



Uma Ferramenta Open Source que Unifica Representações de Fluxo Local para Apoio à Gestão de Recursos Hídricos no Brasil

SERGIO ROSIM¹

ANTÔNIO MIGUEL VIEIRA MONTEIRO²

CAMILO DALELES RENNÓ³

JOÃO RICARDO DE FREITAS OLIVEIRA⁴

PALAVRAS-CHAVE

Recursos Hídricos – Fluxos Locais – Grafos – Modelos de Relevo

RESUMO

Os Comitês de Bacias são os órgãos gestores e executores dos recursos hídricos (RH) no âmbito das suas bacias hidrográficas. Cada comitê é composto pelo poder público, especialistas e representantes da sociedade. O governo municipal deve participar dos comitês de bacias e implementar o que ali é decidido. Os fluxos locais numa bacia hidrográfica formam o elemento mais importante para o desenvolvimento de modelos orientados para o apoio à gestão de recursos hídricos. O fluxo é determinado pelas características topográficas da superfície da bacia. A premissa fundamental é que a topografia do terreno é o principal fator para a determinação dos fluxos locais. As representações matemáticas e as estruturas computacionais que modelam a topografia do terreno e o conjunto de funções que extraem o fluxo, a partir da superfície de uma bacia, têm sido explorados pelos usuários dos Sistemas de Informações Geográficas (SIG). As estruturas de grades regulares (DEM), redes triangulares irregulares (TIN), curvas de nível e polígonos irregulares (Diagramas de Voronoi) são diferentes estruturas computacionais empregadas na partição da topografia do relevo de bacias hidrográficas. Essa situação implica dizer que a representação dos fluxos locais é inteiramente dependente da estrutura de dados usada na representação da topografia do terreno. Apresenta-se uma nova abordagem para representar e manipular os fluxos locais. Esta proposta, que supera a limitação imposta pelo acoplamento entre fluxo local e as estruturas de representação do terreno, é utilizada como base para a representação unificada de fluxos locais obtidos a partir de diferentes modelos de representação do terreno (MRT), desacoplando a representação dos fluxos locais das funções necessárias à sua manipulação. Um modelo hidrológico distribuído simplificado é utilizado para provar o conceito apresentado.

¹ Email: sergio@dpi.inpe.br

² Email: miguel@dpi.inpe.br

³ Email: camilo@dpi.inpe.br

⁴ Email : joao@dpi.inpe.br

1. INTRODUÇÃO

A Lei 9.433 de 8 de Janeiro de 1997, que definiu a Política Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, estabeleceu um marco na gestão dos recursos hídricos no Brasil. A água tornou-se um bem público dotado de valor econômico. Os mecanismos de gestão passaram a ser vinculados à bacia hidrográfica, que passou a ser a unidade de manejo dos recursos hídricos. Para cada bacia foi constituído um Comitê de Bacia que é o órgão responsável pela elaboração e execução de projetos hídricos na bacia hidrográfica, seguindo o que estabelece o Plano Nacional de Recursos Hídricos (PNRH) [Ana06]. O Comitê de Bacia é formado pelo poder público (município, estado e governo federal), sociedade civil organizada e usuários. Portanto o conceito de gestão dos recursos hídricos foi compartilhado entre o poder público e a sociedade organizada.

O município passa a ter um papel fundamental na gestão dos recursos hídricos. As cidades concentram grande parte dos agentes poluidores das águas, com seus esgotos e suas indústrias. A preservação dos recursos hídricos de uma bacia hidrográfica depende, em grande parte, da participação efetiva dos representantes das cidades no Comitê de suas bacias. O poder municipal, ao mesmo tempo que não se pode furtar à sua obrigação em relação aos recursos hídricos, não pode decidir tudo sozinho. Para que o poder municipal, juntamente com os outros agentes responsáveis pela gestão dos recursos hídricos, possa executar adequadamente as suas tarefas, é necessário o desenvolvimento de ferramentas adequadas que modelem o comportamento da água na bacia.

O comportamento dinâmico da água no interior da bacia é base para os estudos relativos ao manejo dos recursos hídricos. Esse comportamento é determinado pelos rios existentes na bacia, pelo escoamento superficial e subterrâneo em toda a área da bacia, pelo relacionamento entre esses dois fatores, e pela relação desses dois fatores com os outros componentes da bacia como uso e cobertura do solo, tipo de solo, precipitação etc.

O escoamento, tratado neste trabalho, de uma bacia hidrográfica, fator fundamental em procedimentos envolvendo os recursos hídricos, é definido pelo conjunto dos fluxos formados pela água, e é determinado pelos processos geomorfológicos ocorridos na bacia. O fluxo superficial aqui considerado é formado pela água que cai no solo e não se infiltra no subsolo. O relevo do terreno é a componente determinante na definição desses fluxos no interior da bacia [Kis04], [SoGr94]. A representação computacional do relevo é definida por estruturas de dados que discretizam esse relevo. Essas estruturas são geradas a partir das amostras do relevo da bacia.

Embora essas estruturas sejam diferentes entre si, elas possuem em comum o fato de particionarem o espaço geográfico da bacia em elementos poligonais denominados células. Os fluxos são definidos usando-se qualquer uma dessas estruturas de dados que representam computacionalmente o relevo da bacia.

Define-se, portanto, cada fluxo particular, chamado de fluxo local, para cada célula da estrutura de dados em relação às suas células vizinhas. O fluxo local tem sua origem em uma célula e seu término em uma ou mais células vizinhas. Para cada estrutura de dados, existe uma maneira própria de extração e armazenamento dos fluxos locais.

Na prática, o uso de uma ou outra estrutura depende de três fatores: a forma como a informação está disponível na origem; o requisito de projeto, que pode precisar de um tipo específico de estrutura; e o sistema computacional para tratamento de recursos hídricos disponível para o desenvolvimento do projeto. Este último determina qual estrutura ou estruturas de dados poderão ser utilizadas.



A solução mais comum utilizada pelos sistemas que modelam os recursos hídricos é a adoção de um só modelo de dados, extraído-se dele os fluxos locais e realizando-se sobre ele todas as aplicações. Quando o relevo é representado por mais de um modelo de dados, converte-se o relevo representado nestes modelos para o modelo usado pelo sistema de informação selecionado. A escolha de um único modelo significa uma opção por uma única semântica na representação do relevo, determinando que os fluxos locais sejam extraídos segundo essa visão estrutural do relevo. Os modelos de dados que representam o relevo são: grade regular retangular (DEM – Digital Elevation Model), rede triangular irregular (TIN – Triangular Irregular Network) também conhecida como triangulação, Diagrama de Voronoi e Curvas de Nível. Cada modelo possui uma semântica diferente. A Fig. 1 mostra os modelos de dados de relevo com os respectivos fluxos locais.

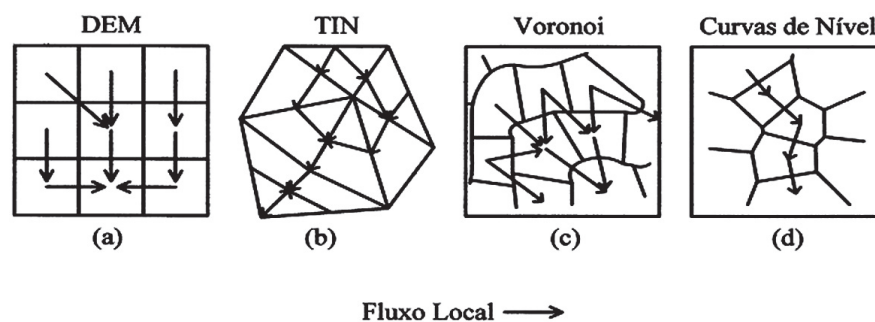


Figura 1 - Fluxos locais extraídos de diferentes estruturas de representação do relevo da bacia

Este trabalho propõe um modelo para a representação dos fluxos locais que acaba com o acoplamento entre armazenamento e manipulação dos fluxos locais e os MRTs de onde esses fluxos foram extraídos. Nesta proposta, é possível explorar diversas representações de dados e sobre elas executar os mesmos modelos, extraindo os mesmos parâmetros, sem necessidade de um aplicativo específico para cada MRT.

Na próxima seção, são apresentados um resumo dos sistemas existentes e suas limitações. Na seção 3, a extração do fluxo local de cada modelo de representação do terreno é apresentada, bem como o acoplamento entre eles. Na seção 4, é apresentada a proposta deste trabalho, mostrando como o fluxo local pode ser desacoplado do seu modelo de representação do terreno. Na seção 5, é apresentado um estudo de caso e na seção 6 são feitas as conclusões deste artigo.

2. SISTEMAS COMPUTACIONAIS EXISTENTES E SUAS LIMITAÇÕES

Os sistemas existentes empregam normalmente uma única estrutura de dados, limitando a possibilidade de representação computacional do relevo da bacia hidrográfica. O motivo principal é que cada estrutura particiona o relevo da bacia de forma diferente. O fluxo local é extraído de maneira diversa para cada estrutura de dados do relevo. Dessa forma, cada aplicação precisa ter uma implementação condizente com a particular estrutura de dados de onde foram extraídos os fluxos locais.

Diversos modelos hidrológicos foram materializados em sistemas para processamento de RH. Os sistemas ArcGis Hydro [Mai02], Grass [Gra93], Topographic Parameterization (TOPAZ) [GaMa97], Topography based Hydrological Model (TopModel), o MIKE SHE [Dhi98] e o PCRaster [Deu95] são exemplos de sistemas que empregam o modelo DEM para executar processamento do RH. O sistema Watershed Modelling System (WMS) [NeJM94] utiliza os modelos DEM e TIN. O sistema chamado TIN-based Real-Time Integrated Basin Simulator (tRIBS) [Ryb00] usa o modelo TIN, e o TOPOG [DaSh88] e o SASHI [Ren03] utilizam o modelo Curvas de Nível.

A maioria dos sistemas optou pelo modelo DEM, o qual requer algoritmos mais simples. Além disso, diferentes instituições geram e disponibilizam dados de altitudes no formato do modelo DEM [Usg90], [NaNg00]. Porém cada modelo de representação de terreno tem suas vantagens e desvantagens [MoGL91], [GaOD01].

Um outro modelo de dados emprega um grafo para armazenar os modelos DEM e TIN. Este grafo recebe o nome de height graph [DaMA07]. Os fluxos locais e as sub-bacias são extraídos desse grafo. Antes da extração dos fluxos locais, dois processamentos são realizados, sendo um procedimento para eliminação de fossos e outro para determinação de fluxos em áreas planas. Na utilização do modelo DEM, cada posição da grade torna-se um nó do grafo. Os arcos do grafo são criados de acordo com a necessidade do usuário. Os vértices e arestas do modelo TIN são mapeados diretamente para o grafo.

O fato de inserir no grafo os modelos de dados elimina a semântica de cada modelo. No modelo TIN, as arestas da triangulação são inseridas no grafo, perdendo-se a semântica dada pela topologia dos triângulos. Cada fluxo local é definido somente pela diferença de elevação em cada aresta.

3. ACOPLAMENTO ENTRE O FLUXO LOCAL E O MODELO DE REPRESENTAÇÃO DO TERRENO

O modelo DEM [BuMc98] tem uma estrutura de dados em forma de matriz, sendo que cada posição da matriz possui tamanho retangular fixo. Como as amostras do relevo, em geral, não coincidem com as posições da grade, o valor de cada posição da grade é obtido por interpolação. Este tipo de estrutura facilita a implementação, sendo esta sua principal vantagem. Como desvantagens destacam-se o armazenamento de grande quantidade de informações redundantes e a perda dos valores originais das amostras do relevo, pelo emprego da interpolação.

O modelo TIN [Che89] é constituído por triângulos, sendo que cada triângulo é formado por três amostras. A regra mais usada para a criação da triangulação é a regra de Delaunay, que cria triângulos próximos de equiláteros. Como usa as amostras do relevo, o modelo não altera seus valores originais. Permite também que linhas de restrição sejam inseridas como amostras especiais, preservando feições geográficas importantes, como rios, por exemplo. A desvantagem deste modelo é a complexidade da sua estrutura de dados, que exige algoritmos mais elaborados.

O modelo Diagrama de Voronoi [TuLG01] é formado por polígonos irregulares, sendo que existe um polígono para cada amostra do relevo. Um polígono delimita a região mais próxima de uma amostra em relação a todas as outras amostras. A vantagem deste modelo é justamente essa determinação da área de influência de cada amostra pela distância. Este modelo é dual em relação à triangulação de Delaunay. Assim, a desvantagem também é a elaboração de algoritmos complexos.

O modelo Curvas de Nível [] é usado na definição de elementos de fluxos locais. Cada elemento é determinado por uma porção de terreno entre duas curvas de nível vi-



zinhas. O polígono irregular que delimita essa porção do terreno determina uma área de fluxo uniforme. A vantagem deste modelo é a definição de elementos naturais de escoamento. A desvantagem é a dificuldade de tratamento das curvas de nível para extração dos elementos de fluxo.

Cada modelo possui uma semântica e uma estrutura de dados própria. Os fluxos locais podem ser extraídos de qualquer um desses modelos, sendo que para cada modelo é usada uma estrutura diferente. Os fluxos locais são armazenados na mesma estrutura do modelo empregado.

3.1 EXTRAÇÃO DE FLUXO LOCAL A PARTIR DO MODELO DEM

A partir de uma célula da grade determina-se a direção de continuidade do fluxo local, comparando-se seu valor de elevação com os valores de elevação das suas oito células vizinhas. Este cálculo é conhecido como declividade de uma célula em relação às suas células vizinhas. A declividade fornece dois resultados: o gradiente, que é a máxima inclinação descendente, e a direção dada pela exposição, que define a direção do fluxo local para uma única célula ou para mais de uma célula. Como resultado do processo de extração dos fluxos locais é gerada uma outra grade regular conhecida como Local Drain Directions (LDD) [BuMc98].

Cada célula da grade LDD possui um valor inteiro que indica um sentido de continuidade do fluxo local. Para garantir que esse valor seja único, adotou-se uma codificação que usa potências de 2, com expoentes de 0 a 7 [JeDo88]. Quando dois ou mais fluxos locais saem de uma célula da grade, o valor desta célula, na grade LDD, será a soma dos valores que indicam o sentido de cada fluxo local. Desse modo, cada combinação diferente de direções corresponderá de modo unívoco a um número inteiro.

Um exemplo pode ser visto na Fig. 2(a) que apresenta dois fluxos locais, mostrando um caso que utiliza um método multidirecional. A Fig. 2(b) mostra a máscara 3x3 com a codificação da direção de fluxo para cada célula. A Fig. 2(c) apresenta o resultado, que é a soma do valor da máscara para cada direção de fluxo.

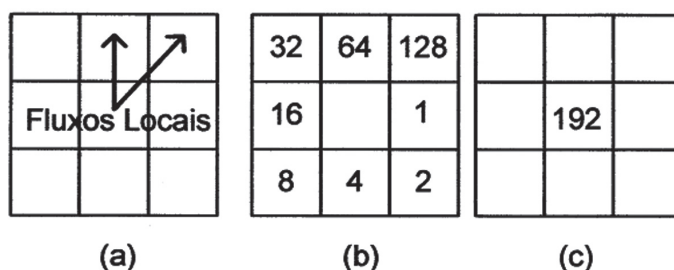


Figura 2- (a) Fluxos locais; (b) Máscara codificada com as direções de fluxo; (c) Código resultante dos fluxos locais (64+128)

3.2 EXTRAÇÃO DE FLUXO LOCAL A PARTIR DO MODELO TIN

A determinação do fluxo local com o uso da triangulação é feita em dois estágios. Primeiro, determina-se, para cada triângulo, o sentido do fluxo local que atravessa cada aresta do triângulo. Em seguida, são classificadas todas as arestas da triangulação com fluxo local.

O sentido do fluxo local que atravessa uma aresta é definido em relação a cada triângulo que a compartilha. Dessa forma, uma aresta pode ter dois sentidos de fluxo, que são: output (O), quando o fluxo local sai do triângulo pela aresta; input (I), quando o fluxo entra no triângulo pela aresta; flow (F) quando o fluxo flui pela aresta. A Fig. 3 mostra esses tipos de fluxo local.

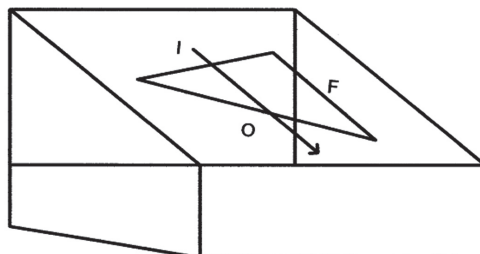


Figura 3 - Tipos de fluxo local de uma aresta

A extração dos fluxos locais usando o modelo TIN define o comportamento de cada aresta em relação aos fluxos locais. Para tanto, novas informações devem ser inseridas nas estruturas de arestas e de triângulos. Nesta última estrutura, armazena-se o tipo de fluxo de cada aresta no contexto de cada triângulo. Na estrutura de arestas, uma nova informação define se a aresta é portadora de fluxo local ou não. A Fig. 4 mostra essas estruturas. As informações que aparecem sem destaque são oriundas do processo de construção da triangulação. As informações escritas em **negrito** referem-se aos fluxos locais, extraídos da triangulação.

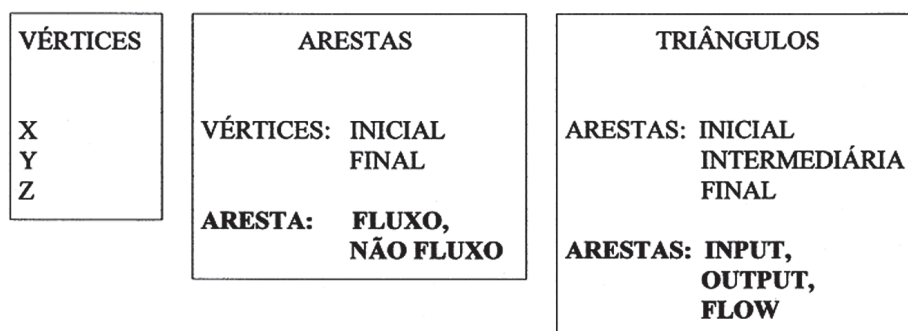


Figura 4 - Estruturas que armazenam a triangulação e os respectivos fluxos locais

As estruturas empregadas na representação da triangulação recebem as informações referentes aos fluxos locais. Portanto as funções que utilizam esses fluxos devem acessar essas estruturas.

3.3 EXTRAÇÃO DE FLUXO LOCAL USANDO O MODELO DIAGRAMA DE VORONOI

A extração do fluxo local é feita pelo cálculo do gradiente inserido na equação para o cálculo do escoamento superficial, usando o Diagrama de Voronoi [RoKo06], [DaGo07]. Esse método, chamado de Método Integrado das Diferenças Finitas (Integrated Finite Difference Method – IFDM), é uma extensão para as grades irregulares do uso do Método de Diferenças Finitas (FDM) usado em grades regulares. A Equação (1), a seguir, apresenta



o cálculo do gradiente, $\text{Grad}_i(p)$, sendo que h_i e h_p são os valores de elevação da célula i e p , respectivamente, e X_{ip} é a distância horizontal entre os pontos centrais dessas duas células:

$$\text{Grad}_i(p) = (h_i - h_p) / X_{ip} \quad (1)$$

O fluxo local resultante pode ser unidirecional, tomando-se o valor do gradiente que dá a maior inclinação, ou pode ser multidirecional, quando mais de uma célula vizinha pode receber o fluxo local. Neste caso, o tamanho da superfície de contato entre as células (F_{ip}) define o fator de ponderação, que é utilizado para determinar a porcentagem de fluxo para cada célula vizinha que possui fluxo local. A Fig. 5 ilustra este cálculo.

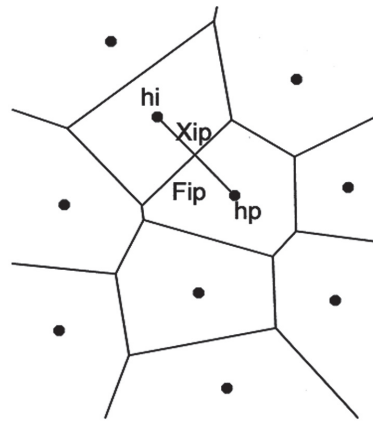


Figura 5 - Cálculo do gradiente para definir fluxo local do Diagrama de Voronoi

A estrutura de dados usada para representar o Diagrama de Voronoi pode ser uma extensão da estrutura de dados que representa a triangulação de Delaunay [Mio07], [TuLG01], [LeGa00]. Assim, a estrutura usada neste trabalho para representar o modelo Diagrama de Voronoi é deste tipo. Essa estrutura armazena diferentes informações dos vértices, arestas direcionais e triângulos. As informações do Diagrama de Voronoi são armazenadas na estrutura de dados das arestas da triangulação dual. Para cada aresta armazena-se o vértice do polígono de Voronoi que se encontra à direita da aresta, conforme mostra a Fig. 6.

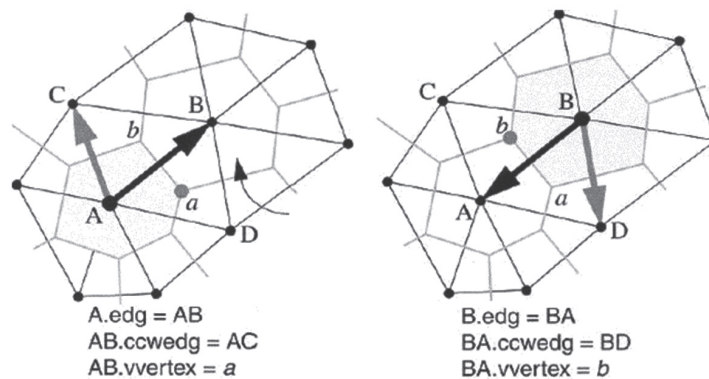


Figura 6 - A figura da esquerda mostra o vértice a do polígono de Voronoi centrado em A , que se encontra à direita da aresta direcionada AB da triangulação dual. A figura da direita mostra o vértice b que está à direita da mesma aresta, mas considerada no sentido inverso, aresta BA . Fonte: [TuLG01]

A estrutura da triangulação dual, contendo também as informações relativas ao Diagrama de Voronoi, aparece na Fig. 7. As informações próprias da triangulação dual são mostradas sem destaque, enquanto as informações específicas do modelo Diagrama de Voronoi aparecem em negrito.

VÉRTICES	
(x,y)	coordenadas
z	altitude
edg	ponteiro para uma aresta conectada
nnbrs	número de vértices vizinhos
bnd_code	código do estado da borda

TRIÂNGULOS	
p(3)	ponteiros para os vértices
t(3)	ponteiros para os triângulos adjacentes (t(1) é oposto a p(1), etc)
e(3)	ponteiros para as arestas direcionadas no sentido anti-horário

ARESTAS DIRECIONADAS	
org	vértice inicial
dest	vértice final
ccwedg	ponteiro para a próxima aresta direcionada no sentido anti-horário
vvertex_(x,y)	coordenada do vértice de Voronoi do lado direito da aresta

Figura 7 - Estrutura de dados contendo informações da triangulação dual e do Diagrama de Voronoi. Adaptado de: [TuLG01]

O cálculo do gradiente para cada polígono de Voronoi determina qual aresta de triângulo receberá o fluxo local. Assim, cada aresta deve conter a informação que a define, ou seja, se a aresta contém fluxo local ou não. Esta nova informação pode ser adicionada à estrutura de dados das arestas ou uma nova estrutura pode ser criada para esse fim.

3.4 EXTRAÇÃO DE FLUXO LOCAL USANDO O MODELO CURVAS DE NÍVEL

A primeira fase para a extração de fluxos locais consiste na criação de uma partição a partir das curvas de nível. Esta partição é formada por polígonos irregulares, denominados células, sendo que cada polígono possui quatro lados. Dois lados são formados por segmentos de duas curvas de nível vizinhas e dois lados são formados por dois segmentos de retas, chamados de linhas de fluxo, que ligam essas duas curvas de nível. Os fluxos locais são definidos entre células vizinhas. Este modelo é intrinsecamente multidirecional, sendo que a quantidade de fluxo que vai para cada célula é proporcional à superfície de contato entre a célula de onde se origina o fluxo local e as células receptoras deste fluxo. A Fig. 8 mostra esse modelo de representação de terreno.

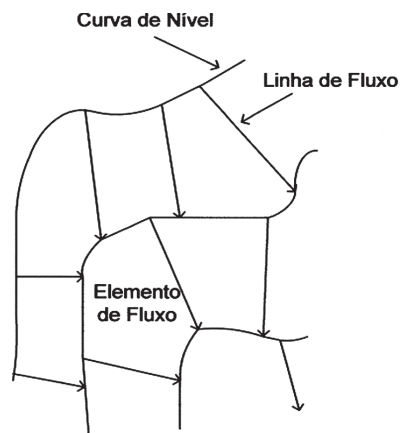


Figura 8 – Representação de um elemento de fluxo no modelo Curvas de Nível

Duas estruturas são empregadas no armazenamento das informações de cada elemento de fluxo e do relacionamento entre esses elementos. A primeira estrutura armazena, para cada elemento de fluxo, o seu identificador, o identificador da curva de nível superior, o nó inicial e o nó final desta curva. Em seguida, armazena o identificador da curva de nível inferior e seus nós inicial e final.

A segunda estrutura identifica as relações entre elementos de fluxo, armazenando o identificador do elemento de fluxo superior, o identificador do elemento de fluxo inferior, e a porcentagem de fluxo entre eles. Os identificadores dos elementos de fluxo apontam para as respectivas posições da primeira estrutura. A porcentagem do fluxo depende da fronteira entre elementos de fluxo, ressaltando que um elemento de fluxo pode fornecer fluxo para outros elementos de fluxo.

Esse vínculo entre as estruturas de dados que implementam os modelos de terreno e os fluxos locais propaga-se para as aplicações que usam esses fluxos. Uma aplicação deve extrair os fluxos locais da estrutura em que foram armazenados. Portanto a aplicação é dependente do modelo usado na representação do relevo. Essa dependência tem contribuído para que os sistemas de informação voltados para os recursos hídricos usem quase sempre apenas um modelo, normalmente o modelo DEM, pela facilidade de implementá-lo.

4. SOLUÇÃO PROPOSTA: UMA FERRAMENTA OPEN SOURCE PARA APOIO À GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Neste trabalho apresenta-se uma ferramenta de código aberto que coloca à disposição dos gestores em recursos hídricos a possibilidade de usar diferentes modelos de relevo para a extração dos fluxos locais. Além disso, essa ferramenta elimina a dependência entre a geração dos fluxos locais e o armazenamento e a manipulação desses fluxos. A aplicação não precisa tomar conhecimento do modelo de terreno usado na geração dos fluxos locais. Os fluxos locais também podem ser compostos a partir de diferentes modelos de representação do terreno. Dessa forma, novos modelos de representação de terreno podem ser inseridos ao longo do tempo no sistema, sem impactar o que já foi implementado.

Para tanto, propõe-se a unificação do armazenamento dos fluxos locais, extraídos de qualquer modelo de terreno, em uma única estrutura de dados. A manipulação dos fluxos locais passa a ser feita a partir dessa estrutura, e não mais da estrutura de dados de cada modelo, contendo os fluxos locais. Nesse caso, o armazenamento e a manipulação dos fluxos locais dependem exclusivamente dessa nova estrutura.

A estrutura de grafos foi a escolha natural para o armazenamento e a manipulação dos fluxos locais. Pode-se dizer que a vantagem principal de um grafo é que ele pode armazenar dados de uma maneira estruturada. O grafo possui propriedades vantajosas que não estão presentes nas outras estruturas usadas para armazenar o fluxo local. As rotinas que acessam dados do grafo são geralmente mais eficientes do que as que acessam estruturas de dados dos fluxos locais.

A Fig. 9(a) mostra um modelo em que os fluxos locais são armazenados nas estruturas de dados de onde foram extraídos. Com esse modelo, a implementação de uma determinada aplicação deve ser feita para cada estrutura de representação do relevo utilizada, ou seja, o código deve ser refeito para cada estrutura. A Fig. 9(b) mostra um modelo que armazena os fluxos locais em uma única estrutura, um grafo. Todas as aplicações envolvendo esses fluxos usarão somente esta estrutura de dados.

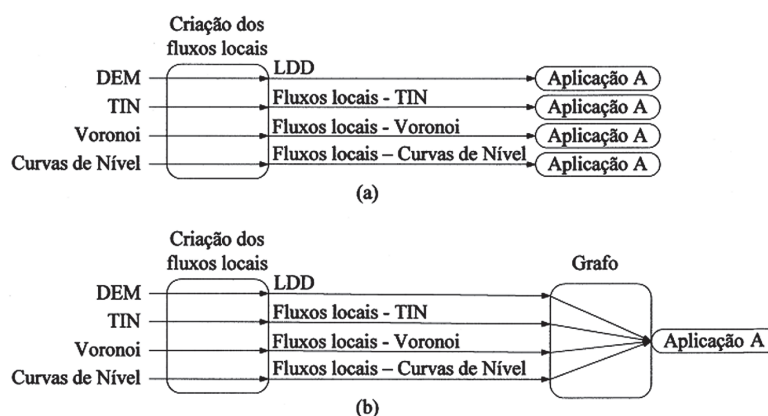


Figura 9 - Esquemas dos dois modelos para representação e manipulação dos fluxos locais: (a) para cada estrutura de dados deve-se implementar a aplicação; (b) a aplicação deve ser implementada somente uma vez, usando a estrutura de grafo. Adaptado de: [DaMA07]

4.1 MAPEAMENTO DO FLUXO LOCAL DO MODELO DEM PARA O GRAFO

Cada célula da grade LDD representa um nó do grafo e cada fluxo local passa a ser um arco do grafo. A posição central da célula da grade LDD define o início ou o fim do fluxo local. A Fig. 8 mostra um exemplo de fluxo local. O identificador do nó do grafo é o identificador da célula da grade onde se origina o fluxo local. A Fig. 10 apresenta um esquema com o mapeamento de uma grade LDD para o grafo.

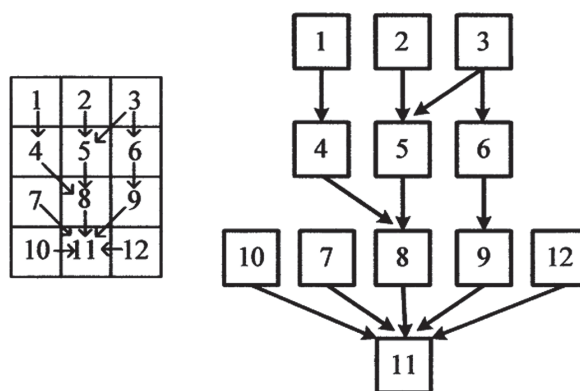


Figura 10 - Uma grade LDD mapeada para o grafo



O identificador do nó do grafo é fundamental para associar o resultado de possíveis cálculos à posição correta do modelo de terreno. Neste caso, para encontrar a posição correta no DEM com o uso do mapeamento inverso, do grafo para a grade.

4.2 MAPEAMENTO DO FLUXO LOCAL DO MODELO TIN PARA O GRAFO

O fluxo local na triangulação pode cruzar um triângulo, indo de uma aresta a outra, ou pode fluir pela aresta. O mapeamento de fluxo local, indo de uma aresta a outra do triângulo, acontece quando a entrada de fluxo no triângulo vem de outro triângulo, ou quando uma aresta do próprio triângulo pertence a um divisor de águas. A saída do fluxo será por outra aresta do triângulo, passando ao triângulo vizinho. Essas são chamadas de arestas de transição. Neste caso, os pontos centrais das arestas envolvidas são escolhidos para o traçado do fluxo local.

As arestas da triangulação formam o conjunto inicial dos nós do grafo. Os identificadores das arestas são mapeados para os nós do grafo. Dessa forma, é possível realizar o mapeamento inverso, do resultado de um processamento do grafo para a triangulação. A Fig. 11 mostra um exemplo desse tipo de fluxo local.

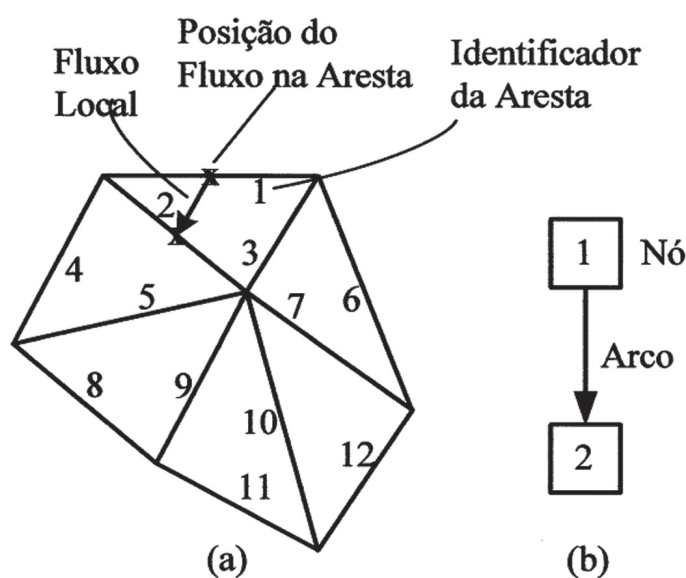


Figura 11 - Fluxo local de uma aresta a outra de um triângulo:
(a) triangulação com representação de um fluxo local;
(b) grafo deste fluxo local

O mapeamento de fluxo local indo pela aresta do triângulo acontece quando uma aresta recebe fluxo dos dois triângulos que a compartilham. A partir desse ponto, a continuidade desse fluxo local se dá pelas arestas, formando uma “calha” de escoamento. Essas arestas são denominadas de arestas de fluxo. Para cada aresta deste tipo definem-se dois nós no grafo, um para cada vértice da aresta, do início para o fim do fluxo. Para garantir que a cada nó do grafo corresponda um único identificador, este é composto pela soma do valor do número de arestas existentes na triangulação com o identificador de cada vértice. A Fig. 12 mostra um exemplo desse tipo de fluxo. Observa-se, por exemplo, que o vértice de número identificador 5 é mapeado para o nó com identificador 20, igual à soma $5 + 15$, em que 5 é o número do vértice e 15 é o número de arestas da triangulação.

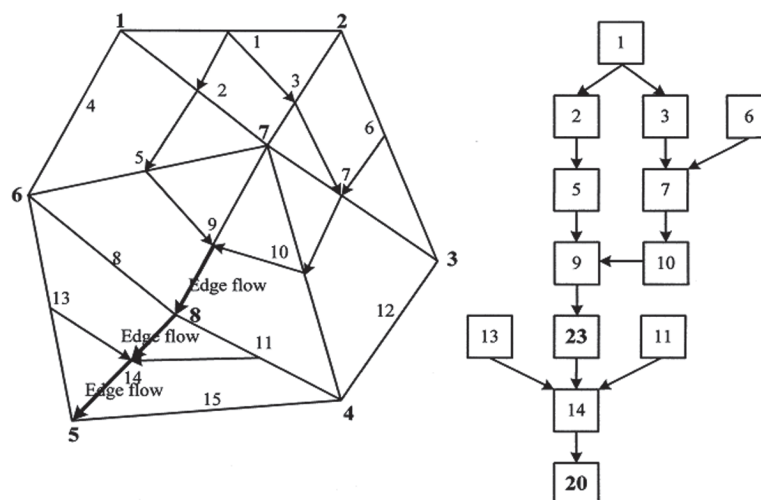


Figura 12 - Grafo criado (lado direito da figura) a partir de arestas de transição e arestas de fluxo local

4.3 MAPEAMENTO DO FLUXO LOCAL DO MODELO DIAGRAMA DE VORONOI PARA O GRAFO

O fluxo local vai do centro de um polígono de Voronoi ao centro de um polígono vizinho. Os pontos centrais dos polígonos de Voronoi são as amostras do relevo. Assim, um fluxo local vai de uma amostra do relevo a outra amostra. Como o Diagrama de Voronoi é dual em relação à triangulação de Delaunay, o fluxo local percorre as arestas da triangulação dual.

Cada polígono de Voronoi com fluxo local é mapeado para um nó do grafo, e cada fluxo local determina um arco no grafo. A Fig. 13 apresenta um exemplo de mapeamento de fluxo local do diagrama de Voronoi para o grafo.

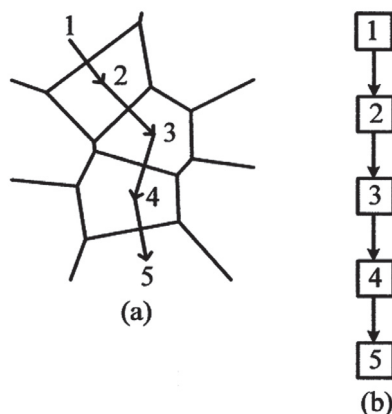


Figura 13 - Mapeamento do fluxo local do diagrama de Voronoi (a) para o grafo (b)

4.4 MAPEAMENTO DO FLUXO LOCAL DO MODELO CURVAS DE NÍVEL PARA O GRAFO

Cada célula contribui com fluxo para uma ou mais células vizinhas. Este modelo é intrinsecamente multidimensional. Cada célula é mapeada para um nó do grafo, sendo que o ponto central de cada célula é a localização do início ou do fim de um fluxo local. O identificador do nó é o mesmo da célula. Com isso, pode-se realizar o mapeamento inverso. A Fig. 14 mostra um exemplo deste tipo de mapeamento.

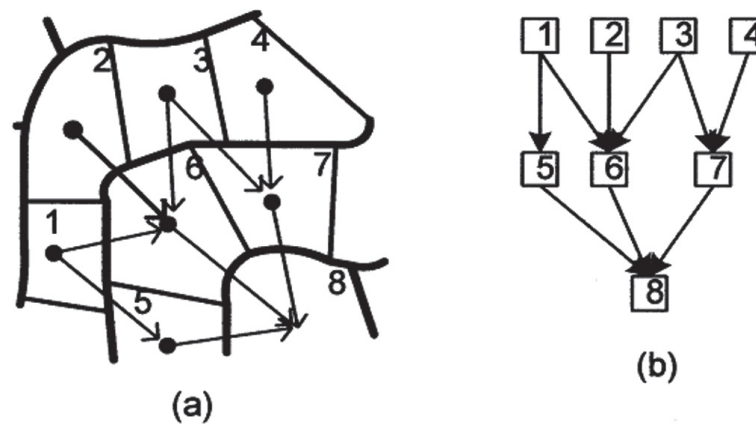


Figura 14 - Mapeamento do fluxo local de curvas de nível (a) para o grafo (b)

A unificação dos fluxos locais em uma única estrutura viabiliza, na prática, o uso de diferentes modelos de terreno. Reduz o esforço computacional no desenvolvimento de funções de manipulação dos fluxos locais e dos aplicativos que empregam esses fluxos.

5. ESTUDO DE CASO

A proposta apresentada neste trabalho para estruturar e manipular os dados pode ser implementada em qualquer ambiente de programação. Foram utilizados os seguintes componentes para formar o ambiente computacional para a programação dos operadores e tipos de dados: o SIG SPRING, a linguagem funcional Haskell e as bibliotecas TerraLib, TerraLibC e FGL (Functional Graph Library).

O SPRING é um SIG de propósito geral, possuindo os seguintes tipos de dados: modelo numérico de terrenos, temático, cadastral, rede e imagem. O tipo modelo numérico de terrenos é usado para representar os fenômenos que possuem um valor para cada posição geográfica. O tipo temático é um tipo de dado qualitativo que representa os temas existentes numa região geográfica. O tipo cadastral é um tipo de dado vetorial que possui objetos (nós, arcos e polígonos) que apresentam atributos descritivos, possibilitando o emprego de consultas sobre esses atributos. O tipo rede também possui objetos com atributos, mas, como é utilizado para modelagens envolvendo fluxo de informações, possui somente objetos representados por nós e arcos. O SPRING foi usado para a visualização de dados, geração da triangulação e extração dos fluxos locais dessa triangulação.

A linguagem Haskell [Jon02], [HuHJ07] foi escolhida para desenvolvimento do software por ser uma linguagem concisa que requer, em geral, menos linhas de código para implementar uma tarefa do que uma linguagem não funcional. Conseqüentemente, Haskell permite rápidas codificações, depurações e testes de protótipos [CIMP95]. Outro fator decisivo na escolha dessa linguagem foi a grande facilidade na manipulação de grafos por meio das funções da biblioteca FGL.

A linguagem Haskell é uma linguagem funcional. Algumas de suas características são: a inexistência de variáveis, o intenso uso de recursividade, a estrutura de lista como a estrutura básica, o uso de funções como parâmetro de entrada de outra função.

A biblioteca TerraLib [CaSP00], desenvolvida utilizando a linguagem C++, foi empregada como repositório de dados do modelo DEM. A TerraLib é uma biblioteca de funções e classes para SIG com a finalidade de desenvolvimento de aplicações espaciais, baseada em

modernas tecnologias de sistemas gerenciadores de banco de dados – SGBD, com recursos para armazenamento e manipulação de dados espaciais.

As funções da linguagem Haskell acessam a TerraLib por meio da biblioteca TerraLibC [CoCP06] e da FFI (Foreign Function Interface) [Cha04]. TerraLibC é uma biblioteca escrita na linguagem C que permite o acesso das funções Haskell aos dados da TerraLib, visto que a ligação entre a linguagem Haskell e uma biblioteca escrita na linguagem C++ não é possível. A biblioteca FGL [Erw01] possui funções para a criação e a manipulação de grafos e foi escrita na linguagem Haskell.

Um comando da linguagem Haskell pode ser utilizado para se ler uma grade da TerraLib, por exemplo. Esse comando em Haskell aciona o comando correspondente na TerraLibC, que, por sua vez, executa o comando de leitura da grade desejada. O resultado retorna ao ambiente Haskell seguindo o caminho inverso.

O ambiente de desenvolvimento pode ser visto na Fig. 15. As informações de entrada e os resultados são visualizados no SPRING. As funções desenvolvidas para uma aplicação usam os dados contidos na TerraLib, relativos às grades de precipitação, de infiltração, de LDD e de altitude. Para acessá-los, utiliza a FFI e a biblioteca TerraLibC. O bloco em cinza escuro identifica o que foi feito neste trabalho.

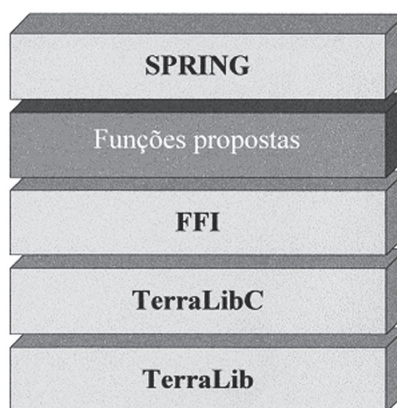


Figura 15 – Ambiente de desenvolvimento desta proposta. Adaptado de: [CoCP06]

5.1 APLICAÇÃO UTILIZANDO A NOVA PROPOSTA

Um dos objetivos deste trabalho é mostrar a viabilidade do método proposto. Para isso será usado mais de um modelo de representação de fluxos locais na execução de um aplicativo com um conjunto único de operadores. Para tanto, duas decisões foram tomadas. A primeira é sobre os modelos a serem utilizados. Foram escolhidos os modelos DEM e TIN que são os modelos mais usados em aplicações envolvendo modelos numéricos de terrenos. Com dois modelos pôde-se mostrar a criação do grafo a partir de cada modelo e a execução da aplicação usando-se cada grafo com o mesmo conjunto de operadores.

A segunda decisão diz respeito à escolha do conjunto de dados utilizados no exemplo de aplicação. Os dados foram extraídos do site do sistema PCRaster que possui uma demonstração desta aplicação chamada “Simplified Hydrological Runoff Model” [KaWB97]. Os dados necessários para a implementação desta aplicação formam um conjunto de quatro grades regulares. Uma grade contendo as altitudes, outra contendo os fluxos locais, a LDD. Uma terceira com as informações de precipitação e a quarta contendo a capacidade de infiltração das células da grade.



Esta aplicação determina o fluxo acumulado que chega a cada célula da grade. O cálculo é feito da seguinte maneira: somam-se os fluxos que chegam em uma célula com o valor de precipitação incidente na própria célula. Se o valor for menor ou igual à capacidade de infiltração da célula em um intervalo de tempo dado, nenhum fluxo sai desta célula. Caso contrário, o valor excedente flui para fora da célula. Este cálculo segue o que consta da equação do balanço hídrico [Ren03] mostrado na Equação (2).

$$P - E_{int} - E_s - E_p - Q_{out} + Q_{in} - I = 0 \quad (2)$$

P é a precipitação, E_{int} é a parte da precipitação interceptada pelo dossel e evaporada em seguida. E_s é a água evaporada do solo, E_p é a transpiração pelas plantas, Q_{out} é o escoamento superficial de saída, Q_{in} é a água que entra no sistema, e I é a quantidade de água infiltrada em um intervalo de tempo Δt . Como essa aplicação não considera a evaporação, esta equação (3) terá a seguinte formulação:

$$P - Q_{out} + Q_{in} - I = 0 \quad (3)$$

A Figura 16 mostra os componentes desta equação.

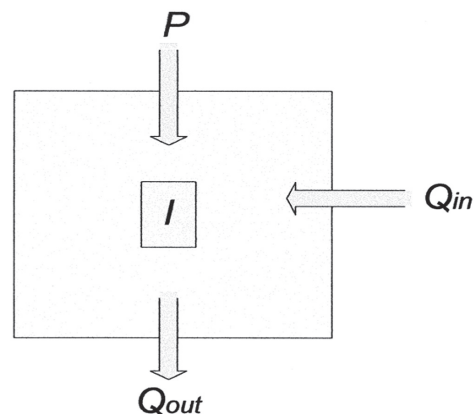


Figura 16 - Diagrama da equação de balanço hídrico simplificada

5.2 IMPLEMENTAÇÃO DA APLICAÇÃO

A implementação desta aplicação foi realizada em cinco etapas. Na primeira etapa, realizou-se uma redução de pontos para a geração da triangulação pelo SPRING. Dessa triangulação foram extraídos os fluxos locais para a criação do grafo. Na segunda etapa foram criados dois grafos, um para os fluxos locais extraídos do modelo DEM e outro para os fluxos locais gerados a partir do modelo TIN.

Na terceira etapa, dois outros grafos foram criados, um para cada modelo de dados, contendo as informações de infiltração e precipitação para cada nó do grafo. No caso do modelo DEM, havia um valor de infiltração e de precipitação para cada célula da grade, que foram mapeados para um nó no grafo. No modelo TIN, foram coletados valores de infiltração e de precipitação somente para as células da grade que foram selecionadas no processo de redução de dados. Na quarta etapa, o processo de cálculo acumulado do escoamento superficial foi executado. Finalmente, na quinta etapa os dados foram mapeados de volta do grafo para os modelos DEM e TIN para serem visualizados no SPRING.

5.3 CÁLCULO DO VALOR DE FLUXO ACUMULADO DA APLICAÇÃO

O cálculo do valor de fluxo acumulado considera a capacidade de infiltração de cada célula em relação à quantidade de chuva que cai nela e que flui até ela vindo de suas células vizinhas. Cada célula é mapeada para um nó no grafo e, portanto, o valor de fluxo acumulado será calculado para cada nó, e nele armazenado. No modelo TIN cada aresta é mapeada para um nó no grafo. Os valores de precipitação e infiltração estão nos vértices dos triângulos. Para cada aresta, tomam-se os valores médios dos dois vértices que formam a aresta.

A função, do cálculo do valor do fluxo acumulado, foi aplicada para gerar o grafo a partir dos fluxos locais extraídos do modelo DEM e do modelo TIN. Os valores do fluxo acumulado em cada nó do grafo, juntamente com a sua posição geográfica, foram armazenados em arquivos para serem visualizados no SPRING.

As ilustrações da Figura 17 mostram o resultado da execução da aplicação para dois valores de corte do fluxo acumulado, a partir do modelo DEM. Os números associados a cada gráfico mostram os valores de corte usados na seleção de cada conjunto de fluxos acumulados.



Figura 17 - Fluxos acumulados extraídos do grafo de fluxos locais a partir do modelo DEM. O número associado a cada figura indica o valor de corte do fluxo acumulado

O resultado dos fluxos acumulados extraídos a partir do modelo TIN pode ser visto na Figura 18. Os gráficos apresentados nesta Figura mostram a densificação dos fluxos locais, de acordo com o aumento do valor de corte de fluxo acumulado.

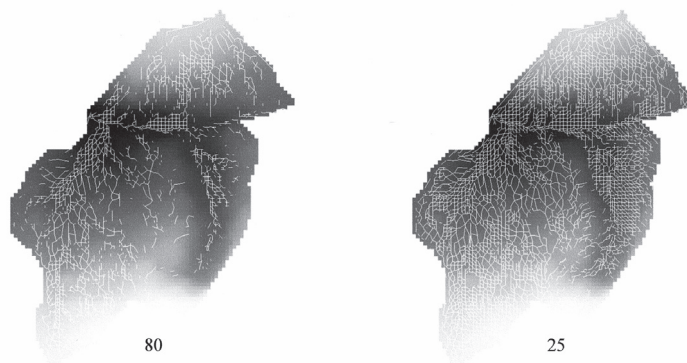


Figura 18 - Fluxos acumulados extraídos do grafo de fluxos locais a partir do modelo TIN. O número associado a cada figura indica o valor de corte do fluxo acumulado



Pode-se observar que os resultados obtidos a partir do modelo TIN não apresentam a qualidade esperada em uma aplicação. Isto se deve, principalmente, ao algoritmo de redução de pontos utilizado. Este algoritmo foi escolhido pela facilidade de sua implementação. Além disso, não era objetivo deste trabalho escolher o melhor algoritmo, mas sim mostrar a viabilidade da presente proposta. Pode-se, porém, observar que os padrões de expansão dos fluxos locais acumulados coincidem nos dois conjuntos.

6. CONCLUSÕES

Este artigo mostra uma mudança na forma de estruturação e manipulação dos fluxos locais empregados no processamento distribuído dos recursos hídricos. Os sistemas existentes acoplam os fluxos locais aos modelos de representação do terreno, de onde esses fluxos foram extraídos. Vinculam, portanto, a estruturação e a manipulação dos fluxos locais ao modelo de dados de relevo usado.

Este trabalho apresenta uma proposta alternativa baseada na unificação da representação dos fluxos locais, acabando com o acoplamento entre a representação dos fluxos locais e o respectivo modelo de dados de relevo. Os fluxos locais passam a ser armazenados em uma única estrutura de dados. Usou-se a estrutura de grafos para representação e manipulação dos fluxos locais.

O grafo é uma estrutura que armazena informações de objetos e dos relacionamentos entre esses objetos. Cada modelo de representação do terreno define uma partição da bacia hidrográfica. O fluxo local relaciona duas células vizinhas. Dessa forma, os fluxos locais são mapeados diretamente para o grafo.

O grafo, criado a partir dos fluxos locais, pode armazenar outras informações, para que aplicações que usam dados tais como declividade, tipos de solos, tipos de rochas, precipitação, uso e cobertura do solo, etc. Estas informações são importantes para o desenvolvimento de aplicações mais complexas envolvendo o grafo. Esta ligação entre comportamento da água na bacia hidrográfica e essas outras informações da bacia indica que deve-se acoplar as funções desta proposta com um Sistema de Informações Geográficas (SIG). Para isto, os dados foram armazenados na biblioteca TerraLib, que é uma biblioteca para desenvolvimento de SIG.

O propósito da presente proposta é facilitar o uso de mais de um modelo de dados de relevo para que se possa aproveitar das vantagens de cada um desses modelos na representação dos fluxos locais de uma bacia hidrográfica. Algumas características desta proposta são:

- a) A estrutura de grafo é adequada para a representação e manipulação de fluxos locais. O grafo é uma maneira natural de representar ligações entre objetos. Pode-se lançar mão dos algoritmos já existentes para executar cálculos sobre o grafo, como os algoritmos de percorrimento do grafo, tais como busca em profundidade (depthfirst search), ordenação topológica, algoritmo de Dijkstra de caminho mínimo, algoritmo para cálculo de valores cumulados, etc;
- b) Facilita a utilização de mais de um MRT. Os sistemas, normalmente, escolhem um MRT para executar todo o processamento relativo aos RH. Toda expansão de funcionalidade é realizada com esse MRT. Os outros MRT não são empregados por conta do tempo a ser despendido na implementação de suas funções. O tempo pode ser usado em novas funcionalidades do sistema, mantendo o MRT já utilizado. O emprego de mais de um MRT possibilita a obtenção da melhor representação de fluxo local para cada aplicação;

- c) Permite fácil inserção de novo MRT. A criação do grafo utilizando um conjunto de fluxos locais, determinados a partir de um novo MRT, implica no desenvolvimento da funcionalidade relativa à inserção desses fluxos locais no grafo. Todos os aspectos referentes à manipulação desses fluxos já estão prontos para a sua utilização;
- d) Generalidade da proposta. Embora a estrutura de grafo seja adequada ao processamento dos fluxos locais, pode-se empregar outra estrutura qualquer para o armazenamento e a manipulação dos fluxos locais.

Os trabalhos futuros a partir desta proposta são de desenvolvimento de um sistema para tratamento dos recursos hídricos utilizando a Terralib, denominado de TerraHidro, e de solução de problemas em aberto, tais como: composição de dois grafos a partir de dois ou mais grafos, sendo cada grafo gerado de fluxos locais extraídos de modelos de representação de terreno diferentes. Outro problema em aberto diz respeito à associação espacial dos fluxos locais com outros elementos existentes na bacia, tais como tipo de solo, uso e cobertura do solo, etc.

KEYWORDS

Hydrological Resources – Local Flows – Graphs – Terrain Models

ABSTRACT

The local flow distribution in a water basin is the most important element for developing distributed hydrology modeling oriented to hydrological resources management. The underlying premise is that terrain topography is the primary factor in determining these local flows. Mathematical representations and computer data structures for terrain topography and a set of functions for extracting the surface water flow have long been explored by GIS practitioners. The basis for terrain topography representation in GIS is the partitioning of the total region area in a set of elements. Different computer data structures based on regular grids (DEM), triangular irregular networks (TIN), contour lines and irregular polygons tessellations have long been used to represent terrain topography. This situation establishes that the local flow representation is entirely dependent upon the data structure used to represent the terrain topography. To overcome this drawback we present a new framework. Its fundamental concept is providing a formal representation as a basis for a unified computer local water flow data structure independent of the data structures used for representing terrain topography. The main advantage of this approach is to decouple the local flow representation from the set of operations necessary for its manipulation. A set of operations for water basin modeling and management applications can then be formally defined and a computational framework for spatially explicit distributed hydrology modeling can be designed. New data structures for surface representation can be incorporated into this framework with no impact on existing running models. In order to proof the proposed concepts a simple, but much used, distributed hydrological model has been implemented using a hydrological modeling prototyping environment based in Haskell and TerraLib GIS library (Terra-HS). The same model was implemented in the PCRaster system.



REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [Ana06] ANA. *Água: fatos e tendências*. Agência Nacional de Águas. 2006. Disponível em: <http://www.ana.gov.br/bibliotecavirtual>. Acesso em: 03 Março 2008.
- [BuMc98] BURROUGH, PETER A.; MCDONNELL, RACHAEL A. PRINCIPLES OF GEOGRAPHICAL INFORMATION SYSTEMS. 1.ED. NEW YORK: OXFORD UNIVERSITY PRESS, 1998. 333P
- [CaSP00] Câmara, G.; Souza, R. C. M.; Pedrosa, B.; Vinhas, L.; Monteiro, A. M. V.; Paiva, J. A.; Carvalho, M. T. M.; Gattass, M. *TerraLib: technology in support of GIS innovation*. In: *Brazilian Symposium on GeoInformatics, II, 2000*, São Paulo, GeoInfo2000, p. 12-13.
- [Cha04] CHAKRAVARTY, A. P. A. M. *Interfacing Haskell with Object-Oriented Language*. In: *International Workshop on the Implementation of Functional Languages, 15*. Lübeck, Germany: Springer-Verlag, 2004.
- [Che89] CHEW, L. Paul. *Constrained Delaunay triangulations*. *Algorithmica*, v. 4, n. 1, p. 97-108, 1989.
- [CIMP95] CLACK, Chris; MYERS, Colin; POON, Ellen. *Programming with Miranda*. Ed. Prentice Hall, 1995. 312 p.
- [Cocp06] Costa, S. S.; Câmara, G.; Palomo, D. M. Terra. *HS: integration of functional programming and spatial databases for GIS application development*. In: *Brazilian Symposium on GeoInformatics, VIII, 2006*, Campos do Jordão, GeoInfo2006, p. 109-127.
- [DaGo07] DAKOWICZ, M.; GOLD, C. M. Finite difference method runoff modeling using Voronoi cells. In: *WORKSHOP ON UPDATING GEO-SPATIAL DATABASES WITH IMAGERY & THE 5TH WORKSHOP ON DMGISS, 2007*, URUMCHI, CHINA ISPRS, P. 55-60.
- [DaMA07] DANNER, A.; YI, K.; MØLHAVE, T.; AGARWAL, P. K.; ARGE, L.; MITASOVA, H. *TerraStream: From Elevation Data to Watershed Hierarchies*. In: *ACM GIS, 2007*, Seattle. *Proceedings of the 15th International Symposium on Advances in Geographic Information Systems*, New York. Ed. ACM, 2007, p. 212-219.
- [DaSh88] DAWES, W. R.; SHORT, D. L. *TOPOG series topographic analysis and catchment drainage modelling package: user manual*. Canberra, CSICO, 1988.
- [Dhi98] DHI-Danish Hydraulic Institute MIKE SHE water movement - user guide and technical reference manual, 1.1 ed., 1998.
- [Deu95] DEURSEN, Wiilem P. A. Van. *Geographical Information Systems and dynamic models development and application of a prototype spatial modelling language*. 1995. 126 p. PhD Thesis, Faculty of Spatial Sciences, University of Utrecht.
- [Erw01] ERWIG, Martin. *Inductive graphs and functional graph algorithms*. *Journal of Functional Programming*, v. 11, n. 5, p. 467-492, sep. 2001.
- [GaMa97] GARBRECHT, Jurgen; MARTZ, Lawrence. W. *Automated channel ordering and node indexing for raster channel networks*. *Computers and Geosciences*, v. 23, n. 9, p. 96-146, nov. 1997.
- [GaOD01] GARBRECHT, Jurgen; OGDEN, Fred L.; DEBARRY, Paul A.; MAIDMENT, David R. *GIS and distributed watershed models. I: data coverages and sources*, *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 6, n. 6, p. 506-514, nov./dec. 2001
- [Gra93] GRASS 4.1 User's reference manual. U.S. Army Corps of Engineers Construction Engineering Research Laboratory, Champaign, 1993.

- [HuHJ07] HUDAK, P.; HUGHES, J.; JONES, S. P.; WADLER, P. A history of Haskell: being lazy with class. In: ACM SIGPLAN History of Programming Languages Conference, III, 2007, San Diego, Califórnia. HOPL-III, p. 55.
- [JeDo88] JENSON, Susan K.; DOMINQUE, Julia. O. Extracting topographic structure from digital elevation data for geographic information systems. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, v. 54, n. 11, p. 1593–1600, nov. 1988.
- [Jon02] JONES, Simon Peyton. Haskell 98 language and libraries - the revised report, 2002.
- [Kawb97] KARSSENBERG, Derek; WESSELING, C. G.; BURROUGH, Peter A.; VAN DEURSEN, W. P. A. A simplified hydrological runoff model. Department of Physical Geography, Utrecht University. 1997. Disponível em: <http://pcraster.geo.uu.nl/demos.html>. Acesso em: 15 jun. 2004.
- [Kis04] KISS, Richárd Determination of drainage network in digital elevation models, utilities and limitations. *Journal of Hungarian Geomathematics*, vol 2, p. 16-29, 2004.
- [LeGa00] LEE, Ickjai; GAHEGAN, Mark. Iterative analysis using Voronoi diagrams: algorithms to support dynamic update from a generic triangle-based data structure. Scientific Literature Digital Library, 2000. Disponível em: <http://citeseer.ist.psu.edu/291713.html>. Acesso em: 3 Dez 2007.
- [Mai02] MAIDMENT, David. R. Arc Hydro: GIS for water resources. ESRI Press, Redlands CA, 2002, p. 220, 2002.
- [Mio07] MIOC, Darka. Reversibility of the quad-edge operations in the Voronoi data structure. In: International Symposium on Voronoi Diagrams in Science and Engineering (ISVD), n.4, p. 9-11 July 2007, Universidade de Glamorgan. Disponível em: <http://ieeexplore.ieee.org/iel5/11131/35646/01691201.pdf>. Acesso em: 10 Ago 2007.
- [MoGL91] MOORE, I. D.; GRAYSON, R. B.; LADSON, A. R. Digital terrain modelling: a review of hydrological, geomorphological, and biological applications. *Hydrological Processes*, v. 5, n. 1, p. 3–30, 1991.
- [NaNg00] NASA - National Aeronautics and Space Administration and NGA - National Geospatial-Intelligence Agency The shuttle radar topography mission (SRTM), 2000.
- [NeJM94] NELSON, E. James; JONES, Norman L.; MILLER, A. Woodruff Algorithm for precise drainage-basin delineation. *Journal of Hydraulic Engineering*, v. 120, n. 3, p. 298-312, mar. 1994.
- [Ren03] RENNÓ Camilo Daleles. Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas. 2003, 148 p.. Doutorado em Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), São José dos Campos.
- [RoKo06] ROZOS, Evangelos; KOUTSOYIANNIS, Demetris. A multicell karstic aquifer model with alternative flow equations. *Journal of Hydrology*, v. 325, n. 1-4, p. 340-355, jun. 2006.
- [Ryb00] RYBARCZYK, Scott Michael. Formulation and testing of a distributed triangular irregular network rainfall/runoff model. 186 f. Tese – Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, 2000.
- [SoGr94] SOILLE, Pierre, GRATIN, C. An efficient algorithm for drainage network extraction on DEMs. *Journal of Visual Communication and Image Representation*, v.5, n.2, p.181-189, jun. 1994.



- [TuLG01] TUCKER, Gregory E.; LANCASTER, Stephen Thomas; GASPARINI, Nicole M.; BRAS, Rafael L.; RYBARCZYK, Scott M. An object-oriented framework for distributed hydrologic and geomorphic modelling using triangulated irregular networks. *Computers & Geosciences*, v.27, n.8, p. 959–973, oct. 2001.
- [Usg90] USGS - U.S. Geological Survey Digital elevation models: data users guide. National mapping program, technical instructions, data users guide 5, Department of the Interior, Reston, 1990.

SOBRE OS AUTORES

Sergio Rosim

Graduado em Ciências da Computação pela Universidade Federal de São Carlos – UFSCar, turma de 1976, tem Mestrado em Eletrônica, ênfase em Computação pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA, São José dos Campos. Atualmente, é aluno de doutorado no Curso de Computação Aplicada do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE. Trabalha desde 1984 na Divisão de Processamento de Imagens – DPI/INPE. Tem atuado profissionalmente em projetos ligados à Modelagem Numérica de Terrenos.

Antônio Miguel Vieira Monteiro

Antonio Miguel Vieira Monteiro é graduado em Engenharia Elétrica pela Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, turma de 1984, e tem seu Mestrado em Computação Aplicada pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, e seu Doutorado em Engenharia Eletrônica e Controle/Ciência da Computação (Electronic Engineering and Control/Computer Science – EECS), obtido no Centro de Ciências Espaciais (Space Science Centre) da Escola de Engenharia e Ciências Aplicadas (School of Engineering and Applied Sciences) da University of Sussex (The University of Sussex at Brighton) em outubro de 1993 – Trabalha desde abril de 1985 no INPE, na Divisão de Processamento de Imagens – DPI – Atua como tecnologista sênior no INPE há 22 anos e leciona nos cursos de pós-graduação em Sensoriamento Remoto e Computação Aplicada – Coordena a Rede Saudável, que avalia o uso das tecnologias da informação espacial no apoio ao controle de endemias – É também o atual coordenador do Programa Espaço e Sociedade do Inpe.

Camilo Daleles Rennó

Doutor em Sensoriamento Remoto pelo Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE) e graduado em Engenharia Agrônoma pela Universidade Estadual Paulista (UNESP) – Leciona no curso de pós-graduação em Sensoriamento Remoto do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE/São José dos Campos-SP) e no Curso Internacional em Sensoriamento Remoto (INPE/Santa Maria-RS) e participa da Rede Geoma dentro do grupo de Física Ambiental – Os principais temas de atuação são Radar, Processamento de Imagens, Modelos Numéricos de Terreno, Modelagem Hidrológica e Estudos da Amazônia.

João Ricardo de Freitas Oliveira

Tecnologista Sênior da Divisão de Processamento de Imagens do Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – DPI/INPE – Doutor em Computação Aplicada pelo INPE – Mestre em Mecânica Orbital/Ciência Espacial pelo INPE – Engenheiro Eletrônico pelo Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA – Áreas de interesse: processamento de imagens, geometria computacional, reconhecimento de padrões, morfologia matemática, algoritmos genéticos, programação funcional.