



## DERIVAÇÃO DE REDE DE DRENAGEM A PARTIR DE DADOS DO SRTM

### DERIVING DRAINAGE NETWORK FROM SRTM DATA

Adriano Rolim da Paz

Walter Collischonn

Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul,

Campus do Vale, Av. Bento Gonçalves, 9500, Agronomia,

Porto Alegre – RS. Cep 91570-070.

adrianorpaz@yahoo.com.br

collischonn@iph.ufrgs.br

#### RESUMO

O desenvolvimento e o aprimoramento de Sistemas de Informações Geográficas e de algoritmos de geoprocessamento, em combinação com o aumento da capacidade computacional e com a disponibilidade de dados obtidos via sensoriamento remoto, possibilitaram a preparação de diversos tipos de informação para estudos hidrológicos de grandes áreas a relativo baixo custo e com incrível rapidez. Este artigo descreve o uso de dados do SRTM para derivar a rede de drenagem e outros produtos associados como áreas de drenagem acumuladas e comprimentos de rios, com aplicação à bacia do rio Uruguai. Seis diferentes Modelos Numéricos do Terreno (MNTs) foram utilizados, variando a resolução espacial e aplicando o pré-processamento por *stream burning*. As principais limitações da drenagem derivada do MNT são referentes à incapacidade de representar meandros do rio menores do que o tamanho do pixel e o efeito de sinuosidade artificial que ocorre quando a largura do rio é superior à dimensão dos pixels.

**Palavras-chave:** modelo numérico do terreno, rede de drenagem, modelagem hidrológica

#### ABSTRACT

The development and improvement of Geographic Information Systems and geoprocessing algorithms, together with the increase in computational capacity and data availability from remote sensing, became possible to prepare information for hydrologic studies of large areas with relative low cost and incredible speed. This paper describes the use of SRTM data to derive drainage network and related products, such as accumulated drainage areas and river lengths, with application to the Uruguay river basin. Six distinct Digital Elevation Models (DEMs) were used, varying the spatial resolution and applying the stream burning pre-processing technique. The main limitations of the DEM-derived drainage network refer to the incapacity of representing river meanders that are smaller than the pixel size and the problem of artificial sinuosity that occurs when the width of the river is larger than pixel side.

**Key-words:** Digital elevation model, hydrologic modeling, flow directions



## 1. INTRODUÇÃO

É crescente a pressão sobre os recursos hídricos do planeta devido às diversas atividades humanas, a qual pode ser amplificada pela variabilidade do clima e pela ocorrência de mudanças climáticas. Estudar o comportamento hidrológico de rios e bacias hidrográficas é fundamental para tentar prever possíveis impactos, auxiliando no processo de tomada de decisão e na elaboração de medidas de mitigação. Para a maioria dos estudos hidrológicos, a caracterização física da bacia hidrográfica e do sistema de drenagem constitui uma das etapas iniciais. Incluem-se tarefas como delimitação da bacia, determinação da área de contribuição em pontos de interesse, identificação dos principais cursos d'água e obtenção de características como comprimento, declividade e perfil longitudinal dos rios. Tradicionalmente, tais informações eram preparadas manualmente a partir de mapas topográficos impressos. Atualmente, ferramentas de geoprocessamento e Sistemas de Informação Geográfica (SIG) têm sido empregadas para obter as mesmas informações a partir do processamento automático de dados de elevação do terreno (Burrough e McDonnel, 1998).

O desenvolvimento e aprimoramento de SIGs e algoritmos de processamento automático, em combinação com o aumento da capacidade computacional e com a disponibilidade de dados obtidos via sensoriamento remoto, têm permitido preparar diversos planos de informação para estudos hidrológicos de grandes áreas a baixo custo e com incrível rapidez. Isso tem viabilizado, inclusive, a aplicação de modelos hidrológicos para grandes escalas – bacias hidrográficas com centenas de milhares de quilômetros quadrados (Singh e Frevert, 2002). Modelos hidrológicos tipicamente empregam equações matemáticas para representar os processos hidrológicos como a transformação de chuva em vazão e o escoamento da água pela superfície e rede de drenagem. A despeito das dificuldades na representação matemática de alguns processos físicos e da necessidade da discretização de processos contínuos, os modelos matemáticos têm a vantagem de permitir a geração de resultados para diferentes situações com alta velocidade de resposta (Tucci, 1998).

Os dados topográficos são usualmente trabalhados sob a forma de um Modelo Numérico do Terreno (MNT), cuja representação mais tradicional é através de uma imagem raster, onde cada pixel tem como atributo o valor de elevação do terreno em relação a um determinado referencial (Burrough e McDonnel, 1998). Atualmente, a principal fonte de dados de elevação do terreno em escala global é a base de dados obtida pelo projeto *Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e disponibilizada gratuitamente na internet.

Este artigo descreve alguns procedimentos empregados para derivar automaticamente a rede de drenagem a partir do MNT do SRTM visando estudos hidrológicos. São abordadas a geração de direções de fluxo e de áreas acumuladas de drenagem, a delimitação de bacias hidrográficas e identificação e determinação de comprimentos dos cursos d'água. Resultados são apresentados tomando a bacia do Rio Uruguai como estudo de caso.

## 2. CARACTERIZAÇÃO DA REDE DE DRENAGEM

### 2.1. DIREÇÕES DE FLUXO

As direções de fluxo constituem o plano de informações básico derivado de um MNT em formato raster para suporte a estudos hidrológicos. O procedimento mais comum consiste em considerar uma única direção de fluxo para cada pixel do MNT, sendo essa direção atribuída para um de seus 8 vizinhos (tomando uma janela 3x3). A determinação de qual direção de fluxo atribuir é feita escolhendo a direção que proporcione a maior declividade, calculada como sendo a diferença de elevação entre o pixel vizinho e o pixel central dividida pela distância entre eles (Figura 1).

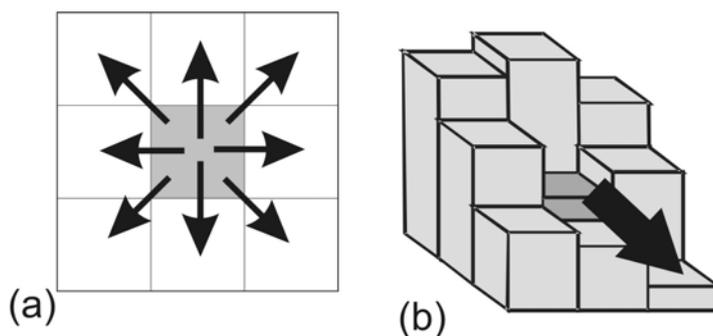


Esse procedimento é conhecido como D8 ou *deterministic eight neighbours* (Jenson e Domingue, 1988), e é o mais comumente empregado. Aplicando a regra da maior declividade para cada pixel do MNT, obtém-se a correspondente direção de fluxo e, ao final do processo, gera-se uma imagem raster onde a cada pixel é atribuído um valor ou código que denota para qual dos vizinhos ele drena.

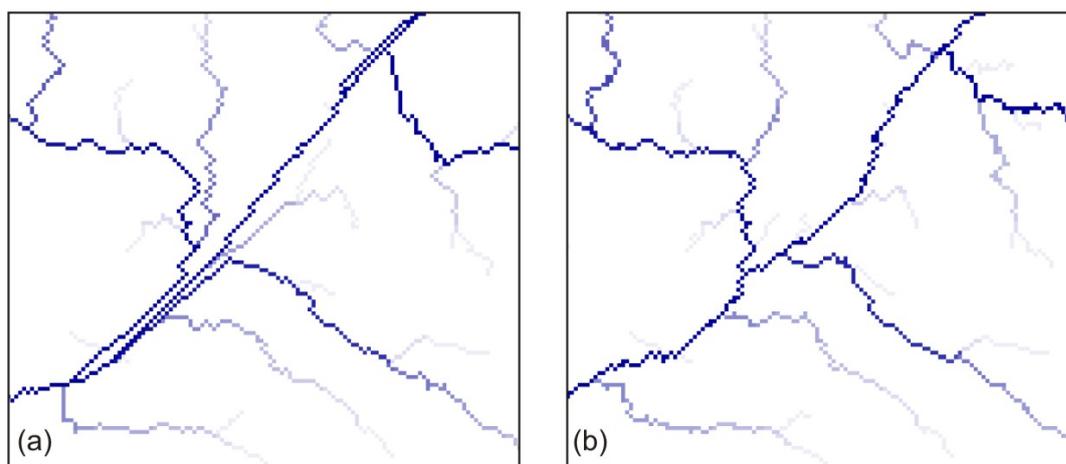
Diversas modificações do algoritmo D8 e algoritmos alternativos de geração de direções de fluxo têm sido propostos principalmente visando diminuir o custo computacional e melhorar os resultados do tratamento de áreas planas (Soille et al., 2003; Tianqi et al., 2003; Martz e Garbrecht, 1999; Garbrecht e Martz, 1997; Tarboton, 1997; Tribe, 1992). Por exemplo, o algoritmo original D8 tende a gerar linhas paralelas irrealistas na drenagem (Figura 2), as quais podem ser quase completamente evitadas pela introdução de um fator aleatório no tratamento de áreas planas (Fairfield e Leymarie, 1991).

Mais recentemente foi proposta uma nova forma de determinar direções de fluxo em depressões espúrias (regiões mais baixas do que a vizinhança criadas por erros nos dados do MNT), baseada no algoritmo Priority First Search (PFS), apresentando vantagens com relação ao algoritmo original (Jones, 2002; Oliveira, 2008).

Outra forma de melhorar a coerência das direções de fluxo geradas consiste em pré-processar o MNT através da incorporação de informações provenientes de uma rede hidrográfica vetorial existente – procedimento conhecido como *stream burning* (Kenny e Matthews, 2005; Turcotte et al., 2001; Graham et al., 1999).



**Figura 1** – (a) Direções de fluxo possíveis para um determinado pixel e (b) direção de fluxo escolhida em função da maior declividade entre o pixel central e os vizinhos, segundo o método D8.



**Figura 2** – Drenagem gerada em uma região plana a partir do processamento do MNT: (a) surgimento de linhas paralelas irrealistas usando algoritmo original D8; (b) minimização do problema pela introdução de um fator aleatório no algoritmo D8 para o tratamento de regiões planas.



Caso o interesse seja em gerar direções de fluxo em uma escala muito maior do que a resolução do MNT disponível, a reamostragem do MNT para a resolução mais baixa e a posterior derivação das direções de fluxo segundo algoritmos similares ao D8 pode produzir resultados bastante incoerentes (Shaw et al., 2005; Reed, 2003). Para solucionar essa questão, vários procedimentos de *upscaling* de direções de fluxo foram propostos na literatura (por exemplo: Paz et al., 2006; Shaw et al., 2005; Reed, 2003; Olivera et al., 2002), consistindo basicamente em derivar as direções de fluxo para uma grade de baixa resolução a partir das direções de fluxo geradas para o MNT de alta resolução. Esse tipo de procedimento é recomendado para determinar direções de fluxo para células de modelos hidrológicos de grande escala, com tamanho de 10 km x 10 km por exemplo, a partir de dados de MNT com resolução espacial de 100 m.

## 2.2. ÁREAS DE DRENAGEM E COMPRIMENTOS DE RIOS

Com base exclusivamente nas direções de fluxo, pode-se determinar um plano de informações que representa as áreas de drenagem acumuladas. Gera-se uma nova imagem raster onde cada pixel tem como atributo o valor correspondente ao somatório das áreas superficiais de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel em questão (Jenson e Domingue, 1988). Quando se trabalha com grandes áreas e sistema de coordenadas geográficas (latitude-longitude), os pixels podem ter áreas superficiais individuais distintas e isso deve ser levado em conta.

Analogamente ao procedimento de geração de áreas acumuladas de drenagem, a partir do raster de direções de fluxo pode-se gerar outro plano de informações bastante útil para estudos hidrológicos, que é uma imagem contendo os comprimentos acumulados ao longo da drenagem principal. Ao percorrer o caminho de fluxo, um passo ortogonal equivale a uma distância igual ao tamanho do pixel, enquanto um passo diagonal corresponde a 1.414 vezes o tamanho do pixel. Alternativamente, operadores de distância podem ser utilizados para contabilizar de forma diferente um passo ortogonal e diagonal, com o intuito de minimizar o erro inerente à quantificação de distâncias em imagens raster (De Smith, 2004; Paz e Collischonn, 2007). Na imagem gerada, o valor atribuído a cada pixel indica a distância dele ao exutório da bacia (ou outro ponto qualquer tomado como referencial) ao longo da drenagem.

## 2.3. DEFINIÇÃO DA REDE DE DRENAGEM

A imagem com áreas acumuladas de drenagem indica qual a área de contribuição de cada pixel, mas não significa que necessariamente exista um curso d'água propriamente dito. Informações coletadas diretamente no campo ou de outras fontes podem ser usadas para identificar o início da rede de drenagem. Entretanto, é praticamente inexistente e inviável obter tais informações para bacias de maior porte.

Diversos estudos procuraram identificar um valor mínimo de área de contribuição necessário para a formação de cursos d'água em função das características físicas da bacia, como geologia, solo, vegetação, relevo, etc (Istanbulluoglu et al., 2002; McNamara et al., 2006; Montgomery e Dietrich, 1988). Supondo que existe um limite mínimo de área de drenagem  $A_{min}$  que caracteriza o início da formação de cursos d'água, é possível gerar automaticamente um plano de informações referente à rede de drenagem a partir do raster de áreas acumuladas. Pode-se fazer uma reclassificação da imagem de áreas acumuladas, considerando que todos os pixels cuja área de drenagem  $A_i$  seja inferior a  $A_{min}$  recebem valor 0 e aqueles com área superior a esse limite mínimo ficam com valor 1. Ou seja, tem-se um raster cujos pixels pertencentes à rede de drenagem têm atributo 1 e os demais têm atributo 0. Através de uma transformação simples de raster para vetor, pode-se em seguida gerar a rede de drenagem no formato vetorial.



## 2.4. DELIMITAÇÃO DA BACIA HIDROGRÁFICA

A partir das direções de fluxo e da indicação da localização do exutório, determina-se a delimitação da bacia hidrográfica contribuinte ao referido exutório. O procedimento é bastante simples e consiste em, para cada pixel da imagem, percorrer o caminho de fluxo até sair da imagem ou até encontrar o pixel que representa o exutório da bacia (Jenson e Domingue, 1988). Atribuindo o valor 1 para todos os pixels cujo caminho de fluxo traçado alcançou o exutório e valor 0 para os demais pixels, tem-se uma imagem raster que denota pixels contidos na bacia (atributo 1) ou fora dela (atributo 0). O mesmo procedimento pode ser empregado para delimitar sub-bacias, adotando atributo distinto para cada uma.

## 3. APLICAÇÃO À BACIA DO RIO URUGUAI

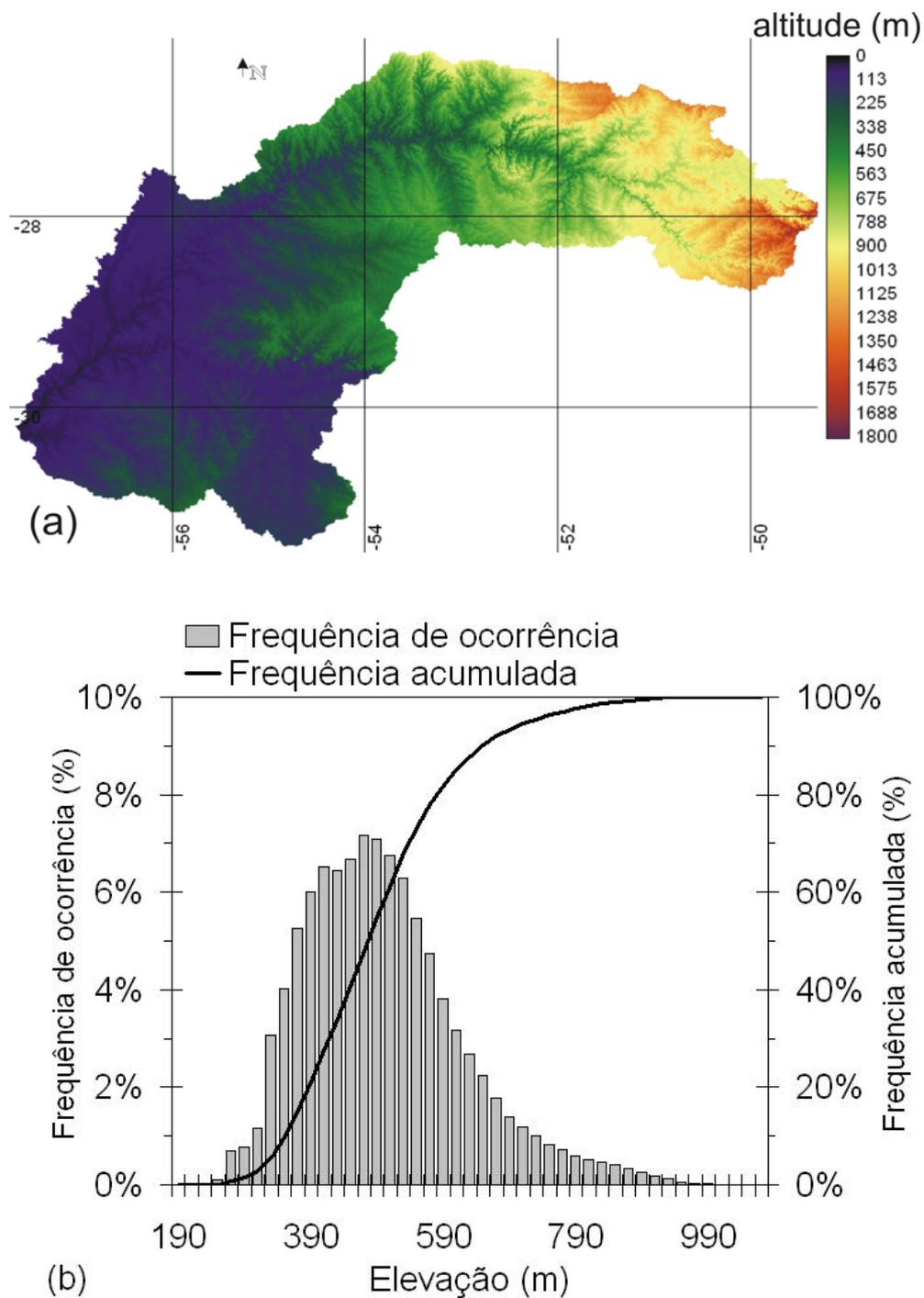
A metodologia de derivação de produtos a partir do MNT foi aplicada à bacia do Rio Uruguai, cuja área de drenagem tem cerca de 206.000 km<sup>2</sup>. O Rio Uruguai se forma na divisa entre os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina, constituindo uma grande parte da divisa entre esses Estados (Figura 3). Continuando seu percurso, o Rio Uruguai passa a constituir a divisa entre o Brasil e a Argentina e, após a confluência com o Rio Quaraí, junta-se ao Rio Paraná, formando o Rio da Prata.



**Figura 3** – Localização da bacia hidrográfica do Rio Uruguai.

Com base nos dados do SRTM-90m, foram elaborados MNTs da região da bacia do Rio Uruguai com resoluções de 0,001°, 0,002° e 0,005°, que correspondem a aproximadamente 100 m, 200 m e 500 m, respectivamente. O MNT da bacia do Rio Uruguai, na resolução de 0,001°, é ilustrado na Figura 4. Observa-se que quase 95% da bacia têm elevação do terreno entre 300 e 700 m.

Para cada uma das três resoluções, foi preparado um segundo MNT pré-processado por uma forma simples de *stream burning*. Os diferentes MNTs foram elaboradas com o objetivo de avaliar o quanto a reamostragem do MNT do SRTM e a aplicação do *stream burning* repercutem na qualidade dos produtos derivados. Quando se lida com grandes áreas como no caso da bacia do rio Uruguai, a resolução espacial pode ser fator restritivo em termos de custo computacional dependendo do tipo de operação a ser realizado. Para efeito de análise da qualidade da drenagem extraída a partir do MNT, foi utilizada como base de comparação uma rede de drenagem vetorial elaborada por digitalização de imagens Landsat7 ETM+.

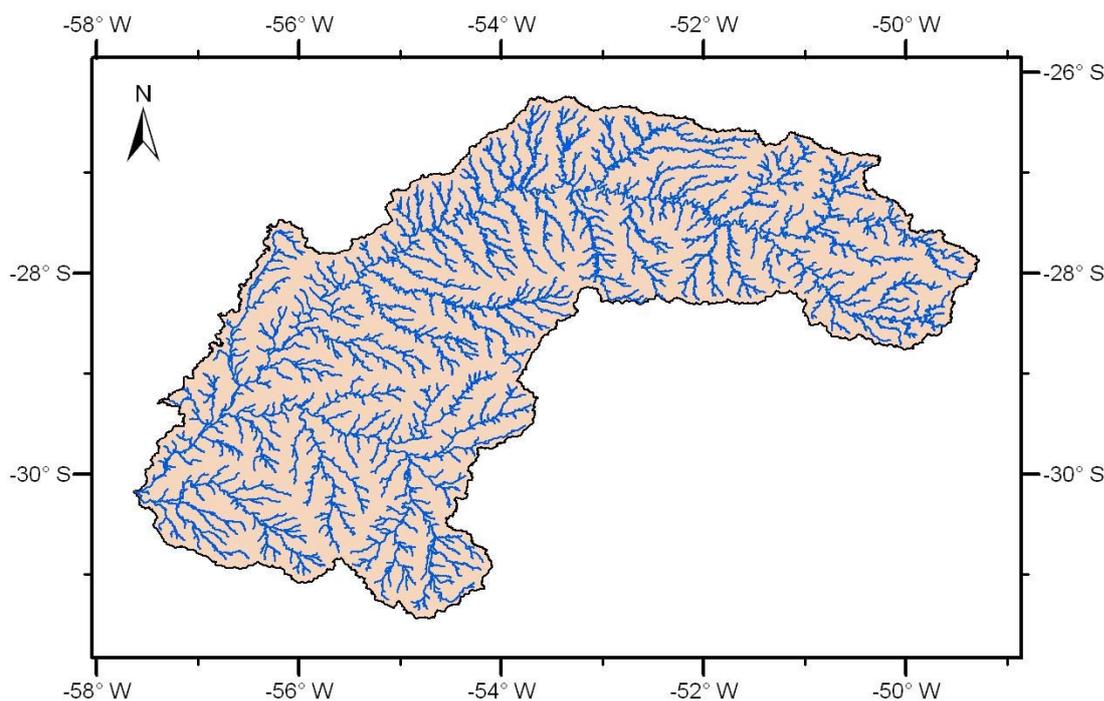


**Figura 4** – (a) Modelo Numérico do Terreno com resolução de  $0,001^\circ$  (~100 m) para a bacia do Rio Uruguai elaborado a partir dos dados do SRTM-90m; e (b) histograma correspondente dos valores de elevação do terreno.



#### 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

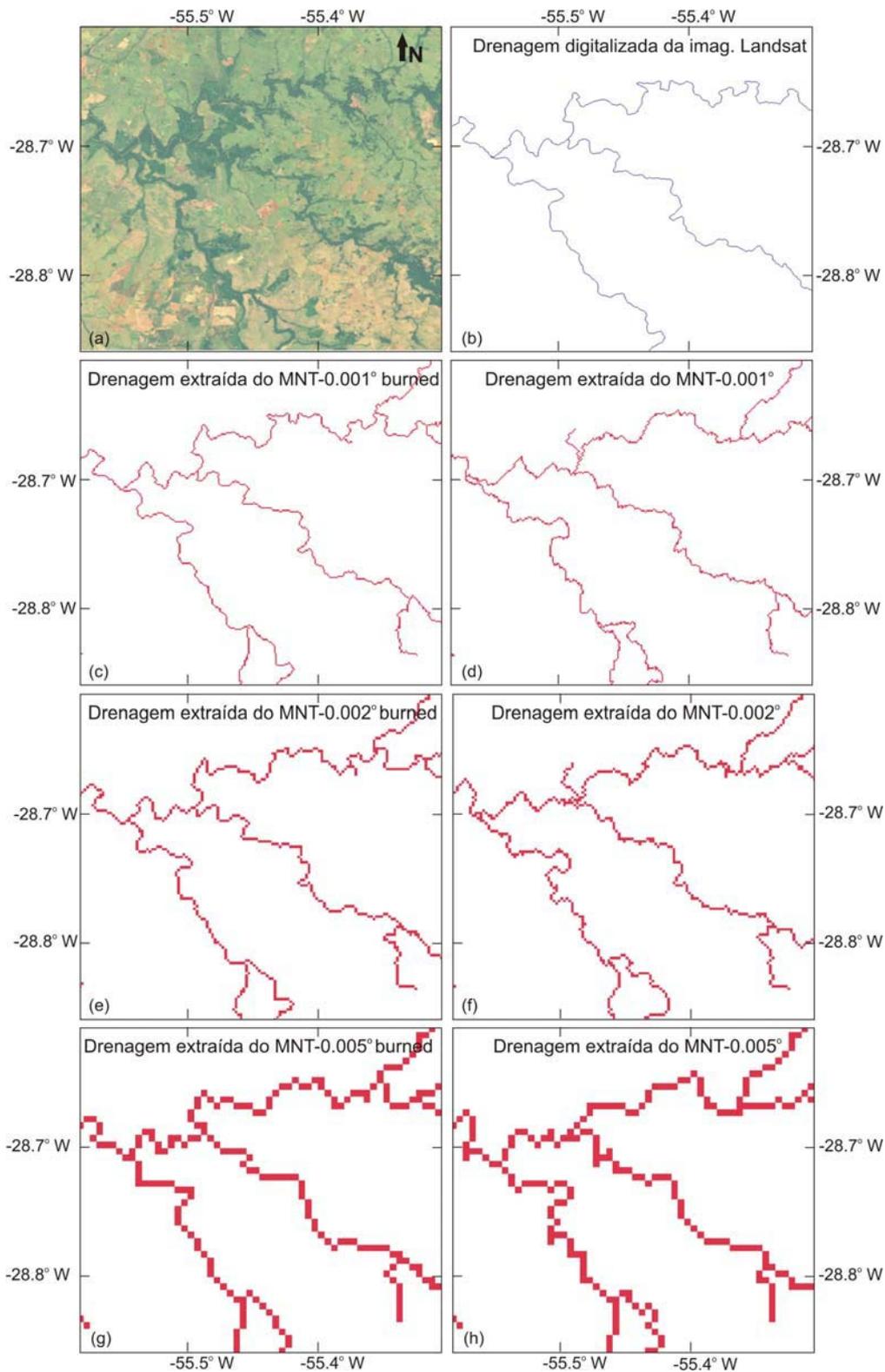
Uma análise interessante dos resultados pode ser feita qualitativamente comparando as redes de drenagens extraídas automaticamente a partir de cada um dos seis MNTs testados em relação à rede vetorial digitalizada – a Figura 5 ilustra a rede de drenagem completa extraída para a bacia do rio Uruguai a partir do MNT de 0,001° de resolução espacial. Tomando o exemplo ilustrado na Figura 6, o qual corresponde a um trecho da parte média da bacia do rio Uruguai, observa-se que de modo geral os rios representados na drenagem vetorial foram capturados e representados na drenagem raster extraída dos MNTs. Como esperado, a qualidade da rede de drenagem derivada do MNT decresce com o aumento da resolução e aumenta com o pré-processamento do MNT por *stream burning*



**Figura 5** – Rede hidrográfica da bacia do Rio Uruguai extraída automaticamente a partir do MNT de resolução 0,001° e com a consideração de uma área mínima de contribuição de 50 km<sup>2</sup> para denotar início da drenagem.

Na resolução mais fina (0,001°) e com aplicação do *stream burning*, tem-se uma representação da drenagem em quase perfeita concordância com a rede vetorial. Sem esse pré-processamento, a representação da drenagem obtida é muito semelhante à rede vetorial, mas nota-se a falha na representação de alguns meandros de menor curvatura. Com o aumento da resolução do MNT para 0,002°, ocorre maior deformação dos meandros do rio na drenagem raster extraída, inclusive quando o MNT foi pré-processado, mas ainda sim o traçado dos rios é bem representado. Para a resolução de 0,005°, praticamente apenas o padrão geral da drenagem e as maiores curvas do rio são reproduzidos na drenagem raster, perdendo-se significativamente a forma sinuosa do traçado dos rios.

A performance das drenagens extraídas a partir de cada MNT é explicada, dentre outros fatores, pelo tamanho do pixel da imagem raster em relação às características do rio, principalmente largura e sinuosidade. No exemplo da Figura 6, que corresponde a um trecho de um afluente do rio Uruguai com largura de cerca de 60 a 90 m e sinuosidade média de 2,7 m/m, não é possível representar a sinuosidade do traçado com pixels de 0,005° (~ 500 m). Alguns meandros estão contidos dentro de um único pixel nessa resolução. Pixels com dimensão 0,001° (ou ~ 100 m) foram suficientes para seguir o traçado e sinuosidade dos rios. A falha na representação dos meandros menores conduz à subestimativa no comprimento dos rios determinado sobre a rede de drenagem raster (Paz et al., 2008).



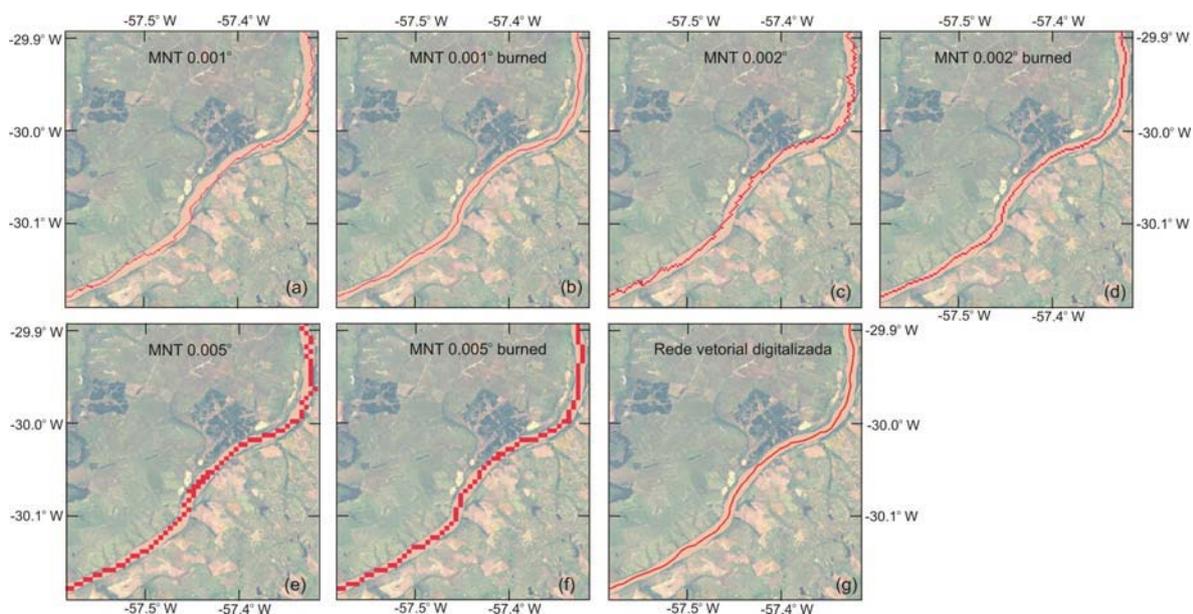
**Figura 6** – Trecho da bacia do Rio Uruguai: (a) composição colorida R3G2B1 de imagem Landsat7 ETM+; (b) rede de drenagem vetorial digitalizada sobre composição colorida; (c),(d),(e),(f) rede de drenagem raster extraída automaticamente de diferentes MNTs.



Um problema diferente ocorre quando a resolução do MNT é inferior à largura do rio. Nessa situação, vários pixels representam a largura do rio no MNT e têm valores de elevação praticamente iguais ou com uma diferença mínima não representativa da variação da topografia propriamente. Se utilizado o algoritmo original D8 como apresentado por Jenson e Domingue (1988) para a geração da rede de drenagem, surgirão linhas de drenagem paralelas e irrealistas como ilustrado na Figura 2-a. Neste estudo, foi introduzido um fator aleatório no tratamento de áreas planas (Fairfield e Leymarie, 1991), de forma que o problema das linhas paralelas é contornado. Por outro lado, a aleatoriedade introduzida faz com que a rede de drenagem apresente falsos meandros internamente à própria largura do rio. Isso é um dos principais fatores que levam à superestimativa do comprimento do rio medido sobre uma drenagem raster derivada do MNT (Paz et al., 2008).

Na bacia em estudo, a situação do rio de largura superior à resolução do MNT acontece para o rio Uruguai, cuja largura alcança mais de 1000 m na parte baixa da bacia. Para o trecho do rio Uruguai apresentado na Figura 7, por exemplo, as redes de drenagem derivadas dos MNTs de 0,001°, 0,002° e 0,005° apresentam uma sinuosidade artificial dentro da área efetivamente ocupada pelo canal principal do próprio rio, como ilustra a imagem de satélite superposta. O pré-processamento do MNT pelo *stream burning* minimiza esse problema, já que no MNT modificado existe um caminamento único de pixels com elevação mais baixa e, portanto, representativos do traçado do rio.

A partir de cada um dos seis MNTs avaliados, foi realizada a delimitação da bacia do rio Uruguai, tomando como exutório um ponto logo a jusante da confluência do rio Quaraí. Os valores da área de drenagem da bacia delimitada em cada caso não diferem muito entre si (Tabela 1), com uma diferença máxima de 4%. Embora as áreas de drenagem determinadas a partir dos MNTs de 0,005° e 0,005° *burned* estejam mais próximas da área de drenagem derivada do MNT de 0,001° *burned*, não significa que as delimitações com resolução de 0,005° estão mais coerentes do que aquelas obtidas na resolução de 0,002°. Erros de inclusão e exclusão de determinadas áreas podem se compensar resultando em valores próximos de área de drenagem.



**Figura 7** – (a),(b),(c),(d),(e),(f) Trecho do rio Uruguai representado nas redes de drenagem extraídas automaticamente de diferentes MNTs; (g) mesmo trecho representado na rede vetorial digitalizada manualmente; ao fundo, composição colorida R3G2B1 de imagem Landsat7 ETM+.



Na Tabela 1 são apresentados também os comprimentos do rio Uruguai medidos nas drenagens em formato raster derivadas de cada um dos seis MNTs. Para a determinação do comprimento, o início do rio foi adotado como o pixel com área de contribuição superior a 50 km<sup>2</sup> situado mais a montante. Na drenagem derivada do MNT de 0,001° *burned*, o rio Uruguai tem um comprimento de 1756,4 km. Esse valor aumenta em 13% e 11,4% nas drenagens extraídas dos MNTs de 0,001° e 0,002° sem pré-processamento, respectivamente. Isso ocorre devido aos falsos meandros criados internamente à largura do rio Uruguai, principalmente nos trechos médio e baixo. Na resolução de 0,005°, o maior tamanho dos pixels minimiza esse efeito, mas por outro lado ocorre a perda de representação de meandros menores da parte alta do rio Uruguai. Com a aplicação do *stream burning*, ambos os problemas são minimizados, e os comprimentos medidos nas drenagens de resolução 0,002° e 0,005° são mais próximos do comprimento medido a partir da drenagem derivada do MNT de 0,001° *burned*.

**Tabela 1** – Área de drenagem da bacia do rio Uruguai e comprimento do rio Uruguai extraídos automaticamente a partir de seis MNTs diferentes.

Ordem	MNT utilizado para derivação da rede de drenagem	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )	Variação da área de drenagem relativa à área 1	Comprimento do rio Uruguai (km)	Variação do comprimento relativa ao comprimento 1
1	0,001° <i>burned</i>	206.297	-	1756,4	-
2	0,001°	206.303	<0,1%	1985,5	13,0%
3	0,002° <i>burned</i>	214.547	4,0%	1743,5	-0,7%
4	0,002°	214.600	4,0%	1957,2	11,4%
5	0,005° <i>burned</i>	207.703	0,7%	1681,6	-4,3%
6	0,005°	207.736	0,7%	1692,3	-3,6%

## 5. CONCLUSÕES

Os dados de elevação do terreno provenientes do SRTM e disponibilizados gratuitamente na internet constituem excelente fonte de informações para caracterização topográfica de bacias hidrográficas. Procedimentos computacionais podem ser facilmente aplicados para extrair de forma automatizada a rede de drenagem e diversas outras informações a partir do MNT do SRTM. Esses procedimentos podem ser customizados para elaborar planos de informação específicos para entrada em modelos hidrológicos, agilizando a aplicação destes em bacias de grande porte.

Basicamente, a qualidade da drenagem extraída a partir de um MNT do SRTM varia conforme a resolução de trabalho das imagens e das características dos rios (largura, sinuosidade, declividade). Dois tipos de problemas principais ocorrem em drenagens derivadas de MNT: (1) falha em representar meandros do rio considerados pequenos em relação à resolução espacial do MNT; (2) sinuosidade artificial criada quando a largura do rio é maior do que a dimensão dos pixels do MNT. O primeiro problema é a principal causa da subestimativa de comprimentos de rio derivados de drenagem raster, enquanto o segundo problema leva à superestimativa dos comprimentos.

## AGRADECIMENTOS

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de Doutorado ao primeiro autor.

## 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Burrough, P.A., McDonnel, R.A. 1998. Principles of Geographical Information Systems: Spatial Information Systems and Geostatistics. Oxford University Press. Oxford, 333 p.

De Smith, M. 2004. Distance transforms as a new tool in spatial analysis, urban planning, and GIS. *Env. and Plan. B: Plan. and Design*, 31, 85-104.

Fairfield, J., Leymarie, P. 1991. Drainage networks from grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 27(5), 709-717.

Garbrecht, J., Martz, L.W. 1997. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models. *Journal of Hydrology*, 193, 204-213.

Graham, S., Famiglietti, J., Maidment, D. 1999. Five-minute, 1/2°, and 1° data sets of continental watersheds and river networks for use in regional and global hydrologic and climate system modeling studies. *Water Resources Research*, 35(2), 583-587.

Istanbulluoglu, E., Tarboton, D.G., Pack, R.T., Luce, C. 2002. A probabilistic approach for channel initiation. *Water Resources Research* 38 (12), 1325.

Jenson, S.K., Domingue, J.O. 1988. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis. *Photogramm. Eng. Remote Sens.*, 54(11), 1593-1600.

Jones, R. 2002. Algorithms for using a DEM for mapping catchment areas of stream sediment samples. *Computers & Geosciences*, 28, 1051-1060.

Kenny, F., Matthews, B. 2005. A methodology for aligning raster flow direction data with photogrammetrically mapped hydrology. *Computers & Geosciences*, 31, 768-779.

McNamara, J.P., Ziegler, A.D., Wood, S.H., Vogler, J.B. 2006. Channel head locations with respect to geomorphologic thresholds derived from a digital elevation model: A case study in northern Thailand. *Forest Ecology and Management* 224, 147-156.

Montgomery, D., Dietrich, W. 1988. Where do channels begin? *Nature* 336, 232-234.

Martz, L.W., Garbrecht, J. 1999. An outlet breaching algorithm for the treatment of closed depressions in a raster DEM. *Computers & Geosciences* 25, 835-844.

Olivera, F., Valenzuela, M., Srinivasan, R., Choi, J., Cho, H., Koka, S., Agrawal, A. 2006. ArcGIS-SWAT: A geodata model and GIS interface for SWAT. *Journal of the American Water Resources Association*, 42(2), 295-309.

Oliveira, B.T.M. 2008 Comparação de algoritmos para geração de área acumulada no sudeste do Estado do Tocantins a partir de dados SRTM. (Trabalho de disciplina MINTER IPH-UFRGS e UFT; não publicado).

Paz, A.R., Collischonn, W. 2007. River reach length and slope estimates for large-scale hydrological models based on relatively high-resolution digital elevation model. *Journal of Hydrology*, 343, 127- 139.

Paz, A.R., Collischonn, W., Silveira, A.L.L., 2006. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models. *Water Resources Research*, 42, W08502.

Paz, A.R., Collischonn, W., Risso, A., Mendes, C.A. 2008. Errors in river lengths derived from raster digital elevation models. *Computers & Geosciences* (in press).

Reed, S.M. 2003. Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling. *Water Resources Research*, 39(9), 1238.



Shaw, D., Martz, L.W., Pietroniro, A. 2005. Flow routing in large-scale models using vector addition. *Journal of Hydrology*, 307, 38-47.

Singh, V.P., Frevert, D.K. 2002. *Mathematical Models of Large Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, LLC, Colorado, Estados Unidos.

Soille, P., Vogt, J., Colombo, R. 2003. Carving and adaptive drainage enforcement of grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 39(12), 1366.

Tarboton, D. 1997. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models. *Water Resources Research*, 33(2), 309-319.

Tianqi, A., Takeuchi, K., Ishidaira, H., Yoshitani, J., Fukami, K. 2003. Development and application of a new algorithm for automated pit removal for grid DEMs. *Hydrological Sciences Journal* 48(6), 985-997.

Tribe, A. 1992. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method. *Journal of Hydrology*, 139, 263-293.

Tucci, C.E.M. 1998. *Modelos Hidrológicos*. 2ª edição, Editora da UFRGS, Porto Alegre, 678 p.

Turcotte, R., Fortin, J.-P., Rousseau, A.N., Massicotte, S., Villeneuve, J.-P. 2001. Determination of the drainage structure of a watershed using a digital elevation model and a digital river and lake network. *Journal of Hydrology*, 240, 225-242.

---