

GERAÇÃO DE DIREÇÕES DE FLUXO PARA MODELAGEM HIDROLÓGICA DE GRANDE ESCALA

Adriano Rolim da Paz¹; Walter Collischonn² & Carlos E. M. Tucci³

RESUMO Existe um crescente interesse pela hidrologia e pela modelagem hidrológica de grandes bacias, motivado por estudos envolvendo mudanças climáticas, previsão hidrológica, impacto de modificações de uso e ocupação do solo, etc. Tais modelos dividem a bacia estudada em células quadradas e têm como um dos planos de informação de entrada as direções de fluxo em cada célula, indicando para qual célula vizinha ocorre o escoamento. Neste artigo é descrito um algoritmo para geração automática de direções de fluxo nas células de um modelo hidrológico, a partir das direções de fluxo e áreas de drenagem acumuladas determinadas para uma grade de maior resolução, as quais por sua vez são geradas com base no Modelo Numérico do Terreno (MNT) correspondente. Tomando como exemplo a Bacia do Rio Grande (área de drenagem de 145.000 km²), mostra-se como o emprego de tal algoritmo incrementa a qualidade da rede de drenagem gerada, tornando desnecessárias correções manuais posteriores, como é usual no caso do emprego do procedimento de determinar as direções de fluxo a partir do MNT agregado para a resolução do modelo hidrológico. O algoritmo descrito tem ainda flexibilidade para ajustar a rede gerada de modo não haja tendência para trechos ortogonais ou diagonais.

ABSTRACT Large basin distributed hydrologic modeling shows intense development nowadays motivated by climate change studies, hydrologic forecasting and land use change impacts. Such models divide the basin into grid-square cells and require flow direction in each cell as one of the input data layers, indicating for which neighboring cell the water will flow out of a cell. This paper describes an algorithm to automatically assign flow directions to hydrologic model grid cells based on flow directions and accumulated drainage area of a higher-resolution grid cell, which by your turn were calculated according to its correspondent digital elevation model (DEM). Considering the Grande river basin (drainage area of 145.000 km²) as the case study, it is shown how the use of this algorithm provides a much better river network, in such a way that further manual adjustments become useless – these adjustments are often necessary when generating flow directions directly from the DEM aggregated to the resolution of hydrologic model grid cell. The algorithm presented in this paper has flexibility to control the tendency toward orthogonal or diagonal flows in the generated river network.

Palavras-chave: modelagem hidrológica de grandes bacias, direção de fluxo, rede de drenagem

¹ Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH/UFRGS), Av. Bento Gonçalves, 9500. Caixa Postal 15029. CEP 91501-970. Porto Alegre (RS). Email: adrianorpaz@yahoo.com.br.

² IPH/UFRGS. Email: collischonn@uol.com.br.

³ IPH/UFRGS. Email: tucci@iph.ufrgs.br.

INTRODUÇÃO

A modelagem hidrológica distribuída de grandes bacias (áreas de drenagem superior a 10.000 km²) é uma área relativamente recente da hidrologia, mas que vem se desenvolvendo intensamente. A motivação reside principalmente nos estudos acerca das mudanças climáticas, impacto das modificações de uso do solo e de previsão de vazões. Nesse sentido, foi desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas o Modelo de Grandes Bacias (MGB-IPH) (Collischonn, 2001; Collischonn e Tucci, 2001), o qual já foi aplicado a diversas bacias brasileiras (Allasia *et al.*, 2005; Silva *et al.*, 2004; Tucci *et al.*, 2003; Collischonn e Tucci, 2001).

Assim como outros modelos distribuídos, o modelo MGB-IPH utiliza uma grade retangular para dividir a bacia em células, ligadas entre si por canais de drenagem, procurando levar em conta a heterogeneidade espacial das características físicas da bacia e permitir simular o transporte de água pelos rios. A determinação da rede de drenagem no modelo hidrológico é realizada com a definição da direção de fluxo em cada célula, assumindo-se que o escoamento da água segue da célula considerada para uma das suas oito vizinhas. Uma questão importante reside na diferença entre a baixa resolução das células adotadas pelo modelo hidrológico (geralmente 10 km ou 0,1° para grandes bacias) e a alta resolução do modelo numérico do terreno (MNT) disponível (geralmente informações com resolução de 90 m). Por questões de limitação computacional, torna-se impraticável a simulação de bacias de dezenas de milhares de quilômetros quadrados com células de dimensão inferior a alguns quilômetros e, por isso, diminui-se a resolução da grade na aplicação do modelo hidrológico.

Um dos planos de informação que alimentam o modelo hidrológico consiste nas direções de fluxo de cada célula. Um procedimento simples consiste em agregar as informações do MNT de alta resolução e gerar um MNT de baixa resolução – resolução igual àquela adotada na modelagem hidrológica – e a partir deste MNT gerar as direções de fluxo. Para tanto, utiliza-se a regra da maior declividade, atribuindo o sentido do escoamento para a célula vizinha que apresente a maior diferença de elevação do terreno em relação à célula em questão dividida pela distância entre elas, seguida do tratamento de situações particulares (Jenson e Domingue, 1988).

Esse procedimento de agregação do MNT e posterior definição das direções de fluxo tem gerado redes de drenagem pouco precisas (Shaw *et al.*, 2005; Reed, 2003), que demandam excessivas correções manuais em muitos casos. Por exemplo, em aplicações do modelo MGB-IPH às bacias do Rio São Francisco, Cuiabá e Grande, a correção manual das direções de fluxo para alimentar o modelo hidrológico foi imprescindível, visto que situações onde a rede de drenagem gerada estava visivelmente incoerente ocorreram com frequência. Um exemplo é apresentado na Figura 1, para um trecho na Bacia do Rio Grande.

Uma metodologia que tem produzido uma rede de drenagem mais coerente com a rede de drenagem observada é a derivação das direções de fluxo em uma grade de baixa resolução (resolução do modelo hidrológico) a partir das direções de fluxo geradas para o MNT de alta resolução. Alguns algoritmos foram propostos na literatura seguindo tal metodologia, como por exemplo Shaw *et al.* (2005), Reed (2003), Olivera *et al.* (2002), Wang *et al.* (2000) e O'Donnell *et al.* (1999).

Neste artigo, é descrito um algoritmo adaptado daquele proposto por Reed (2003) e sua aplicação à bacia do Rio Grande (MG/SP), para a geração de direções de fluxo em uma grade de 10 km x 10 km (ou $0,1^\circ \times 0,1^\circ$) a partir das direções de fluxo de duas grades de maior resolução (250 m x 250 m e 500 m x 500 m). O algoritmo de Reed (2003) foi escolhido entre os demais por apresentar vantagens como maior flexibilidade em controlar a tendência de diagonalidade da rede traçada e permitir trabalhar com grades de alta e baixa resolução em sistemas de coordenadas distintos.

A motivação principal deste trabalho foi desenvolver uma rotina de geração automática de direções de fluxo e rede de drenagem, baseada no algoritmo de Reed (2003), para uso na modelagem hidrológica distribuída de grandes bacias (em particular no MGB-IPH), fazendo com que situações como a da Figura 1 se tornem raras, o que representa uma redução sensível no tempo de preparo das informações para aplicação do modelo hidrológico.

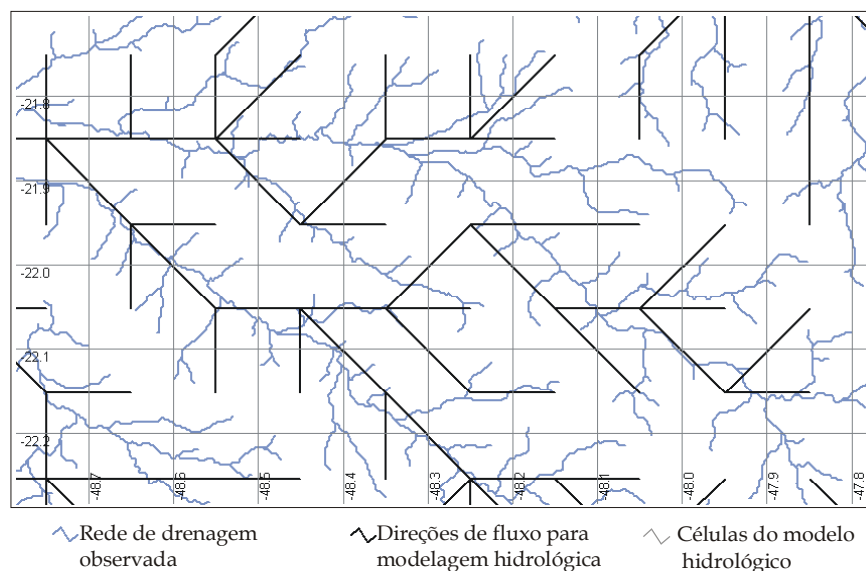


Figura 1 – Exemplo de rede de drenagem traçada automaticamente para uso na modelagem hidrológica (células de $0,1^\circ \times 0,1^\circ$) apresentando sérias incoerências em relação à drenagem observada (trecho da bacia do Rio Grande).

METODOLOGIA

Descrição do algoritmo

Antes de iniciar a descrição do algoritmo, convém estabelecer que, daqui por diante, para maior clareza no texto os elementos da grade de baixa resolução serão referidos como células e os elementos da grade de alta resolução serão denominados de pixels (Figura 2). Superpondo as duas grades, tem-se em cada célula um mesmo número de pixels, desde que as resoluções sejam múltiplas (por exemplo, em uma célula de 10 km tem-se 1.600 pixels de 250 m).

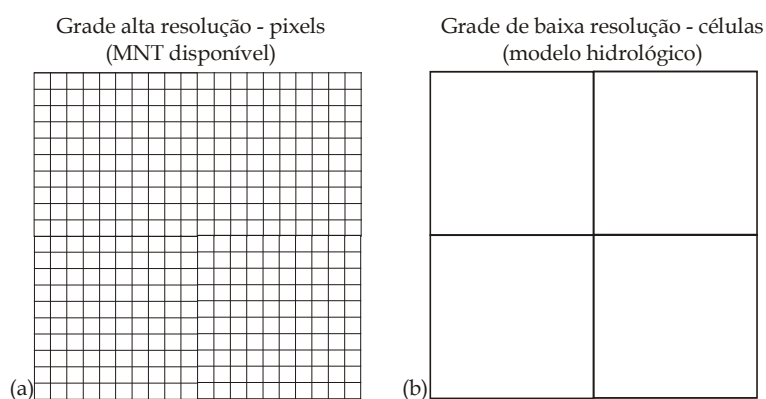


Figura 2 – Exemplo de grades de (a) baixa resolução (pixels) do Modelo Numérico do Terreno disponível e (b) de alta resolução (células) empregada pelo modelo hidrológico.

O algoritmo proposto por Reed (2003) para gerar direções de fluxo em uma grade de baixa resolução, assim como outros algoritmos similares que constam na literatura, utiliza dois planos de informação já existentes: (1) direções de fluxo de alta resolução; (2) áreas acumuladas de drenagem para essa grade de alta resolução (ou número de pixels que drenam para cada pixel). A diferença principal entre o procedimento de aplicação de um algoritmo como o apresentado neste texto em relação ao procedimento de gerar as direções de fluxo diretamente do modelo numérico do terreno, agregado para a resolução do modelo hidrológico, pode ser entendida comparando os passos de cada procedimento ilustrados na Figura 3.

A obtenção da direção de fluxo em cada pixel (grade de alta resolução) pode ser realizada por procedimentos usuais como o descrito por Jenson e Domingue (1988), o qual atribui o sentido do escoamento de um pixel para um de seus oito vizinhos com base na diferença de cota ponderada pela distância entre eles. Como resultado, a cada pixel é atribuído um número indicativo de uma das oito direções de fluxo possíveis (Figura 4). Seguindo as direções de fluxo, obtém-se a quantidade de pixels de montante que drenam para cada um dos pixels, gerando o segundo plano de informações requerido pelo algoritmo. É importante ressaltar que alguns programas computacionais comerciais de geoprocessamento dispõem de rotinas que empregam algoritmos similares ao já referido e geram

automaticamente tais planos de informação, como é o caso do ArcView (Maidment, 2002) e do Idrisi.

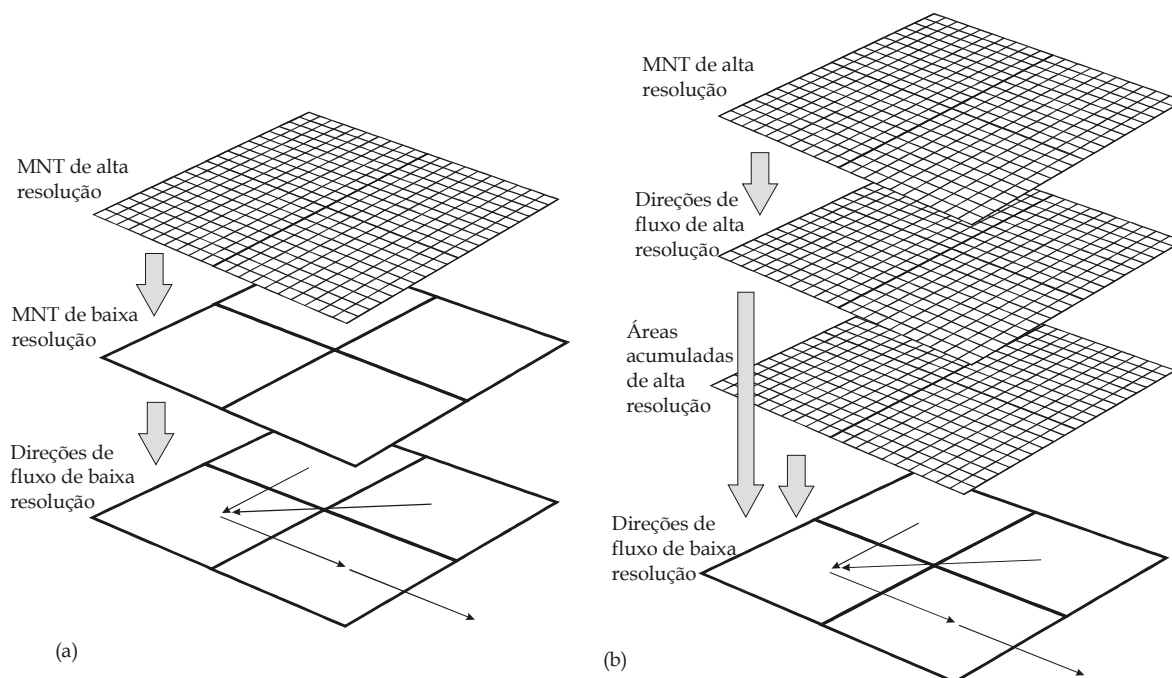


Figura 3 – Passos para geração das direções de fluxos segundo dois procedimentos distintos: (a) agrega-se o MNT de alta resolução produzindo o MNT de baixa resolução, a partir do qual geram-se as direções de fluxo; (b) geram-se as direções de fluxo e em seguida as áreas acumuladas referentes ao MNT de alta resolução e com base em tais planos de informação determinam-se as direções de fluxo para a grade de baixa resolução.

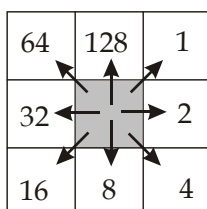


Figura 4 – Indicação das oito direções de fluxo possíveis para cada pixel, com os respectivos códigos.

Determinação do pixel exutório em cada célula

O primeiro passo do algoritmo consiste em definir em cada célula qual o pixel exutório. O algoritmo original proposto por Reed (2003) define o pixel exutório como aquele que drena a maior área acumulada (ou o maior número de pixels) dentre todos os localizados na célula. No algoritmo aqui apresentado, foi introduzido um critério adicional, segundo o qual o trecho principal do fluxo a montante do pixel exutório deve percorrer um “caminho mínimo” dentro da célula. Esse critério foi incluído visando situações, por exemplo, em que por uma célula passam dois trechos de rio, sendo que o maior deles (maior área acumulada de drenagem) passa “ligeiramente” pela célula (Figura 5). Na situação da referida figura, o pixel exutório não deve ser aquele de maior área acumulada (pixel A), mas sim o pixel D.

Inicialmente, identifica-se na célula qual o pixel que tem a maior área acumulada de drenagem, tornando-o um pixel exutório em potencial. Em seguida percorre-se em sentido contrário o caminho do fluxo principal a montante dele até sair da célula ou até não haver mais pixels a montante. Caso a extensão desse caminho seja superior a um valor mínimo pré-definido, o pixel exutório testado é aprovado. Caso contrário, ele é descartado e procura-se dentre os demais pixels aquele com maior área de drenagem acumulada, repetindo-se a verificação do percurso mínimo a montante dentro da célula. O procedimento se repete até encontrar o pixel de maior área de drenagem que satisfaça o critério do percurso mínimo.

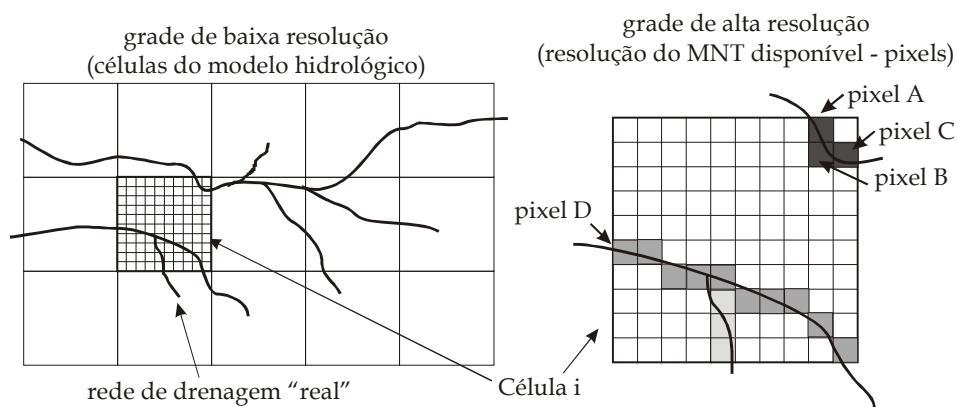


Figura 5 – Exemplo de seleção de pixel exutório em uma célula i (após descartar os pixels A, B e C, o pixel exutório foi escolhido como o pixel D, por atender a todos os critérios).

Para percorrer em sentido contrário o caminho do fluxo principal a montante de um pixel potencial exutório, identifica-se um por um os pixels a montante, sempre selecionando o próximo de montante como aquele com maior área acumulada de drenagem dentre os vizinhos que drenem para o anterior.

Deve ser enfatizado que, em cada célula, o pixel de maior área de drenagem está sempre localizado nas bordas da célula (primeiras e últimas linhas e colunas de pixels dentro da célula), devido à restrição de apenas uma direção em cada pixel e à remoção de depressões no modelo numérico do terreno de alta resolução (O'Donnell *et al.*, 1999). A limitação da busca pelo pixel exutório às bordas da célula diminui o custo computacional e evita que pixels a montante de um pixel potencial exutório já reprovado no critério do percurso mínimo sejam eleitos como potenciais exutórios, descartando-os antecipadamente.

No exemplo da Figura 5, o pixel A foi selecionado inicialmente como potencial pixel exutório (pelo comprimento do rio a montante, percebe-se que a área de drenagem acumulada nesse pixel é a maior dentre todos os pixels da célula i), mas depois de percorrido o caminho do fluxo para montante verificou-se que não atendeu ao critério do percurso mínimo. O próximo pixel escolhido como potencial exutório foi o pixel C, e não o pixel B, visto que este não está localizado na borda

da célula, embora o pixel B apresente área de drenagem acumulada maior do que o pixel C. Como não existe caminho do fluxo a montante do pixel C no interior da célula, esse pixel também foi descartado. Dentre os demais pixels, o pixel D possui a maior área de drenagem e atendeu ao critério do caminho, sendo escolhido como pixel exutório da célula em questão.

Atribuição das direções de fluxo em cada célula

Para atribuir uma das oito direções de fluxo (Figura 4) a uma determinada célula, percorre-se o caminho do fluxo a partir do seu pixel exutório até alcançar o pixel exutório de uma célula vizinha e avalia-se a área de drenagem incremental desse trecho pela diferença entre as áreas de drenagem acumuladas do pixel exutório inicial e do pixel exutório encontrado. Caso a área incremental seja superior a um valor mínimo pré-definido, atribui-se a direção da célula analisada para a célula a qual pertence o pixel exutório encontrado (Figura 6). Se o critério da área incremental mínima não foi atendido, continua-se a percorrer o caminho do fluxo, de pixel em pixel, até alcançar outro pixel exutório de alguma célula vizinha cuja área incremental relativa ao pixel da célula inicial seja superior ao valor mínimo.

Por exemplo, no caso da Figura 6, para determinar a direção de fluxo da célula 2, percorre-se o caminho do fluxo de pixel em pixel a partir do seu pixel exutório (pixel E2) e, ao atingir o pixel exutório da célula 3 (pixel E3), é avaliada a área incremental entre tais pixels. Caso ela seja superior ao valor mínimo estabelecido, a célula 2 vai ter a direção apresentada na Figura 6-b. Caso não atenda ao critério da área, continua-se a percorrer o caminho do fluxo até alcançar o pixel E4 (exutório da célula 4). Supondo que a área incremental entre os pixels E4 e E1 seja superior à mínima, a direção da célula 2 é aquela mostrada na Figura 6-c

Em diversas situações o caminho percorrido sai da vizinhança da célula (região formada pelas oito células vizinhas) sem alcançar algum pixel exutório de células vizinhas que atenda ao critério de área incremental mínima. Se o caminho percorrido passou pelo pixel exutório de alguma célula antes de sair da vizinhança, a direção da célula é atribuída para a célula à qual pertence o último pixel exutório encontrado. Quando nenhum pixel exutório pertence ao caminho percorrido, atribui-se a direção do fluxo para a célula vizinha pela qual o caminho saiu da vizinhança. No exemplo da Figura 6, para a célula 2, se ao alcançar o pixel E4 o critério da área também não foi atendido, continua-se a percorrer o caminho do fluxo. Entretanto, após o pixel E4 o caminho já está fora da vizinhança e o percurso é interrompido. Como o pixel E4 foi o último pixel exutório encontrado durante o trajeto, a direção da célula 2 também vai ser aquela da Figura 6-c. Isso constitui outra adaptação do algoritmo proposto por Reed (2003), visto que neste a direção é atribuída à primeira célula do caminho percorrido, independente de ter passado por algum pixel exutório ou não, com a

ressalva que o caminho continua a ser percorrido mesmo ao sair da vizinhança, verificando se ele retorna a jusante para alguma célula vizinha.

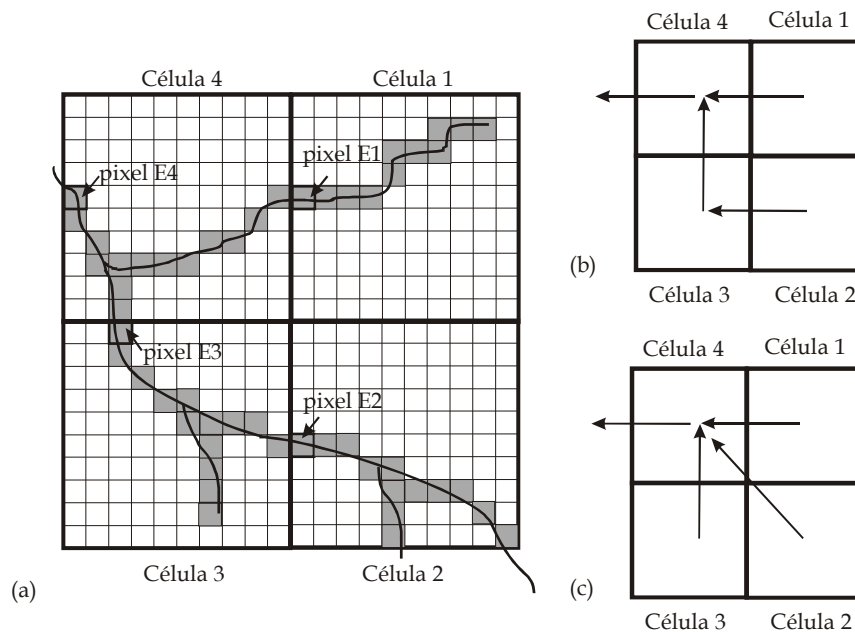


Figura 6 – Exemplo de definição da direção de fluxo nas células (grade de baixa resolução) pelo algoritmo apresentado, com base nas informações dos pixels (grade de alta resolução).

Um caso raro porém possível ocorre quando o pixel exutório da célula drena diretamente para fora da área de estudo, isto é, o caminho percorrido saiu da região analisada logo no primeiro pixel sem passar por nenhuma célula vizinha. Nesse caso, a direção é atribuída para fora da região de estudo – supõe-se que a área de interesse (bacia) esteja totalmente contida dentro dos limites dos planos de informação que estão sendo trabalhados.

Correção dos cruzamentos

Como previsto por Reed (2003), é possível que, ao final da atribuição das direções de fluxo em todas as células, resultem trechos de drenagem que se cruzam. Segundo o mesmo autor, embora isso não prejudique a aplicação do modelo hidrológico, convém fazer um tratamento e desfazer os cruzamentos por questões estéticas.

Para desfazer os cruzamentos, cada situação é tratada escolhendo-se um dos dois tipos de correção apresentados na Figura 7, o que significa alterar a direção de uma das duas células cujas direções se cruzam e permanecer inalterada a direção da outra. No algoritmo de Reed (2003), tal escolha é arbitrariamente definida como a correção tipo 1, desde que não gere uma situação em que duas células drenem uma para outra (situação irreal), o que levaria à adoção da solução 2. No algoritmo aqui descrito, foi introduzido o critério da maior área de drenagem acumulada para escolha da solução 1 ou 2, ou seja, dentre as duas células cujas direções se cruzam, altera-se a direção daquela cuja área acumulada seja menor. Caso a solução escolhida gere a situação irreal de

duas células drenando uma para a outra, adota-se a outra solução. Por exemplo, no caso do cruzamento exemplificado na situação da Figura 7-a, caso a célula inferior direita tenha maior área acumulada que a célula inferior esquerda, esta tem sua direção alterada como ilustra a correção tipo 1 e, caso contrário, a correção será da forma tipo 2.

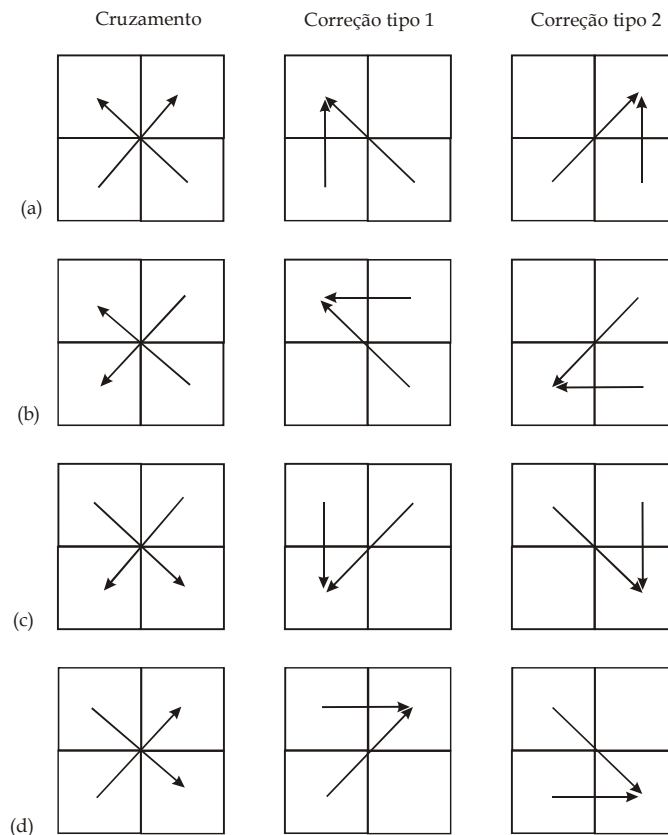


Figura 7 – Tipos de cruzamentos possíveis que podem ocorrer após geração das direções de fluxo e as correções adotadas.

Seleção da área incremental mínima

A adoção do critério da área incremental mínima dentro do procedimento de definição do pixel exutório em cada célula é uma vantagem do algoritmo aqui descrito, segundo Reed (2003), em relação a similares como os propostos por Olivera *et al.* (2002), Wang *et al.* (2000) e O'Donnell *et al.* (1999), tornando-o flexível quanto à tendência em gerar redes de drenagem com mais trechos diagonais ou ortogonais. No exemplo da Figura 6, a direção de fluxo da célula 2 vai ser ortogonal (fluxo para a célula 3 – Figura 6-b) ou diagonal (fluxo para a célula 4 – Figura 6-c) conforme a área incremental mínima escolhida. Valores maiores estabelecidos para tal parâmetro resultam na direção diagonal (Figura 6-c) – é necessário percorrer um maior caminho de fluxo até encontrar um pixel exutório que proporcione uma área incremental que supere o valor estabelecido. Portanto, quanto maior a área incremental mínima, maior a tendência da rede de drenagem apresentar trechos diagonais no que diz respeito à grade de baixa resolução (Reed, 2003), empregada na modelagem hidrológica.

Segundo Olivera *et al.* (2002), embora em algumas áreas a topografia do terreno possa induzir a um escoamento preferencial em uma direção específica, é de se esperar que isso não ocorra quando considerada toda a área de drenagem modelada. Tal autor sugere que a rede de drenagem traçada deve apresentar uma distribuição equilibrada entre trechos diagonais e ortogonais, de forma que o comprimento total dos trechos na diagonal seja igual ao comprimento total dos trechos na ortogonal. Em outras palavras, como um trecho diagonal tem comprimento igual a $\sqrt{2}$ vezes um trecho ortogonal, a situação a ser buscada é que a razão entre o número de trechos ortogonais e o número de trechos diagonais seja orto/diag = 1,41. Se essa relação for superior a 1,41, a rede de drenagem gerada apresenta maior tendência à ortogonalidade dos trechos, enquanto valores inferiores significam maior diagonalidade na rede.

Ao gerar direções de fluxo para diferentes resoluções do modelo hidrológico (células de 300 m a 4 km) em duas bacias distintas, Reed (2003) analisou qual a área incremental mínima que proporcionou a relação orto/diag = 1,41 em cada caso (Figura 8). Para tal conjunto de pontos, fez-se o ajuste de uma curva polinomial, permitindo a extrapolação para o caso de grade de células de menor resolução do que aquelas testadas (células de tamanho superior a 4 km). Assim, tem-se que para obter uma rede de drenagem com resolução de 10 km que apresente uma relação equilibrada entre trechos ortogonais e diagonais deve ser adotada uma área mínima incremental de 330 km² no algoritmo de geração de direções de fluxo.

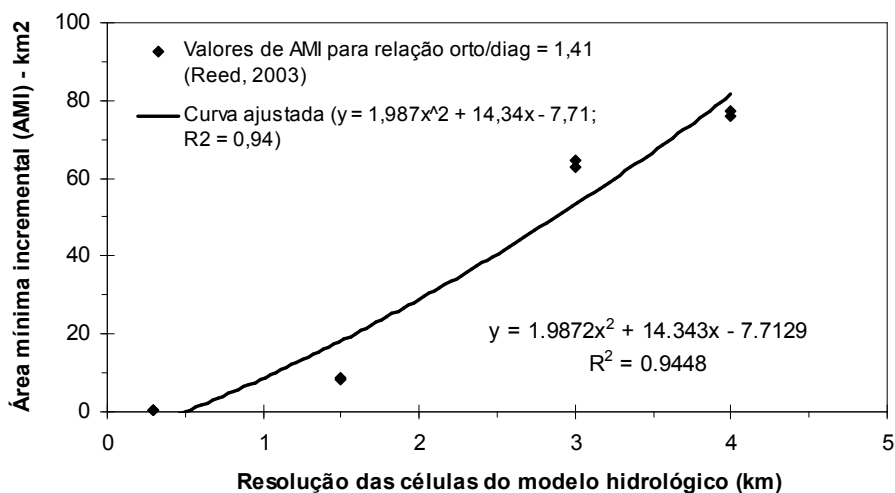


Figura 8 – Ajuste de curva relacionando a resolução das células do modelo hidrológico e a área mínima incremental que produza uma relação orto/diag = 1,41, com base nos dados de Reed (2003).

Seleção do percurso mínimo

O critério do percurso mínimo foi introduzido visando refinar a seleção do pixel exutório, no caso de situações como a comentada na Figura 5, por exemplo. No algoritmo original de Reed (2003), o pixel exutório é escolhido apenas pelo critério da maior área acumulada de drenagem, o que garante que não ocorra “curto-circuito” na rede de drenagem gerada, isto é, que o fluxo

efluente de uma célula não retorne à mesma. Entretanto, com a inclusão do critério do percurso mínimo para definição do pixel exutório, em alguns casos raros pode ocorrer tal problema. Recomenda-se que o tamanho mínimo do percurso a ser empregado no algoritmo seja testado e analisado em cada caso. Embora ainda esteja sendo realizada uma análise mais profunda atualmente, percursos de até 1/8 do tamanho de uma célula não ocasionaram os problemas descritos, enquanto valores maiores produziram “curto-circuito” na rede de drenagem em alguns casos.

EXEMPLO DE APLICAÇÃO DO ALGORITMO: BACIA DO RIO GRANDE

Caracterização da Bacia do Rio Grande e dados de entrada do algoritmo

A bacia do Rio Grande tem uma área de cerca de 145.000 km², estando entre os Estados de Minas Gerais e São Paulo (bacia 61 na classificação das bacias brasileiras adotada pela Agência Nacional de Águas), sendo o Rio Grande o principal formador do Rio Paraná (Figura 9). O modelo hidrológico distribuído MGB-IPH será aplicado a essa bacia, fazendo parte de um projeto de pesquisa visando a previsão de vazões afluentes a reservatórios hidrelétricos.

Para a região de estudo, assim como para quase todo o globo terrestre, estão disponíveis dados de modelo numérico do terreno com resolução de 90 m, provenientes do *NASA Shuttle Radar Topographic Mission* (SRTM) e disponibilizados gratuitamente pelo *CGIAR-CSI GeoPortal* (CGIAR-CSI, 2005). Por outro lado, para a modelagem hidrológica serão usadas células de 10 km x 10 km. Portanto, o algoritmo de geração de direções de fluxo nas células de 10 km deveria ser alimentado com as direções de fluxo e áreas acumuladas calculadas para um MNT de resolução 100 m – conversão do MNT de 90 m para 100 m devido à exigência de multiplicidade entre as resoluções alta (100 m) e baixa (10 km).

Entretanto, utilizando os programas computacionais comercialmente disponíveis, não foi possível gerar as direções de fluxo e áreas acumuladas referentes ao MNT de 100 m, por limitações computacionais. A maior resolução com que foi possível realizar tal tarefa foi a de 250 m, constituindo assim a grade de alta resolução de entrada no algoritmo. Para efeito de comparação quanto à diferença de qualidade na rede de drenagem gerada, também foi analisada a aplicação do algoritmo baseado nas informações referentes a uma grade de 500 m de resolução (Tabela 1).

Com o objetivo de avaliar a influência do valor da área mínima incremental sobre as direções de fluxo geradas, foram testados três valores para tal parâmetro: 100 km², 330 km² e 500 km². O valor de 330 km² foi escolhido por ser aquele que, segundo a curva ajustada na Figura 8, proporciona uma relação equilibrada entre os trechos ortogonais e diagonais (orto/diag = 1,41) gerados para células de 10 km. Os outros dois valores foram então selecionados arbitrariamente

para comparação. Quanto ao tamanho do percurso mínimo – segundo critério para definição dos pixels exutórios, adotou-se um comprimento de 5 pixels, sendo analisada também a situação de não inclusão desse critério (ou percurso mínimo de comprimento nulo). Ao todo, foram geradas e analisadas oito redes de drenagem sendo sete aplicando o algoritmo apresentado neste texto e uma rede gerada diretamente do MNT agregado para a resolução de 10 km (Figura 3-a). A comparação entre a avaliação da rede de drenagem gerada por tal procedimento (rede tipo E – Tabela 1) e as demais (todas geradas pelo algoritmo) permite inferir acerca do ganho de qualidade na rede traçada com o emprego do algoritmo em relação a outra metodologia.

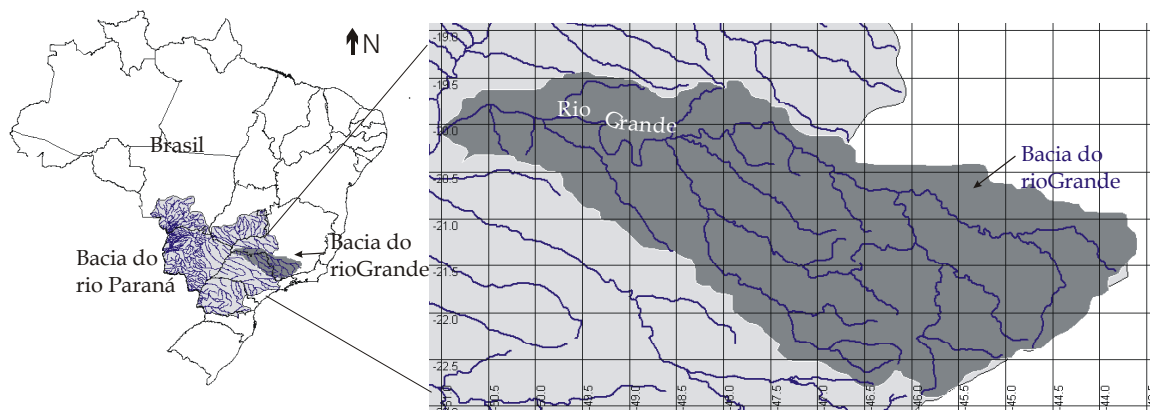


Figura 9 – Localização da Bacia do Rio Grande, sub-bacia do Bacia do Rio Paraná.

Tabela 1 – Descrição do método e parâmetros adotados para geração das redes de drenagem com resolução (célula) de 10 km na bacia do Rio Grande.

Código	Método de geração das direções de fluxo	Informações de alta resolução (pixel) para entrada no algoritmo	Área mínima incremental para definição do pixel exutório	Percurso mínimo para definição do pixel exutório
A1	Uso do algoritmo	250 m	100 km ²	Nulo
A2	Uso do algoritmo	250 m	100 km ²	5 pixels
B1	Uso do algoritmo	250 m	330 km ²	Nulo
B2	Uso do algoritmo	250 m	330 km ²	5 pixels
C1	Uso do algoritmo	250 m	500 km ²	Nulo
C2	Uso do algoritmo	250 m	500 km ²	5 pixels
D	Uso do algoritmo	500 m	330 km ²	Nulo
E	Geração das direções de fluxo direto do MNT agregado para 10 km.			

Análise dos resultados e discussão

Para avaliar a qualidade das direções de fluxo obtidas para a bacia do Rio Grande em cada uma das situações descritas na Tabela 1, foram adotados três métodos:

- comparação das áreas de drenagem calculadas a partir das redes de drenagem traçadas com aquelas fornecidas pela Agência Nacional de Águas (ANA – HidroWeb) em 50 postos fluviométricos e/ou usinas hidrelétricas;

- avaliação da razão entre o número de trechos ortogonais e diagonais (orto/diag);
- sobreposição e análise visual comparativa com o MNT de mais alta resolução (90 m) e com a rede de drenagem traçada para a resolução de 250 m.

A análise das áreas de drenagem é um procedimento prático e usualmente empregado. Entretanto, como ressaltado por Olivera *et al.* (2002), uma boa concordância entre as áreas calculadas e aqueles valores disponíveis supostamente corretos não necessariamente representa uma rede de drenagem traçada em concordância com a observada. A inclusão de áreas indevidas contribuindo para o ponto analisado e a exclusão de outras áreas pode levar a um valor próximo do correto para a área de drenagem (erros que se contrabalançam), embora a rede em si esteja completamente incoerente. Isso pode ser avaliado visualmente, superpondo as direções de fluxo determinadas com a rede de drenagem correta ou mesmo com o Modelo Numérico do Terreno de mais alta resolução. A análise da relação orto/diag permite avaliar a tendência de diagonalidade ou ortogonalidade na rede traçada, mas também não implica necessariamente em concordância desta com a rede de drenagem observada.

Quanto às áreas de drenagem, observa-se claramente o ganho na qualidade do traçado das direções de fluxo de baixa resolução pelo emprego do algoritmo, relativamente à geração direta a partir do MNT de baixa resolução (Figura 10). Em cerca de 56% dos postos analisados, o segundo procedimento (rede de drenagem tipo E) apresentou erro na área de drenagem superior a 25%, sendo que em 38% deles o erro foi superior a 50%. Empregando o algoritmo, o percentual de erros acima de 25% variou entre 20% (esquema tipo B2) e 34% (tipo D). Pela avaliação das áreas de drenagem calculadas, a rede de drenagem tipo B2 apresentou melhor concordância com os valores informados pela ANA. Cabe frisar ainda que a adoção do critério do percurso adicionalmente ao critério da maior área de drenagem reduziu os erros das áreas de drenagem calculadas, pela comparação entre as redes tipo A1 e A2 ou B1 e B2 ou C1 e C2. Por outro lado, como a rede de drenagem tipo D apresentou erros maiores do que as redes A1 a C2, ficou evidenciado que a diminuição da resolução com que é alimentado o algoritmo ocasiona perda na qualidade das direções de fluxo geradas.

A bacia estudada tem área total de 145.000 km² e os postos fluviométricos selecionados têm área de drenagem de ordens de grandeza bem diferentes, variando de 45 km² a 139.900 km². A grade de baixa resolução para a qual foram geradas as direções de fluxo têm células de 10 km x 10 km, com áreas em torno de 100 km² – a área varia conforme a localização geográfica da célula (latitude e longitude). Como esperado, para postos com áreas de drenagem menores (até 1.000 km²), o erro encontrado foi bastante superior aos demais postos, sendo em torno de 50% (Figura 11). Com o emprego do algoritmo (tomando o caso da rede de drenagem B2), para postos com áreas de drenagem acima de 5.000 km², o erro da área calculada foi inferior a 20%, enquanto esse percentual

variou entre 0,7% e 6,1% para postos com área superior a 20.000 km², à exceção do posto fluviométrico UHE Porto Colômbia (código 61796080). Para esse posto, a área informada pela ANA é de 78.400 km², enquanto a área calculada pelo algoritmo foi de 114.400 km² (rede tipo B2). Observando visualmente a rede de drenagem traçada, observa-se total coerência com a observada e com o MNT de mais alta resolução (90 m), sendo a grande diferença entre as áreas (46%) decorrente do fato de que o referido posto está localizado a cerca de 5 km a montante da afluência do rio Mogi-Guaçu ao rio Grande. Como cada célula tem 10 km de extensão, essa afluência foi considerada na mesma célula do posto. Tomando a célula anterior, a montante da confluência, a área de drenagem acumulada é de 75.961 km², o que implica em um erro de apenas 3,1% em relação à área informada pela ANA.

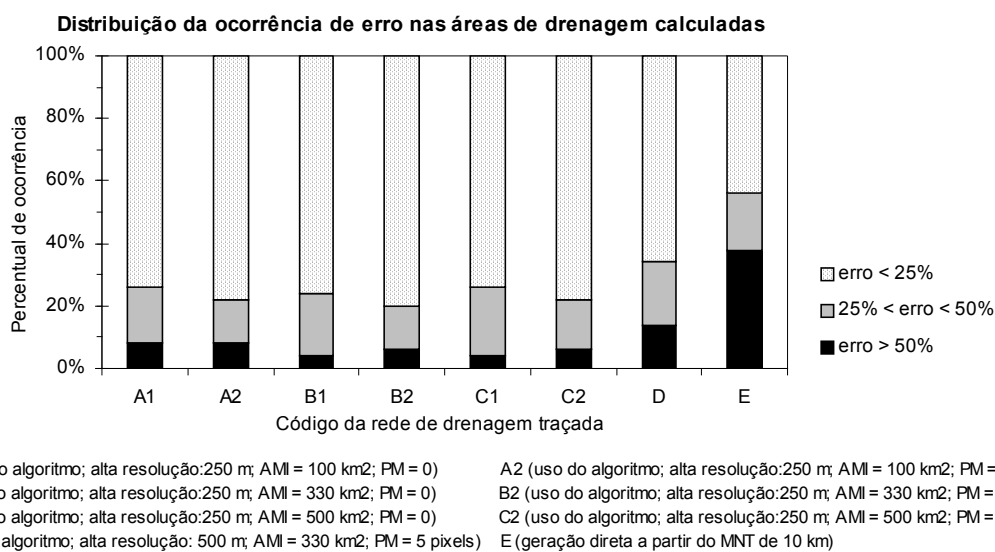


Figura 10 – Percentual de ocorrência de erros nas áreas de drenagem calculadas para cada um dos esquemas de direção de fluxo gerados, relativamente às áreas de drenagem informadas pela ANA.

Quanto à relação orto/diag obtida para cada uma das redes de drenagem traçadas (Figura 12), tem-se que valores mais próximos de 1,41 (indicativo do equilíbrio entre ortogonalidade e diagonalidade na rede) foram alcançados para as redes B1, B2 e D, cuja área mínima incremental adotada (330 km²) foi de valor igual ao ajustado pela curva da Figura 8, confirmando o bom ajuste e validade de tal curva. A adoção de um menor valor para esse parâmetro (100 km²) repercutiu no grande predomínio de trechos ortogonais, sendo a relação orto/diag superior a 2 (casos das redes A1 e A2), ao passo que a adoção do valor de 500 km² não acarretou no predomínio exagerado de trechos diagonais, ficando a relação orto/diag próximo ao valor de equilíbrio (redes C1 e C2). Usando o procedimento geração das direções de fluxo diretamente do MNT agregado para 10 km de resolução (rede de drenagem E), também se obteve uma relação orto/diag superior a 2, indicando predomínio de trechos ortogonais.

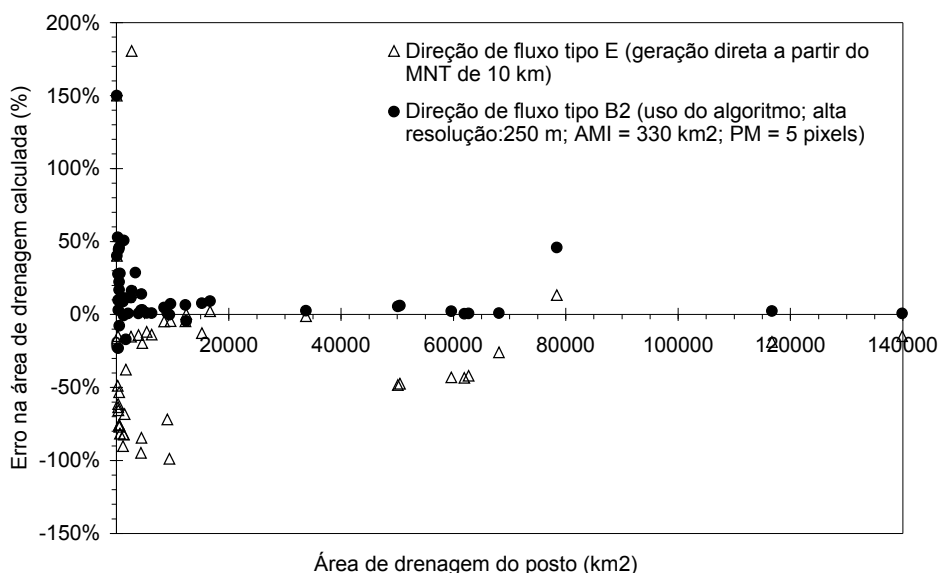


Figura 11 – Erro percentual nas áreas de drenagem calculadas para as direções de fluxo tipos B2 e E, em função da área de drenagem observada.

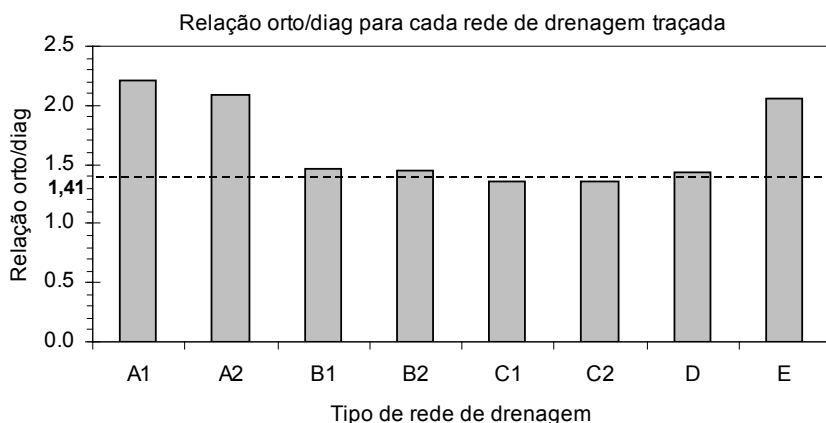


Figura 12 – Relação entre o número de trechos ortogonais e diagonais (orto/diag) em cada uma das redes de drenagem traçadas.

Embora a avaliação das áreas de drenagem tenha proporcionado fazer algumas inferências interessantes acerca das diversas redes de drenagem traçadas, a melhor análise é feita visualmente, superpondo as direções de fluxo na resolução do modelo hidrológico (10 km) com a rede de drenagem de mais alta resolução disponível (no caso, 250 m) e com o próprio MNT de 90 m. Por exemplo, a perda na qualidade da rede traçada a partir de informações geradas para uma resolução de 500 m pode ser avaliada comparando as Figuras 13-a e 13-b. Observa-se que em ambos os casos as redes traçadas pelo algoritmo estão coerentes com a informação de alta resolução de entrada no algoritmo (500 m no caso da Figura 13-a e 250 m para a Figura 13-b), porém estão bem distintas entre si. Inclusive, a rede tipo D apresentou um erro considerado bastante grave, visto que dividiu o rio Grande a montante do posto fluviométrico de Usina de Furnas (código 61661000) – tal erro foi

originado nas informações de direção de fluxo e área acumulada geradas para a resolução de 500 m e que serviram de entrada para o algoritmo.

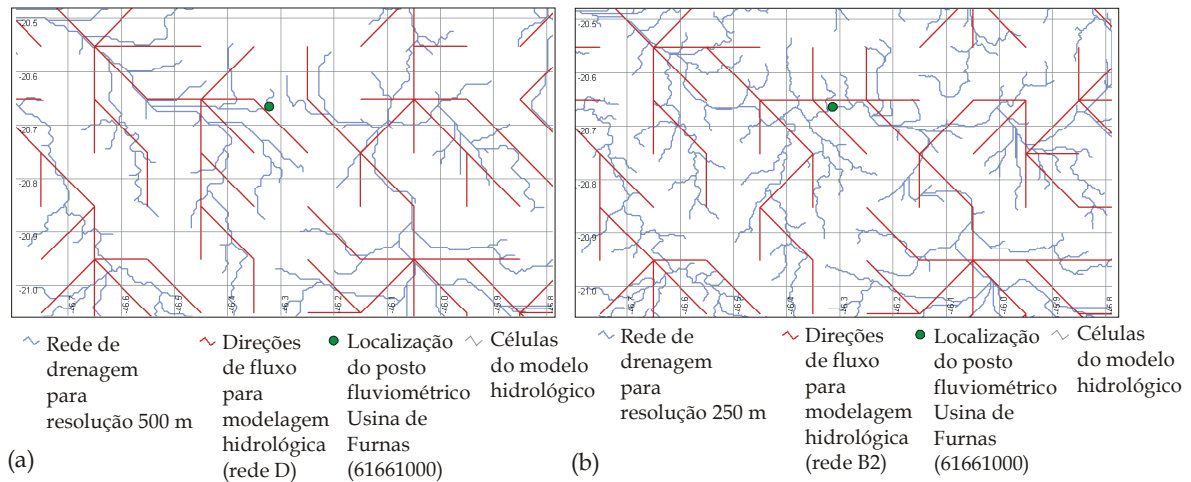


Figura 13 – Comparação entre as redes de drenagem traçadas pelo algoritmo a partir de informações com resolução de 500 m (a) e de 250 m (b).

Com a inclusão do critério do percurso mínimo na definição do pixel exutório em cada célula, gerou-se direções de fluxo que apresentam maior concordância com o relevo da região, o que é melhor percebido comparando visualmente as redes traçadas pelo algoritmo nas situações com e sem tal critério. Por exemplo, no caso da bacia a montante da Usina Hidrelétrica (UHE) Jacutinga (Figura 14), o erro da área de drenagem calculada para a rede tipo B1 (aplicação do algoritmo sem o critério do percurso mínimo) foi de 29% em relação à área informada pela ANA. No caso da rede tipo B2, cuja metodologia de geração das direções de fluxo foi idêntica à rede B1 apenas com a adição do critério em questão, o referido erro foi reduzido para 9%. A delimitação da bacia contribuinte à UHE Jacutinga a partir de cada uma das duas redes de drenagem (B1 e B2) mostra que a diferença entre elas consiste que na bacia referente à rede B1 foram incluídas as células 1 e 2 apontadas na Figura 14. A justificativa para inclusão de tais células decorre exatamente da definição dos pixels exutórios em cada uma. No caso da rede B1, os pixels exutórios foram definidos apenas pelo critério da maior área acumulada de drenagem, resultando naqueles apontados na Figura 14-a, que notadamente não drenam a maior parte das células correspondentes (células 1 e 2). Por outro lado, quando da geração da rede B2 tais pixels foram descartados da escolha do pixel exutório já que o caminho do fluxo a montante deles, dentro da célula correspondente, não apresentou um percurso de extensão superior ao valor mínimo definido. Foram então escolhidos como pixels exutórios aqueles situados nas regiões indicadas na Figura 14-b, resultando em direções de fluxo nas células 1 e 2 diferentes daquelas atribuídas para tais células na rede tipo B1. Considerando a rede de drenagem traçada a partir do MNT agregado para a resolução de 10 km (rede E), observa-se sua total incoerência em relação à rede de drenagem de resolução 250 m (Figura 14-c).

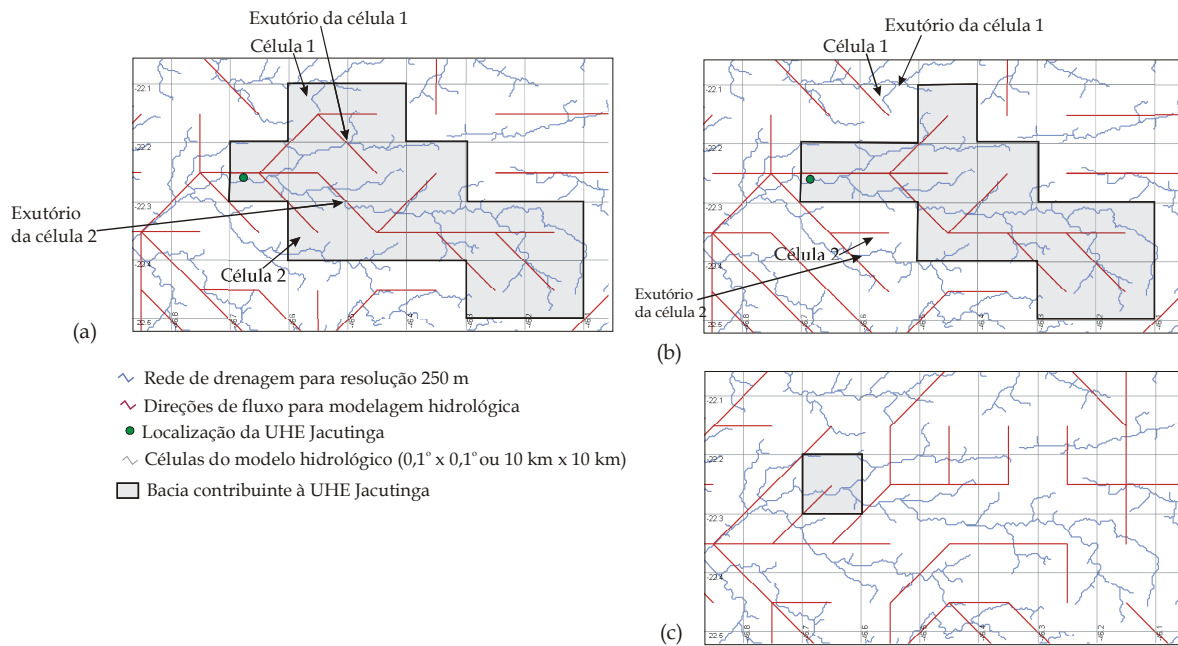


Figura 14 – Exemplo de situação onde a inclusão do critério do percurso mínimo na definição do pixel exutório incrementou a rede de drenagem traçada: (a) rede traçada sem tal critério (rede tipo B1); (b) rede traçada considerando um percurso mínimo de 5 pixels (rede tipo B2); (c) rede traçada diretamente a partir do MNT de 10 km (rede tipo E).

CONCLUSÕES

Na modelagem hidrológica distribuída de grandes bacias (área superior a 10.000 km²), a bacia modelada é usualmente dividida em células quadradas de extensão maior do que 5 km, às quais devem ser atribuídas direções de fluxo, indicando para qual das suas oito células vizinhas segue o escoamento da água efluente da célula. Um procedimento simples mas que tem requerido excessivas correções manuais posteriores consiste em agregar as informações do MNT disponíveis (de alta resolução, geralmente 90 m) para a resolução das células do modelo hidrológico (baixa resolução) e a partir do MNT agregado gerar direções de fluxo que servirão de entrada para o modelo hidrológico. Neste algoritmo foi descrito e avaliado um algoritmo baseado no proposto por Reed (2003) que emprega um procedimento alternativo, no qual inicialmente são geradas as direções de fluxo e as correspondentes áreas de drenagem acumuladas para uma grade de alta resolução (resolução do MNT disponível ou menor conforme a limitação computacional) e a partir de tais planos de informação são determinadas as direções de fluxo nas células de baixa resolução (células do modelo hidrológico).

O algoritmo descrito foi aplicado à Bacia do Rio Grande (área de 145.000 km²), para geração de direções de fluxo em células de aproximadamente 10 km x 10 km (ou 0,1° x 0,1°), que constituem a discretização adotada para a simulação de tal bacia com o modelo hidrológico

distribuído MBG-IPH. Foram geradas sete redes de drenagem empregando o referido algoritmo, variando os parâmetros área mínima incremental e percurso mínimo e alimentando o algoritmo com direções de fluxo e áreas acumuladas referentes a duas resoluções distintas (250 m e 500 m). Outra rede de drenagem foi gerada empregando o procedimento mais simples, de determinação das direções de fluxo a partir do MNT agregado para a resolução de 10 km.

O parâmetro área mínima incremental torna o algoritmo flexível e permite ajustar a tendenciosidade da rede gerada em apresentar mais trechos ortogonais ou diagonais. Ajustou-se uma curva relacionando o tamanho da célula do modelo hidrológico com o valor desse parâmetro que produz uma rede de drenagem equilibrada entre trechos ortogonais e diagonais, baseado nos dados de Reed (2003), sendo confirmada tal relação com a aplicação na Bacia do Rio Grande. O parâmetro percurso mínimo foi adicionado ao algoritmo original proposto por Reed (2003), incrementando a qualidade da rede de drenagem gerada.

Todas as redes de drenagem geradas usando o algoritmo apresentaram melhor concordância com a rede observada e com o próprio MNT de alta resolução (90 m) do que a rede gerada por tal procedimento simples, inclusive comparando as áreas de drenagem calculadas com as informadas pela ANA em 50 postos fluviométricos e usinas hidrelétricas. Portanto, com o emprego do algoritmo aqui descrito, a demanda por correções manuais na rede de drenagem gerada para aplicação do modelo hidrológico praticamente foi extinta, diminuindo enormemente o tempo dispensado no preparo das informações para o modelo. A rede gerada automaticamente pelo algoritmo apresenta excelente coerência com a rede de drenagem observada, como é ilustrado na Figura 15, referente ao mesmo trecho da Bacia do Rio Grande no qual foram identificadas diversas incoerências na rede traçada diretamente a partir do MNT agregado (Figura 1).

Importante ressaltar que a aplicação do algoritmo aqui descrito assume como hipótese que as informações acerca de direções de fluxo e áreas acumuladas de alta resolução que o alimentam estão corretas, procurando gerar direções de fluxo de baixa resolução o mais coerentemente possível com tais informações. Na aplicação à bacia do Rio Grande, por limitação computacional, trabalhou-se com pixels de 250 m como sendo as informações de alta resolução de entrada no algoritmo. A situação ideal seria alimentar o algoritmo com informações de mais alta resolução possível desde que múltipla da grade de baixa resolução do modelo hidrológico, visto que a agregação do MNT para a resolução de 250 m pode causar perdas de informações consideráveis, como avaliado por Thielen *et al.* (1999). Nesse sentido, está sendo desenvolvido atualmente um programa computacional, cujo algoritmo é baseado no descrito por Jenson e Domingue (1988), que suporte trabalhar com uma maior quantidade de dados, sendo capaz de gerar direções de fluxo e áreas acumuladas de drenagem para grandes bacias com resolução de 100 m.

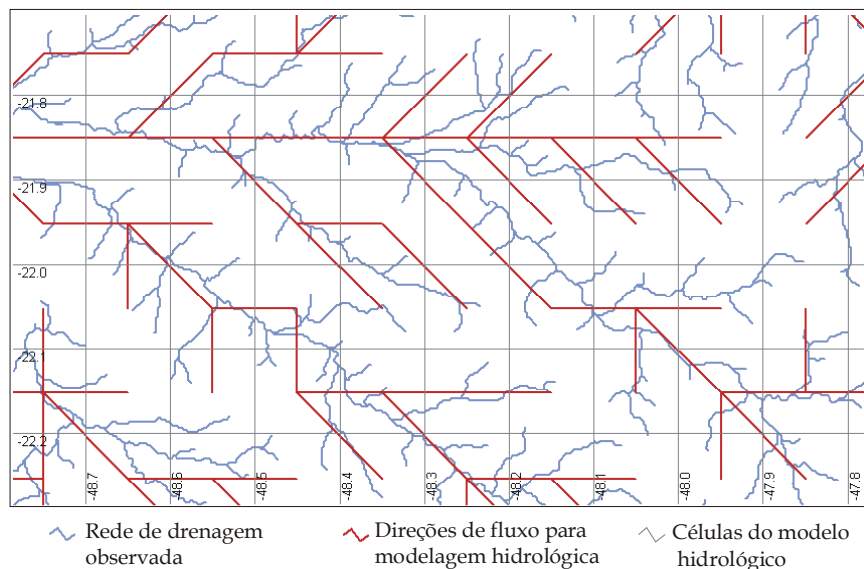


Figura 15 – Exemplo de rede de drenagem traçada automaticamente pelo algoritmo para uso na modelagem hidrológica (células de $0,1^{\circ} \times 0,1^{\circ}$) – trecho da bacia do Rio Grande da Figura 1.

Também visando incrementar as informações que alimentam o algoritmo é a geração de modelos numéricos do terreno que sejam hidrológicamente consistentes, ou seja, que possibilitem obter a máxima coincidência entre o trajeto do escoamento superficial, derivado matematicamente, e a hidrografia mapeada, como através da metodologia proposta por Rubert *et al.* (1999).

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq/FINEP pelo financiamento do projeto de pesquisa ao qual este trabalho está associado (“Previsão de vazões afluentes a reservatórios hidrelétricos – bacia do Rio Grande”) e ao CIAT/CGIAR-CSI pela disponibilização dos dados digitais de elevação do terreno na internet.

BIBLIOGRAFIA

- ALLASIA, D.; SILVA, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. (2005). “Use of large basin simulation model MGB-IPH in Brazil” in Symposium S7.6 – New distributed modeling approaches and methods for testing models against observations, VII IAHS Scientific Assembly, Foz do Iguaçu (PR).
- CGIAR-CSI (2005). “Void-filled seamless SRTM data V1, 2004”. International Centre for Tropical Agriculture (CIAT), available from The CGIAR Consortium for Spatial Information (CGIAR-CSI) SRTM 90m Database: <http://srtm.csi.cgiar.org>.

- COLLISCHONN, W. (2001). “*Simulação Hidrológica de Grandes Bacias*”. Porto Alegre: UFRGS. Tese (Doutorado em Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental), Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul. 194 p.
- COLLISCHONN, W.; TUCCI, C.E.M. (2001). “*Simulação hidrológica de grandes bacias*”. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. vol. 6, no. 1, pp. 95-118.
- JENSON, S; DOMINGUE, J. (1988). “*Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information system analysis*”. Photogramm. Eng. Remote Sens., 54, pp. 1593-1600.
- MAIDMENT, D. (2002). “*Arc Hydro: GIS for water resources*”. ESRI Press, Redlands (EUA), 203 p.
- O’DONNELL, G.; NIJSSEN, B.; LETTENMAIER, D. (1999). “*A simple algorithm for generating streamflow networks for grid-based, macroscale hydrological models*”. Hydrological Processes, 13, pp. 1269-1275.
- OLIVERA, F.; LEAR, M.; FAMIGLIETTI, J.; ASANTE, K. (2002). “*Extracting low-resolution river networks from high-resolution digital elevation models*”. Water Resources Research, vol. 38, no. 11, 1231.
- REED, S. M. (2003). “*Deriving flow directions for coarse-resolution (1-4 km) gridded hydrologic modeling*”. Water Resources Research, vol. 39, no. 9, 1238.
- RUBERT, O.; RIBEIRO, C.; CHAVES, M. (1999). “*Um novo divisor de águas na geração de modelos digitais de elevação hidrológicamente consistentes*” in XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte (MG).
- SHAW, D.; MARTZ, L.; PIETRONIRO, A. (2005). “*Flow routing in large-scale models using vector addition*”. Journal of Hydrology. 307, pp. 38-47.
- SILVA, B.; COLLISCHONN, W.; TUCCI, C. (2004). “*Simulação da Bacia do Rio São Francisco através do modelo hidrológico MGB-IPH*” in Anais do VII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, São Luís (MA).
- THIEKEN, A.; LÜCKE, A.; DIEKKRÜGER, B.; RICHTER, O. (1999). “*Scaling input data by GIS for hydrological modeling*”. Hydrological Processes, 13, pp. 611-630.
- TUCCI, C.E.M.; CLARKE, R.T.; COLLISCHONN W.; DIAS, P.L.S.; SAMPAIO, G.O. (2003). “*Long term flow forecast based on climate and hydrological modeling: Uruguay river basin*”. Water Resources Research. v.39, n.7, p.3(1-11).
- WANG, M.; HJELMFELT, A.; GARBRECHT, J. (2000). “*DEM aggregation for watershed modeling. Journal of the American Water Resources Association*”, vol. 36, no. 3, pp. 579-584.