 15 set. 2006.

Hellweger, F. **AGREE - DEM Surface Reconditioning System**. University of Texas, Austin, 1997. [On Line] <<http://www.ce.utexas.edu/prof/maidment/GISHYDRO/ferdi/research/agree/agree.html>> . Acesso em: 8 nov. 2006.

Hutchinson, M.F. **A new method for gridding elevation and streamline data with automatic removal of pits**. In: *Journal of Hydrology* 106 pg 211-232.1989.

Pfafstetter, O. **Classificação de Bacias Hidrográficas – Metodologia de Codificação**. Rio de Janeiro, RJ: DNOS, 1989. p.19.

Sinha, J. **Creating DEMs using TOPOGRID**. University of British Columbia-UBC, Department of Geography, 2000 [On Line] < [http://www.geog.ubc.ca/courses/geog516/talks\\_2000/topogrid.html](http://www.geog.ubc.ca/courses/geog516/talks_2000/topogrid.html)> . Acesso em: 11 out. 2006.