

## Extração automática de comprimentos de trechos de rio a partir do Modelo Numérico do Terreno para modelagem hidrológica distribuída

Adriano Rolim da Paz  
Walter Collischonn  
Carlos Eduardo Morelli Tucci

Instituto de Pesquisas Hidráulicas  
– Universidade Federal do Rio Grande do Sul (IPH-UFRGS)  
91501-970 – Porto Alegre - RS, Brasil  
adrianorpaz@yahoo.com.br; {collischonn,tucci}@iph.ufrgs.br

**Abstract.** Large-scale hydrologic modeling often requires a great number of input data, including Digital Elevation Model (DEM), drainage network, accumulated drainage area and slope and length of river reaches. The last two input data are useful to flow routing between model grid cells. Due to increase in remote sensing data availability, effortless of geoprocessing methods and large scale of the modeled area, the employment of algorithms to automatically extract and prepare input data to hydrologic modeling becomes even more recommended. This paper presents a methodology to automatically derive length of river reaches, using as input data a DEM with resolution higher than hydrological model cells. Application of such methodology to Uruguay river basin (206.000 km<sup>2</sup>) is presented, and the results are analysed comparing with drainage network digitized from satellite images. Acceptable results were achieved and showed the suitability of proposed method.

**Palavras-chave:** river length, river drainage network, digital elevation model, comprimento de rios, rede de drenagem, modelo numérico do terreno.

### 1. Introdução

Na modelagem hidrológica de grandes bacias (área de drenagem > 10.000 km<sup>2</sup>), comumente são utilizados modelos distribuídos, que dividem a bacia em células quadradas de dimensões da ordem de 5 a 10 quilômetros. A aplicação de modelos distribuídos às grandes bacias tem várias finalidades, entre elas a previsão de vazões, avaliação de mudanças climáticas e do uso da terra sobre o regime hidrológico, operação de reservatórios e sistemas de irrigação, etc. Tais modelos procuram representar os processos hidrológicos nas células e propagar o escoamento superficial para uma das células vizinhas. Geralmente, as células são interconectadas por uma rede de drenagem, como ocorre no caso do modelo MGB-IPH, desenvolvido por Collischonn e Tucci (2001) e que vem sendo aplicado a várias bacias na América do Sul (Allasia et al., 2005; Collischonn et al., 2005).

Para a propagação do escoamento de uma célula para a de jusante, são empregados métodos numéricos baseados em equações matemáticas que governam o escoamento. Tais métodos requerem como informações fundamentais o comprimento e a declividade do trecho de rio que constitui a drenagem entre duas células. Esse tipo de informação, principalmente em grandes bacias, raramente está disponível e a extração manual a partir de mapas impressos representa tarefa inviável. A maior simplificação seria considerar todos os trechos com comprimento igual à dimensão da célula. Entretanto, isso significa uma enorme perda na qualidade da representação do processo físico e a introdução de erros além das incertezas existentes nos demais dados de entrada do modelo hidrológico. A crescente disponibilidade de dados topográficos obtidos via sensoriamento remoto e a popularização de técnicas de geoprocessamento motivaram o desenvolvimento de algoritmos de extração automática de produtos derivados do MNT, principalmente a rede de drenagem. Alguns algoritmos de geração da drenagem (direções de fluxo) a partir do MNT têm como um dos produtos

derivados a determinação dos comprimentos de rios, como o método apresentado por Olivera e Raina (2003), por exemplo. Entretanto, os algoritmos propostos na literatura determinam comprimentos da rede de drenagem medidos desde a célula ou pixel em análise até o exutório da bacia ou à próxima confluência de jusante ou montante. São extraídos comprimentos totais de rios. Em termos práticos de aplicação do modelo hidrológico distribuído com células quadradas, porém, permanece a questão: qual o trecho de rio associado a cada célula, segundo o qual ocorre a propagação do escoamento para a célula de jusante? Neste artigo é descrita uma metodologia para extrair automaticamente comprimentos de trechos de rio associados às células do modelo hidrológico distribuído a partir de informações do MNT, sendo apresentados resultados da aplicação à bacia do rio Uruguai.

## 2. Metodologia

A metodologia de extração de comprimentos de trechos de rio apresentada neste artigo é baseada em um MNT de resolução mais alta do que as dimensões das células do modelo hidrológico. Para maior clareza, neste texto os elementos da malha de alta resolução são referidos como pixels, enquanto os elementos da grade de baixa resolução (células do modelo hidrológico) são referidos como células. Uma exigência da metodologia proposta é que as resoluções alta e baixa sejam múltiplas entre si (por exemplo: 100 m e 10 km). O procedimento completo da metodologia apresentada neste artigo consiste basicamente de quatro etapas (**Figura 1-a**): (1) determinação das direções de fluxo de alta resolução; (3) cálculo das áreas acumuladas de alta resolução; (3) derivação das direções de fluxo de baixa resolução; (4) extração dos comprimentos dos trechos de rio.

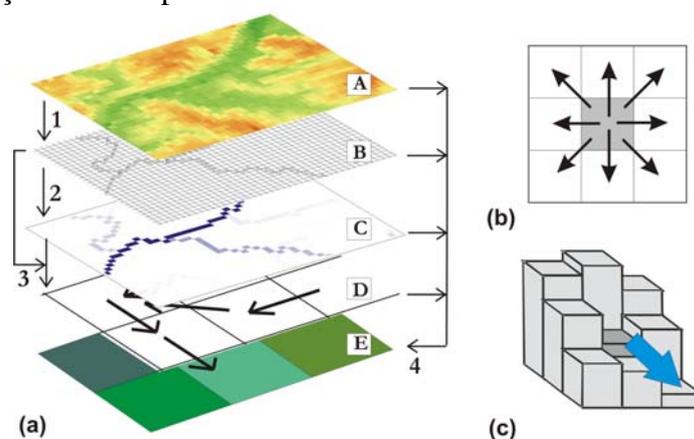


Figura 1 – (a) Esquema das quatro etapas que constituem a metodologia proposta, com indicação dos diversos planos de informação envolvidos: MNT de alta resolução (A), direções de fluxo de alta e baixa resoluções (B e D); áreas acumuladas de drenagem de alta resolução (C); comprimentos dos trechos de rio (E); (b) direções de fluxo possíveis para um pixel ou célula; (c) regra da maior declividade para determinação da direção de fluxo.

### 2.1 Determinação das direções de fluxo de alta resolução

A partir do MNT de alta resolução determinam-se as direções de fluxo correspondentes, considerando que cada pixel drena para um de seus oito vizinhos (**Figura 1-b**). Para tanto, uma alternativa é utilizar a regra da maior declividade, segundo a qual o escoamento de um pixel é atribuído na direção de um de seus vizinhos, conforme a maior diferença de elevação do terreno dividida pela distância entre o pixel em questão e seus vizinhos (**Figura 1-c**). Esse é o procedimento conhecido como D8, ou *deterministic eight-neighbors*, descrito em Jenson e Domingue (1988). Diversas variações e adaptações desse método foram propostas na

literatura, principalmente no intuito de melhorar o desempenho do algoritmo original nas regiões planas ou na remoção de depressões simples (Tianqi et al., 2003; Liang e Mackay, 2000; Martz e Garbrecht, 1998; Garbrecht e Martz, 1997; Tarboton, 1997; Tribe, 1992; Quinn et al., 1991; Fairfield e Leymarie, 1991). Para este trabalho, foi aplicada uma adaptação do método D8 original, cuja principal diferença consiste na introdução de um fator de aleatoriedade na atribuição de direções de fluxo em áreas planas, como sugerido por Fairfield e Leymarie (1991).

## 2.2 Cálculo das áreas de drenagem acumuladas de alta resolução

As áreas de drenagem acumuladas são determinadas com base exclusivamente nas direções de fluxo. Cada pixel recebe o valor correspondente ao somatório das áreas de todos os pixels cujo escoamento contribui para o pixel analisado (Jenson e Domingue, 1988). No cálculo da área de cada pixel, levou-se em conta a sua localização geográfica, através da projeção do sistema de coordenadas.

## 2.3 Extração das direções de fluxo de baixa resolução

As direções de fluxo das células do modelo hidrológico são atribuídas através de um algoritmo que incorpora as informações de alta resolução (MNT, direções de fluxo e áreas de drenagem acumuladas), em um processo referido como *upscaling* de direções de fluxo. Diversos algoritmos são propostos na literatura, incluindo O'Donnell et al. (1999), Wang et al. (2000), Fekete et al. (2001), Döll e Lehner (2002), Olivera et al. (2002), Reed (2003), Olivera e Raina (2003), Shaw et al. (2005a, 2005b) e Paz et al. (2006).

O algoritmo adotado neste trabalho é o apresentado em Paz et al. (2006), o qual consiste basicamente em determinar o pixel exutório de cada célula, seguir o caminho de fluxo desde o pixel exutório e conforme esse caminho traçado decidir para qual célula vizinha a célula analisada deve drenar (**Figura 2**). O pixel exutório de uma célula é definido como aquele que drena o curso d'água principal que atravessa a célula, desde que atenda a determinados critérios: maior área acumulada de drenagem e comprimento mínimo do trecho de rio a montante dele dentro da célula. Para selecionar o pixel exutório, escolhe-se aquele que apresenta a maior área de drenagem acumulada dentre todos os pixels contidos na célula e verifica-se o comprimento do curso d'água principal a montante desse pixel dentro da célula. Caso esse comprimento seja superior a um valor mínimo pré-definido, o pixel testado é aceito como pixel exutório. Tal valor mínimo corresponde ao parâmetro denominado de Caminho Mínimo de Montante (CMM). Caso não seja atendido o critério do CMM, verifica-se se o pixel testado é o que drena a maior porção da célula e, em caso positivo, tal pixel é aceito para pixel exutório. Caso contrário, escolhe-se novo pixel para ser testado dentre os demais, de acordo com a maior área de drenagem acumulada, e repetem-se as verificações subsequentes.

## 2.4 Derivação dos comprimentos dos trechos de rio

O algoritmo proposto incorpora informações de alta e baixa resoluções geradas nas etapas anteriores. A cada célula é associado um trecho de rio que pode ser composto por um sub-trecho (a montante do pixel exutório) ou dois sub-trechos (um a montante e outro a jusante do pixel exutório). As células que não recebem contribuição de outras células (ou seja, não têm nenhuma célula a montante) são consideradas células de cabeceira e não têm trecho de rio associado. Na maioria dos modelos hidrológicos, células de cabeceira contribuem diretamente para a célula de jusante, sem propagação por trecho de rio.

Inicialmente são determinados os sub-trechos de rio situados a montante dos pixels exutórios (**Figura 2-e**). Para percorrer o caminho da drenagem no sentido oposto ao fluxo

natural, o problema consiste em identificar a cada passo o pixel de montante, definido como sendo aquele com a maior área de drenagem acumulada que drena para o pixel analisado. Todos os pixels encontrados no caminho são marcados, a cada passo ortogonal é contabilizado o tamanho do pixel e a cada passo diagonal contabiliza-se 1.4142 vezes o tamanho do pixel. O passo seguinte consiste em determinar os sub-trechos a jusante dos pixels exutórios (**Figura 2-f**), o que é realizado selecionando-se as células em ordem decrescente de áreas de drenagem acumuladas dos pixels exutórios. Para cada célula, a partir do pixel exutório calcula-se o comprimento do trecho de rio situado a jusante desse pixel (fora da própria célula). O pixel de jusante de um determinado pixel é diretamente indicado pela sua direção de fluxo. Assim como no caso dos sub-trechos de montante, cada pixel encontrado no caminho é marcado e o mesmo cálculo é adotado quanto a um passo ortogonal ou diagonal. O traçado do sub-trecho de jusante é encerrado apenas ao encontrar um pixel já marcado ou quando atinge a borda da imagem. O comprimento do trecho de rio associado a cada célula é dado pela soma dos comprimentos dos sub-trechos de montante e de jusante (**Figura 2-g**).

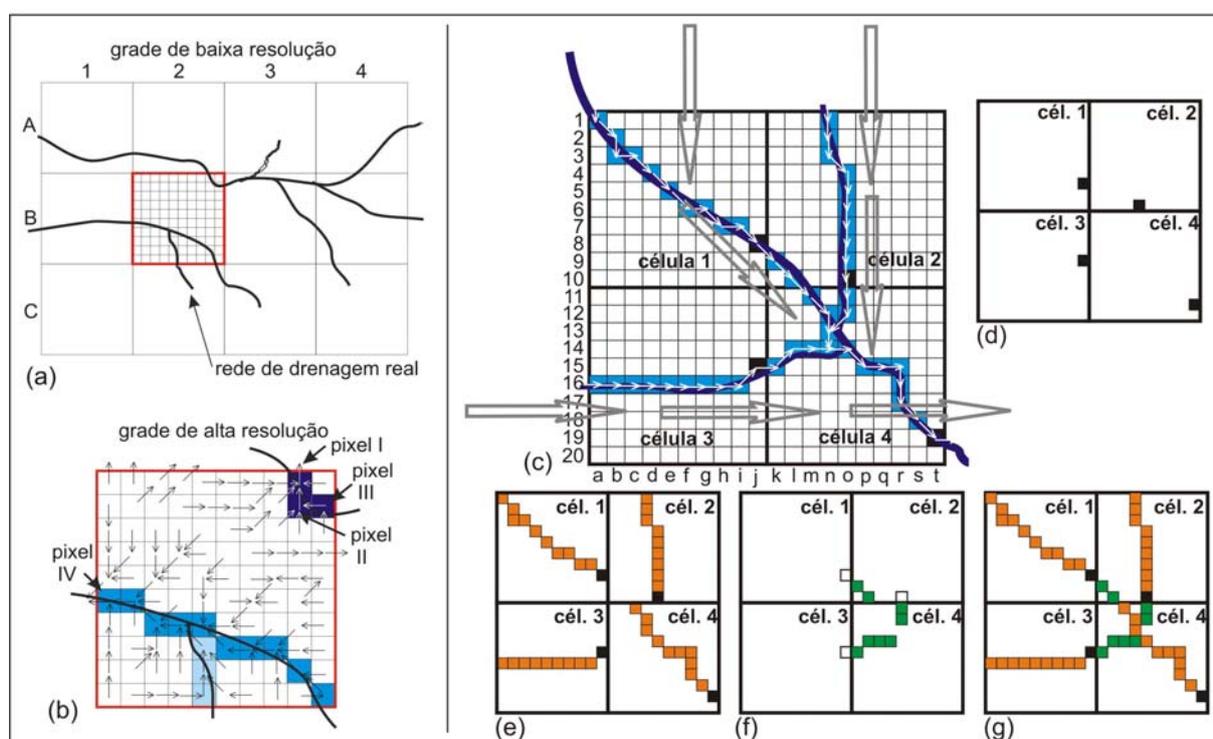


Figura 2 – (a), (b) Exemplo de determinação do pixel exutório: após serem testados os pixels I e III, o pixel IV é testado e aceito como pixel exutório da célula B2, indicada em vermelho (Fonte: adaptado de Paz et al., 2006); (c) a (g) Exemplo de determinação dos comprimentos dos trechos de rios, onde as setas maiores indicam a direção das células e as menores a direção dos pixels, os pixels exutórios estão indicados em preto, os sub-trechos de montante e de jusante estão indicados pelos pixels de cor laranja e verde, respectivamente.

### 3. Aplicação à bacia do rio Uruguai

A metodologia proposta foi aplicada à bacia do rio Uruguai, cuja área de drenagem tem cerca de 206.000 km<sup>2</sup> (**Figura 3**), visando extrair comprimentos e declividades dos trechos de rio associados a células de dimensões 0,1° x 0,1° (aprox. 10 x 10 km), que é a resolução usual adotada para o modelo hidrológico MGB-IPH. O MNT disponível, de resolução 90 m (0,000833°) (SRTM-90m disponibilizado em CGIAR-CSI, 2006), foi reamostrado para a

resolução de 100 m (0,001°), tornando as resoluções alta e baixa múltiplas entre si como requerido pela metodologia. Para a verificação do desempenho da metodologia empregada, foram digitalizados trechos de rios a partir de imagens do satélite Landsat7 ETM+ (USGS, 2006). Foram selecionados trechos de afluentes e do rio principal das partes alta (total de 2.168 km de rios), média (3.183 km) e baixa (1.237 km) da bacia (**Figura 3**), a fim de obter amostras representativas de regiões com diferentes características topográficas, totalizando cerca de 6.600 km. Foram usadas composições coloridas de 12 cenas diferentes do referido sensor, com data de aquisição variando entre set/1999 e mar/2002. Embora a digitalização tenha erros associados como a própria incerteza ou incapacidade do operador em perceber e digitalizar representações dos objetos (Burrough, 1986), esta foi a única forma para obter dados confiáveis de comprimentos de rios na área de estudo.

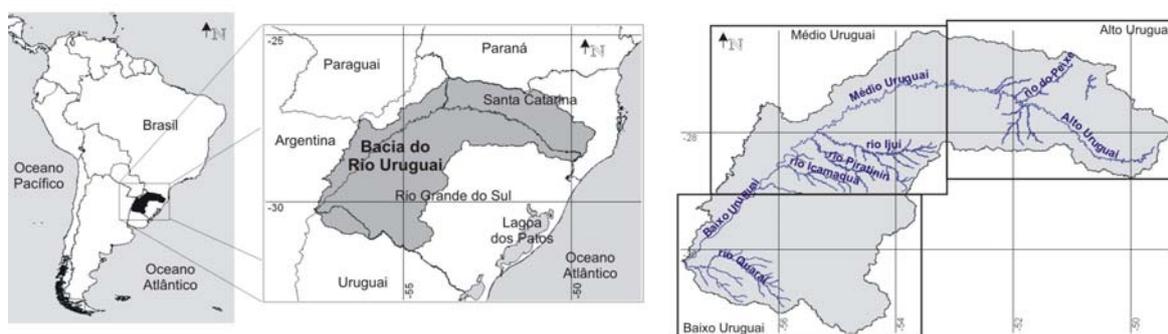


Figura 3 – Localização da bacia do rio Uruguai e indicação dos trechos de rio digitalizados a partir de imagens de satélite.

#### 4. Resultados e discussão

O primeiro questionamento dos resultados pode ser feito qualitativamente, comparando o traçado dos trechos de rio extraídos automaticamente com a imagem raster de áreas de drenagem acumuladas. Tomando o trecho apresentado na **Figura 4** como exemplo, observa-se que a composição de todos os trechos de rio extraídos corresponde exatamente à rede de drenagem gerada, não havendo omissão de nenhum trecho (apenas os trechos de rio referentes às células de cabeceira não são contabilizados). Para quaisquer dois pontos de montante e jusante, verifica-se que existe continuidade ao longo dos trechos de rio que os une. Isso é alcançado pela consideração dos sub-trechos de jusante e pela marcação dos pixels contabilizados durante o traçado.

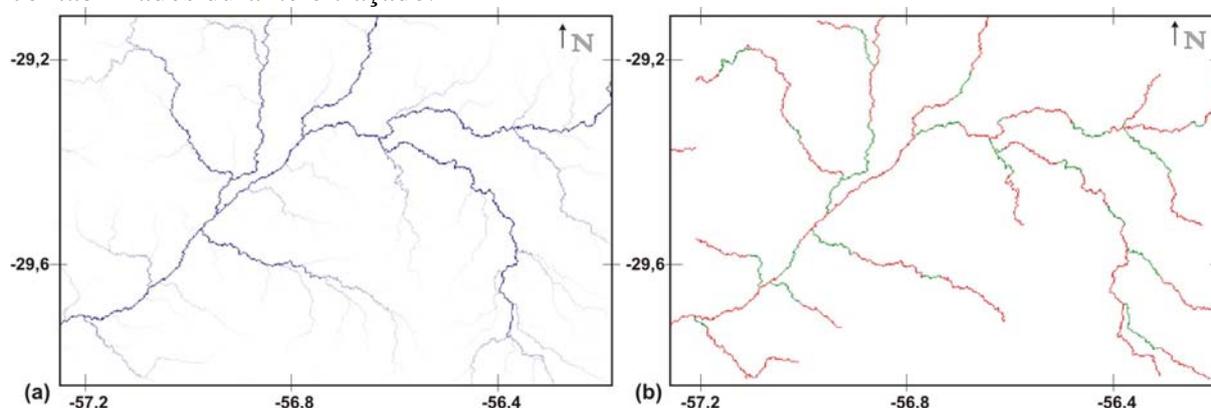


Figura 4 – Imagens raster geradas para a bacia do rio Uruguai: (a) Áreas de drenagem acumuladas de alta resolução (tons mais escuros indicam maiores áreas); (b) traçado dos trechos de rio cujos comprimentos foram extraídos e associados às células (em vermelho sub-trechos de montante e em verde os de jusante).

A avaliação quantitativa dos comprimentos extraídos automaticamente pela metodologia proposta foi realizada pela comparação com os comprimentos medidos na rede de drenagem digitalizada a partir de imagens de satélite (**Figura 5**). De forma geral os comprimentos extraídos pela metodologia proposta estiveram em concordância e com valores próximos aos valores medidos dos rios digitalizados de imagens de satélite. O coeficiente de correlação (R2) foi superior a 0,95. Deve-se ressaltar a variação dos comprimentos dos trechos de rio associados às células, atingindo mais de 60 km em alguns casos, valor bem superior à dimensão da célula (10 km). Isso é devido à consideração dos sub-trechos a jusante dos pixels exutórios, localizados fora da célula, e ilustra o quanto a simplificação de adoção de um valor constante igual à dimensão da célula para todos os trechos de rio está distante da realidade.

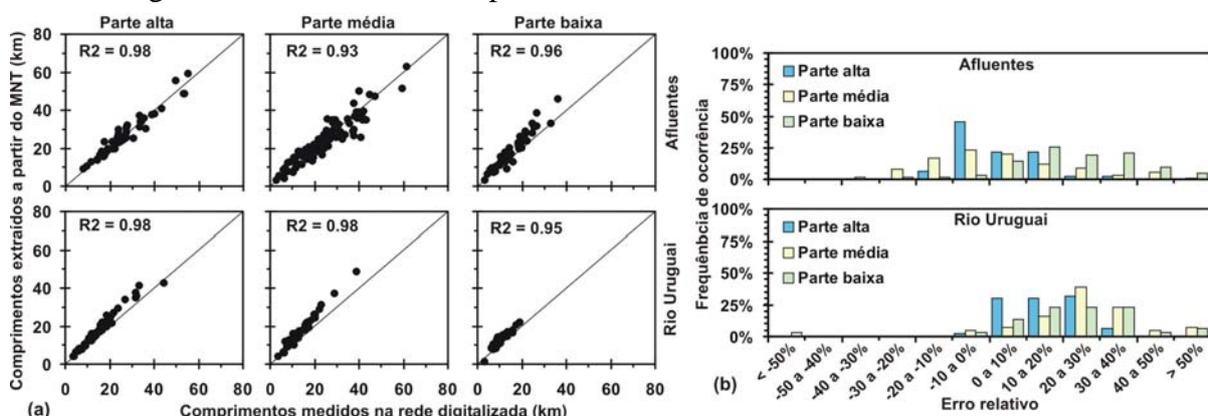


Figura 5 – (a) Comparação entre comprimentos dos trechos de rio extraídos a partir do MNT e medidos na rede de drenagem digitalizada sobre imagens de satélite (linha 1:1 e coeficiente R2 também indicados); (b) Distribuição de frequência de ocorrência do erro relativo dos comprimentos extraídos.

Observa-se que houve uma tendência de superestimativa dos comprimentos, principalmente na parte baixa da bacia, sendo mais pronunciada nos trechos referentes ao rio Uruguai. Por exemplo, nos afluentes da parte alta da bacia, em cerca de 89% dos trechos analisados o erro relativo ficou entre -10% e 10%. Considerando as células localizadas no rio Uruguai, esse percentual foi reduzido para 62%. Já na parte baixa da bacia, uma superestimativa nos comprimentos variando de 10% a 40% foi verificada em 65% das células localizadas nos afluentes e em 70% das células no rio Uruguai. A tendência de superestimativa decorre da dificuldade em identificar o caminho de fluxo a partir do MNT em regiões onde o gradiente topográfico é pequeno ou nulo, como a parte baixa da bacia. O algoritmo de geração de direções de fluxo tende a gerar um caminho de drenagem mais longo do que o real, ocorrendo uma sinuosidade artificial. Isso também acontece, e de forma mais pronunciada, nos trechos de rio ao longo do rio Uruguai, em virtude da grande largura do rio em relação à dimensão do pixel (**Figura 6**). O rio Uruguai tem largura variando entre 100 m a 1000 m e, dessa forma, ocupa mais de um pixel no MNT de resolução igual a 100 m. Para o algoritmo de geração de direções de fluxo, os pixels que representam o rio passam a constituir uma área plana, e um efeito “zig-zag” ocorre na drenagem extraída como se percebe na referida figura.

## 5. Conclusões

A associação dos trechos de rio às células do modelo hidrológico é um procedimento complexo, se for considerado que os diversos trechos de rio associados às células devem

corresponder ou representar fielmente o trecho total do rio. Pelos resultados da aplicação à bacia do rio Uruguai, a metodologia proposta alcançou esse objetivo. Os trechos de rio extraídos e associados a cada célula compõem de forma coerente a rede de drenagem, não havendo omissão nem superposição de trechos. Os valores extraídos de comprimentos de rios foram próximos dos valores medidos a partir de imagens de satélite. Os resultados sugerem ainda que a metodologia proposta tem desempenho dependente da qualidade das direções de fluxo de alta resolução geradas a partir do MNT. Métodos de geração de direções de fluxo que apresentem tratamentos alternativos para áreas planas (por exemplo: Martz e Garbrecht, 1998) e o emprego do procedimento de *stream burning* aplicado ao MNT (por exemplo: Olivera e Raina, 2003; Graham et al., 1999) podem fazer com a rede de drenagem extraída se aproxime mais da drenagem real, incrementando a qualidade dos comprimentos extraídos pelo algoritmo apresentado neste trabalho.

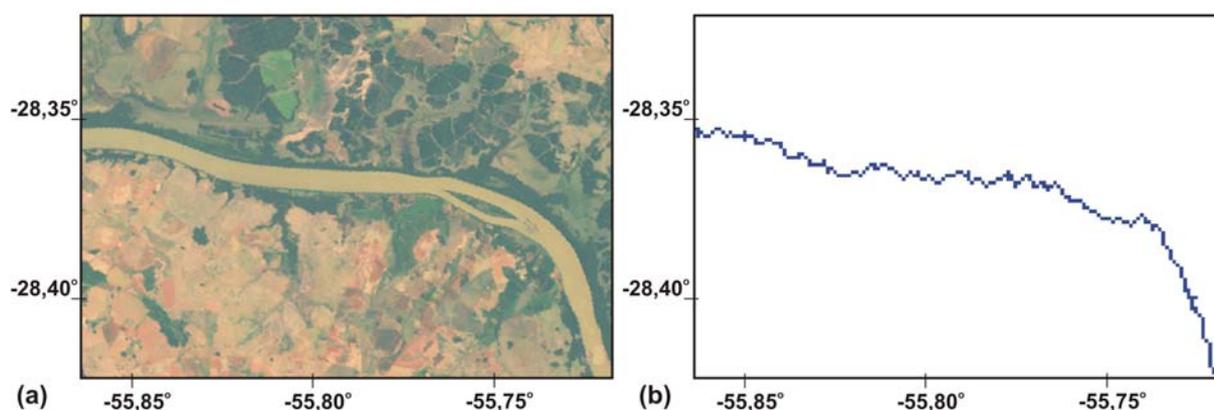


Figura 6 – (a) Composição colorida R3G2B1 de imagem Landsat7 ETM+ de parte da bacia do rio Uruguai, em cujo trecho a largura do rio é cerca de 600 m; (b) Trecho de rio extraído automaticamente a partir do MNT na resolução de 100 m, correspondente à região (a).

A metodologia proposta constitui uma excelente alternativa de extração automática de comprimentos de trechos de rio para a modelagem hidrológica distribuída (células quadradas) de grandes bacias. A principal vantagem reside no fato de ter como informação de entrada apenas o MNT, podendo ser utilizados os dados provenientes do SRTM-90m, disponibilizados gratuitamente na rede mundial de computadores.

## 6. Agradecimentos

Ao CNPq, pela concessão de bolsa de Doutorado ao primeiro autor; ao CGIAR-CSI e ao USGS, respectivamente, pela disponibilização de dados do SRTM-90m e de imagens do satélite Landsat7 ETM+ gratuitamente.

## 7. Referências

Allasia, D.; Silva, B.; Collischonn, W; Tucci, C. E. M. Use of large basin simulation model MGB-IPH in Brazil, paper presented at Symposium S7.6 (New distributed modeling approaches and methods for testing models against observations), VII IAHS Scientific Assembly, Foz do Iguaçu (PR), Brazil, April, 2005.

Burrough, P. A. **Principles of Geographical Information Systems for Land Resources Assessment**, Oxford: Clarendon Press, 1986. 194 p.

CGIAR-CSI, **Void-filled seamless SRTM data V1 - 2004**, International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), The CGIAR Consortium for Spatial Information, Disponível em <<http://srtm.csi.cgiar.org>>. Acesso em 1 ago. 2006.

- Collischonn, W.; Tucci, C. E. M. Hydrological simulation of large basins, **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**, 6(1), 2001.
- Collischonn, W.; Haas, R.; Andreolli, I.; Tucci, C. E. M. Forecasting river Uruguay flow using rainfall forecasts from a regional weather prediction model, **Journal of Hydrology**, 305, p. 87-98, 2005.
- Döll, P.; Lehner, B. Validation of a new global 30-min drainage direction map, **Journal of Hydrology**, 258, p. 214-231, 2002.
- Fairfield, J.; Leymarie, P. Drainage networks from grid digital elevation models, **Water Resources Research**, 27(5), p. 709-717, 1991.
- Fekete, B. M.; Vörösmarty, C. J.; Lammers, R. B. Scaling gridded river networks for macroscale hydrology: development, analysis, and control of error, **Water Resources Research**, 37(7), p. 1955-1967, 2001.
- Garbrecht, J.; Martz, L. W. The assignment of drainage direction over flat surfaces in raster digital elevation models, **Journal of Hydrology**, 193, p. 204-213, 1997.
- Graham, S. T.; Famiglietti, J. S.; Maidment, D. R. Five-minute, 1/2o, and 1o 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), p. 583-587, 1999.
- Jenson, S. K.; Domingue, J. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis, **Photogrammetric Engineering Remote Sensing**, 54(11), p. 1593-1600, 1988.
- Liang, C.; Mackay, D. S. A general model of watershed extraction and representation using globally optimal flow paths an up-slope contributing areas, **International Journal of Geographical Information Science**, 14(4), p. 337-358, 2000.
- Martz, L. W.; Garbrecht, J. The treatment of flat areas and depressions in automated drainage analysis of raster digital elevation models, **Hydrological Processes**, 12, p. 843-855, 1998.
- O'Donnell, G.; Nijssen, B.; Lettenmaier, D. P. A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based, macroscale hydrological models, **Hydrological Processes**, 13, p. 1269-1275, 1999.
- Olivera, F.; Raina, R. Development of large scale gridded river networks from vector stream data, **Journal of the American Water Resources Association**, 2108, p. 1235-1248, 2003.
- Olivera, F.; Lear, M. S.; Famiglietti, J. S.; Asante, K. Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models, **Water Resources Research**, 38(11), 1231, 2002.
- Paz, A. R.; Collischonn, W.; Silveira, A. L. L. Improvements in large scale drainage networks derived from digital elevation models, **Water Resources Research**, 42, W08502, 2006.
- Quinn, P.; Beven, K.; Chevallier, P.; Planchon, O. The prediction of hillslope flow paths for distributed hydrological modeling using digital terrain models, **Hydrological Processes**, 5, p. 59-79, 1991.
- Reed, S. M. Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling, **Water Resources Research**, 39(9), 1238, 2003.
- Shaw, D.; Martz, L. W.; Pietroniro, A. A methodology for preserving channel flow networks and connectivity patterns in large-scale distributed hydrological methods, **Hydrological Processes**, 19, p. 149-168, 2005-a.
- Shaw, D.; Martz, L. W.; Pietroniro, A. Flow routing in large-scale models using vector addition, **Journal of Hydrology**, 307, 38-47, 2005-b.
- Tarboton, D. G. A new method for the determination of flow directions and upslope areas in grid digital elevation models, **Water Resources Research**, 33(2), p. 309-319, 1997.
- Tianqi, A.; Takeuchi, K.; Ishidaira, H.; Yoshitani, J.; Fukami, K. Development and application of a new algorithm for automated pit removal for grid DEMs, **Hydrological Sciences Journal**, 48(6), p. 985-997, 2003.
- Tribe, A. Automated recognition of valley lines and drainage networks from grid digital elevation models: a review and a new method, **Journal of Hydrology**, 139, p. 263-293, 1992.
- USGS, U.S. Geological Survey. **Landsat Project**. Disponível em <<http://landsat.usgs.gov/index.php>>. Acessado em 1 set. 2006.
- Wang, M.; Hjelmfelt, A. T.; Garbrecht, J. DEM aggregation for watershed modeling, **Journal of the American Water Resources Association**, 36(3), p. 579-584, 2000.