

## TERRAHIDRO - UMA PLATAFORMA COMPUTACIONAL PARA O DESENVOLVIMENTO DE APLICATIVOS PARA A ANÁLISE INTEGRADA DE RECURSOS HÍDRICOS

SERGIO ROSIM<sup>1</sup>  
ANTONIO MIGUEL VIEIRA MONTEIRO<sup>1</sup>  
CAMILO DALELES RENNÓ<sup>1</sup>  
RICARDO CARTAXO MODESTO DE SOUZA<sup>1</sup>  
JOÃO VIANEI SOARES<sup>1</sup>

<sup>1</sup>INPE – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515, 12201-970 São José dos Campos - SP, Brasil  
{sergio, miguel, camilo, cartaxo} @dpi.inpe.br  
vianei@ltid.inpe.br

**Abstract:** This paper describes the concepts, the architecture and the main design guideline for **TerraHidro**, a computational platform designed as an open source environment for the development of geographical applications in the context of hydrological modeling, that takes the hydrological basin as the unit for integrated analysis. **TerraHidro** is strongly based on the concept of geographic database. It is built upon the concepts and implementations provided by **TerraLib**. We present some architecture layers that have been already implemented, we discuss new possibilities for the special data structures in the context of hydrological problems, and we point out the needs for the future and the way we planning to undertake these challenges.

**Keywords:** dtm, hydrological modeling, database

### 1. Motivação

O conhecimento do ciclo hidrológico é essencial para responsáveis pelas políticas de desenvolvimento. A expansão demográfica e econômica a necessidade de novos mecanismos de mediação e controle tomando-se a bacia como unidade principal de manejo.

A capacidade de avaliar o estado geral cenários prospectivos para os recursos naturais de bacias hidrográficas é tarefa básica dos órgãos de gestão de águas. Ambientes computacionais que possam tratar de forma integrada, e em diferentes escalas, os dados espaciais de uma bacia hidrográfica, são instrumentos essenciais no estabelecimento das políticas de água em diferentes escalas.

Os Sistemas de Informação de Geográfica, SIG, embora tenham avançado muito na integração de dados espaciais, ainda não foram adequadamente desenhados para permitir o estudo de fenômenos em que dinâmica espaço-temporal deve ser tratada explicitamente. A questão de tratar os recursos hídricos tendo a bacia como unidade de análise é um exemplo típico.

Neste trabalho, apresentamos os conceitos, a arquitetura e os primeiros resultados de um aplicativo geográfico em desenvolvimento para atender a demanda por ambientes computacionais que possibilitem o estudo *hidrológico* integrado na unidade da bacia, o **TerraHidro**. Este sistema integra funções como capturar, representar, armazenar, manipular, recuperar e processar no espaço e no tempo informações (propriedades físicas e sócio-ambientais) inerentes aos elementos espaciais das bacias, em ambiente geo-computacional. Com o uso destes aplicativos, esperamos auxiliar o desenho dos sistemas de uso sustentável da água.

### 2. TerraHidro: Um Ambiente Computacional para Hidrologia

Nesta sessão, os conceitos que nortearam a concepção de **TerraHidro** são apresentados com uma discussão sobre a arquitetura proposta e informação sobre o estágio de desenvolvimento de cada bloco.

## 2.1 Conceitos Básicos

**TerraHidro** é uma plataforma desenhada para facilitar o desenvolvimento de aplicativos na área de recursos hídricos, permitindo incorporar o componente geográfico às soluções propostas. Entre as características importantes do **TerraHidro** está o processamento de dados espacialmente distribuídos e de natureza espaço-temporal. O conceito básico em **TerraHidro** é o uso extensivo de um banco de dados com conteúdo geográfico e de algoritmos para as relações funcionais hidrológicas que trabalham sobre os dados armazenados nesta base.

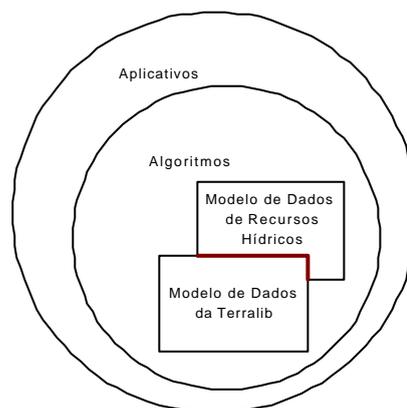
Optou-se por fazer uso da biblioteca **TerraLib** (Câmara et al.,2000) e Câmara et al., 2001) e de seu modelo de dados. Assim a plataforma **TerraHidro** incorpora o sistema de gerenciamento de banco de dados através dos *drivers* **TerraLib**, o que torna bem mais simplificada a tarefa de construção de banco de dados com atributos espaciais e temporais. O importante é ressaltar que todo o conjunto de dados estará armazenado em bancos de dados. Assim aplicativos simples que permitam a realização de consultas diretas sobre os dados armazenados no modelo proposto em **TerraHidro**, podem apresentar uma interface que implemente somente consultas SQL. Pode-se dizer, na prática, que o Banco de dados foi estendido para trabalhar com conceitos, funções e variáveis hidrológicas.

## 2.2. Arquitetura

A arquitetura do TerraHidro pode ser dividida em quatro camadas:

- O Sistema Gerenciador de Banco de Dados;
- O Banco de Dados de Hidrologia;
- Os Algoritmos Hidrológicos;

Os Aplicativos Específicos. A **Figura 1** mostra o esquema da arquitetura do **TerraHidro**.



**Figura 1.** Estrutura da plataforma integrada **TerraHidro**.

### O Sistema Gerenciador de Banco de Dados - SGBD

O modelo de dados da **TerraLib** é implementado através de *interfaces* diretas com o sistema gerenciador de banco de dados utilizado, apresentados como os *drivers* **TerraLib**, disponíveis hoje para ADO, MySQL, PostGRES, Oracle e Oracle Spatial. As funções de inserção, recuperação e eliminação de atributos descritivos e geometrias, bem como a estrutura de recuperação de dados espaço-temporais são implementadas por funções e/ou classes do *kernel* TerraLib, conforme Câmara et al. (2001). O modelo de dados da **TerraLib** é de propósito geral, tenta servir a qualquer tipo de aplicação.

### O Banco de Dados Hidrológico.

O modelo de dados deve considerar as particularidades dos atributos da rede hidrológica para facilitar o desenvolvimento de algoritmos para operar com um grau semântico mais forte, refletindo estruturas de dados com mais significado no universo da aplicação. Um exemplo é a estrutura para armazenamento de redes do modelo **TerraLib**. Redes são estruturas gerais e existem em diversos domínios de aplicação. Com uma hierarquização particular para cada arco desta rede, podemos estar transformando uma estrutura geral de topologia arco-nó em uma estrutura de rede, de mesma topologia mas agregando um *significado de uso*, como, por exemplo, uma *rede hidrológica*.

Em alguns casos, essa agregação de significado passa pela construção de um modelo de dados específico e da implementação de *interfaces (drivers)* necessária para sua materialização em um SGBD. Em outros casos são *funções e/ou classes* que recuperam e manipulam informações obtidas diretamente do modelo **TerraLib** geral e agrega a estes dados recuperados um significado de uso no contexto de um processamento específico. Estas *funções e/ou classes* serão apropriadas pela camada de Algoritmos Hidrológicos.

### **Algoritmos Hidrológicos**

A camada seguinte da arquitetura é composta pelo conjunto de algoritmos que vão operar sobre os dois modelos de dados (**TerraLib** e o *Modelo de Dados Hidrológicos - MDH*), produzindo uma nova estrutura de dados, para serem persistidas (novas *tabelas e relacionamentos*), que serão agregadas ao *MDH* ou usadas em memória (*classes*), para a execução de um processamento que gera novos resultados, que podem ser novamente persistidos ou somente visualizados. Um exemplo de Algoritmo Hidrológico é o procedimento computacional para delimitação de bacias, dado os segmentos de uma *rede de drenagem*. Com a definição de uma hierarquia, teríamos nossa *rede hidrológica*, e um corte sobre esta rede com significado de uso resultaria numa divisão em bacias, que poderiam ser persistidas, nas estruturas definidas na camada *MDH*, e/ou visualizadas.

### **Os Aplicativos Específicos**

A última camada é formada pelas aplicações que usam dos algoritmos para tratamento de variáveis hidrológicas num contexto específico. Trata-se do problema clássico de desenho de interface homem-máquina e de acomodação de requisitos dos usuários, desde sistemas pequenos e rápidos de visualização de dados e atributos até sistemas mais complexos que possibilitam a execução de modelos de simulação de cenários para situações críticas da bacia. Um exemplo seria um **TerraFlood**, aplicativo geográfico destinado à delimitação de manchas de inundação, outro seria um **TerraBasin**, dedicado a análises de erosão do solo, descarga e qualidade de água, e assim por diante.

## **2.3. Onde Estamos: Primeiros Resultados**

Iniciamos pela camada de Algoritmos Hidrológicos, e em particular pelo conjunto de algoritmos que tratam da *hidrografia*, que aproveita a estrutura básica de armazenamento e recuperação de dados no espaço e no tempo pelos *drivers TerraLib*, tendo a **bacia como unidade de análise**. É fundamental termos algoritmos capazes de capturar e representar um modelo espacial para a bacia, contendo, no mínimo, as informações de relevo. Estão disponíveis três esquemas computacionais no TerraHidro, baseados no relevo, para representação dos elementos da paisagem na bacia: as grades regulares retangulares, as grades triangulares irregulares (TIN ou triangulação), e uma representação, baseada nas linhas de contorno, que gera elementos de bacia como polígonos irregulares, como no modelo TOPOG (Soares e Rennó, 2001, Dawes e Short, 1994). As duas primeiras estão implementadas no universo **TerraLib**, e a última, em teste, está implementada em IDL – Interactive Data Language. Estas estruturas podem hoje ser persistidas com base no modelo de dados **TerraLib** e seus recursos. Podem ser guardadas no modelo matricial, com uso do *TeRaster*,

ou em uma geometria de células, com o uso do *TeCell*, ou em uma estrutura de polígonos irregulares conectados.

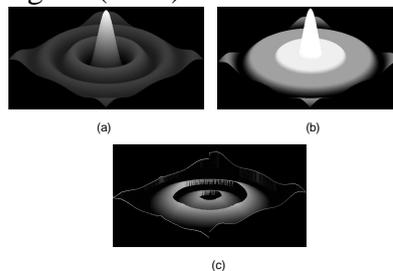
*Redes de drenagem* de diferentes ordens são então extraídas, a partir de um Algoritmo Hidrológico. Com a inserção de uma hierarquização sobre as *redes de drenagens* produzidas, que possuem a definição de direções de fluxo entre elementos vizinhos, temos as *redes hidrológicas*, obtidas a partir de outro Algoritmo Hidrológico. Sobre esta rede um novo algoritmo pode delimitar bacias e sub-bacias numa região escolhida. Procuramos acomodar aqui o conceito de algoritmos genéricos de Austern (1998). As estruturas de representação do espaço geográfico da bacia mudam, de TIN, para Grades ou para elementos naturais, no entanto, os algoritmos desenhados são suficientemente genéricos para obter uma sub-divisão da bacia em sub-bacias, independente da representação geométrica dos elementos da bacia.

Nesta primeira fase, os algoritmos para extração da *rede de drenagem* trabalham sobre grades regulares retangulares e sobre elementos naturais. A seguir são descritas as implementações já realizadas. Para este estudo, foi selecionada uma sub bacia de um afluente do rio Corumbataí, SP com uma área de aproximadamente 930 ha. A informação básica utilizada foi a altimetria, extraída de uma carta topográfica apresentada na escala 1/50000, na projeção UTM/CórregoAlegre, datum 45<sup>o</sup> 00' 00''.

### 2.3.1 Grades Regulares Retangulares

Uma maneira de fracionar a área da bacia em elementos da paisagem, é construir um modelo digital de elevação (MDE), capturados e representados através das curvas de nível. Com base neste modelo podemos desenvolver métodos que busquem identificar, extrair e representar as linhas de drenagem presentes na bacia representada por seu MDE. Neste artigo, o algoritmo para extração de linhas de drenagem, foi implementado em *função* C++, e é nossa primeira abordagem para o Algoritmo Hidrológico (Soille Soille e Gratin,1994), Rosim e Pellegrino,2001).

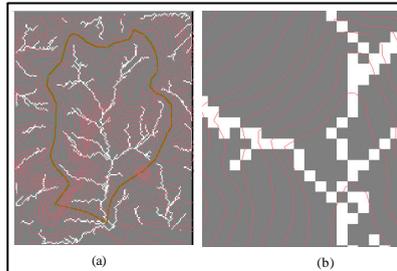
As depressões aparecem, em sua grande maioria, na interpolação para a geração de uma grade regular, a partir de amostragens do relevo (curvas de nível). Nas regiões planas, não é possível definir o sentido do fluxo da água, pois os valores de elevação são praticamente iguais, e elas também são artificiais, em sua maioria criadas pelo interpolador. A eliminação das depressões, por meio de operador morfológico Soille Soille e Gratin (1994), provoca o aparecimento de regiões planas adicionais. Para eliminá-las, o método cria um relevo artificial, utilizando-se da distância geodésica a partir dos pontos de mínimo que fazem fronteira com cada região plana, possibilitando assim, a definição de fluxos nessas regiões. A **Figura 2** ilustra o procedimento para criação de relevos artificiais que possibilitam a continuidade do fluxo Rosim e Pellegrino (2001).



**Figura 2.** (a) Imagem original; (b) Preenchimento de áreas planas; (c) Criação de rampas.

É importante observar que a maioria das depressões são artificiais, porém algumas não o são, como, por exemplo, a rede de drenagem. Essas situações particulares não são tratadas na atual implementação e devem merecer atenção nas próximas etapas do trabalho. Uma solução é a imposição de *restrições geográficas*, que serão passadas como parâmetros da função, a partir de uma definição do usuário em nível de interface do aplicativo específico.

Nas regiões planas, porém, cursos virtuais deverão ser criados em seu interior ligando o(s) fluxo(s) que chega(m) ao(s) que sai(em) da região. Poderá ser usada a técnica do eixo médio (“medial axis”) de Choi et al. (1997). A **Figura 3** mostra a *rede de drenagem* obtida pelo algoritmo implementado sobreposta às amostras do relevo. Para geração da grade de altimetria foi utilizado o interpolador linear de média ponderada por cota quadrante.

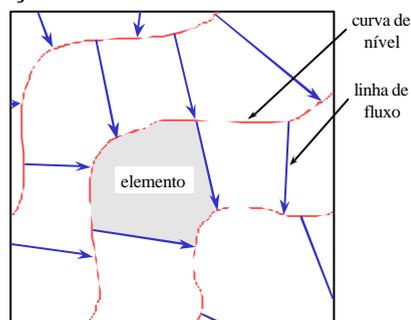


**Figura 3.** Drenagem, na cor branca, com grade regular. (a) drenagem + altimetria; (b) Detalhe da drenagem em relação às curvas de nível.

Este processamento produz resultados intermediários que podem ser persistidos no banco. São duas grades: a grade de direção de fluxo, chamada de LDD (*Local Drainage Network*), e a grade de fluxos acumulados, chamada de ACM, gerada a partir da LDD. A *rede de drenagem* é o conjunto conectado de elementos lineares (*linhas*), que pode ser armazenada em uma estrutura de redes com topologia arco-nó, como é feito neste momento da implementação. Estamos agora trabalhando em uma estrutura que utiliza a base de representação da TerraLib e constrói sobre ela uma outra rede, mas que tem agora para seus arcos e seus nós, um conjunto adicional de informações, como por exemplo o sentido do fluxo e os elementos de paisagem da bacia *vizinhos* a cada segmento da rede montada.

### 2.3.2 Elementos naturais: Discretização por curvas de nível

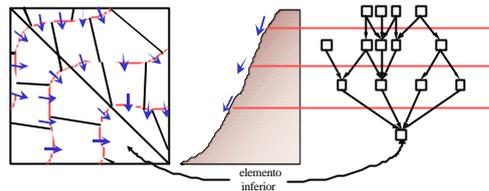
Um outro método de fracionamento da bacia, baseado no uso das curvas de nível como indicadoras da estrutura natural da bacia, proposto na literatura específica de hidrologia, tem sido usado com frequência em modelos hidrológicos e de qualidade de água, uma vez que é construído com base na mecânica de fluidos, através da determinação de linhas de fluxo Moore et al. (1993). Esta técnica de discretização foi inicialmente proposta por Onstad e Brakensiek (1993). Um elemento típico neste tipo de discretização é representado por um polígono irregular formado por dois segmentos de curvas de nível e duas linhas de fluxo (**Figura 4**). Os modelos TAPES-C Moore e Grayson (1991) e TOPOG Dawes e Short (1994), utilizam este método de discretização.



**Figura 4** Definição de um elemento típico construído a partir de linhas de fluxo com base num MDE representado por curvas de nível

A grande vantagem da discretização baseada em curvas de nível é a simplificação das relações topológicas entre elementos, conservando a naturalidade destas relações. Conceitualmente, o percurso da água se dá sempre no sentido do declive e trocas entre

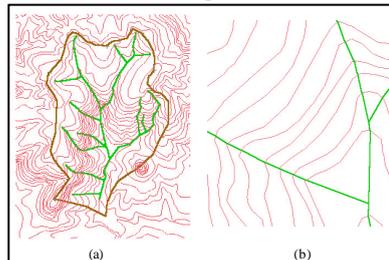
elementos de mesma cota são desconsideradas. No entanto, deve-se considerar que as relações entre elementos normalmente não são 1:1, uma vez que um elemento pode receber o fluxo d'água proveniente de mais que um elemento, e pode transferir o fluxo também para mais de um elemento, como mostrado na **Figura 5** Esta opção de discretização foi implementada em IDL (*Interactive Data Language*).



**Figura 5** Relação topológica entre elementos definida pela direção dos fluxos.

Outra implementação refere-se ao desenvolvimento de um algoritmo para a extração de *rede de drenagem*, que no momento está sendo testado e será incorporado como uma função C++, como um outro Algoritmo Hidrológico possível para a extração automática de *redes de drenagem*.

A idéia básica do algoritmo é a determinação de linhas de fluxo com base na mínima distância entre curvas de nível e considerando-se também o ângulo que esta linha de fluxo faz com cada uma das curvas de nível que a originaram, garantindo desta maneira que as linhas sejam relativamente perpendiculares às curvas de nível. A **Figura 6** apresenta a drenagem extraída a partir das curvas de nível utilizando o algoritmo anteriormente descrito.



**Figura 6.** Linhas de drenagem calculadas (azul) em (a) e em (b) detalhe da drenagem com a altimetria mostrando o traçado nos pontos de inflexão das curvas de nível.

### 2.3.3 Redes Hidrológicas: Hierarquia na Rede de Drenagem

Um rio e seus afluentes formam no espaço uma rede estruturada. Para que essa rede possa ser utilizada no contexto hidrológico, a ela deve ser atribuída uma ordem, que define uma hierarquia, a ser utilizada na delimitação da área de uma bacia e de suas sub-bacias. A ordem neste tipo de rede começa nos pontos mais altos, nas nascentes, recebendo o valor *um* (1) referente à menor ordem. Em cada encontro de um rio com um afluente tem-se o aumento da ordem. Esta *rede de drenagem* com sua hierarquização é o tipo de estrutura que chamamos de *rede hidrológica*. Nossa primeira abordagem para a hierarquização de uma *rede de drenagem*, adotou o modelo básico existente na **TerraLib** para armazenar estruturas de redes. Um algoritmo foi criado para implementar a ordenação sobre esta rede, tomando os seus arcos, criando uma estrutura de rede em memória, e calculando a ordenação da rede com base na sua semântica. Finalmente, a cada arco da rede, armazenado no banco de dados, atribui-se a respectiva ordem, como um atributo novo para o arco.

Quando se atribui uma hierarquia a uma *rede de drenagem*, confere-se a ela um valor de uso em um contexto específico a esta rede, uma semântica, relativa aos conceitos hidrológicos. Esta nova *rede*, com contexto de uso, é a nossa *rede hidrológica*. Essa

hierarquização serve, principalmente, para delimitar bacias e sub-bacias e os relacionamentos entre elas.

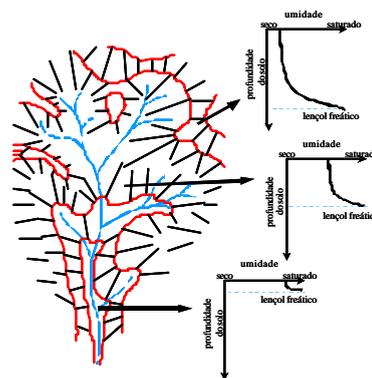
### 3.1 Hidrodinâmica

Nos pacotes de SIG atuais, que tratam com elementos da modelagem hidrológica, a hidrodinâmica é tratada externamente por outros modelos, e seus resultados são retornados ao SIG em uso para visualização. As informações sobre a calha do rio e das séries históricas com os níveis de água dos perfis são usadas pelo modelo que calcula então cotas de inundação ao longo dos rios em análise. A perspectiva é tornar o acoplamento entre modelos externos e as representações computacionais para os elementos de paisagem da bacia com mais facilidades para seu acoplamento. Neste caso vamos usar o conceito de um “*Binder*” Hidrológico em **TerraHidro**. Elementos que permitam a conexão entre um *Algoritmo Hidrológico* em **TerraHidro** e um modelo externo, com a troca de dados necessária sendo resolvida por estes *binders*. Assim, um aplicativo que produz a delimitação de áreas de inundação pode ser produzido com um grau de integração bem mais forte que as atuais plataformas permitem. Partindo do uso de código aberto, diversos “sockets” podem ser produzidos para os diferentes modelos, que em geral usam uma linguagem de programação diferente da linguagem base em **TerraHidro**.

### 3.2 Modelo Hidrológico Distribuído

O balanço d’água no solo baseia-se na solução da equação de Richards que define que mudanças no conteúdo de água no tempo são resultantes de mudanças de fluxos d’água ao longo do perfil do solo.

Para cada elemento irregular é feito o balanço d’água computando-se as entradas (chuvas, escoamentos laterais superficiais e sub superficiais) e calculando-se as saídas (escoamentos laterais, extração de água pelas raízes e evaporação). Os escoamentos laterais resultantes deste balanço são repassados aos elementos vizinhos localizados à jusante do mesmo. A **Figura 7** mostra este conceito.



**Figura 7.** Modelo hidrológico distribuído.

### 3.3 TerraHidro: Um Trabalho em Andamento

No momento, os algoritmos já desenvolvidos estão sendo inseridos na **TerraLib**. Um corte e uma reestruturação destes está produzindo algoritmos que estarão em **TerraLib**, exemplo, interpoladores e outros que são da camada *Algoritmos Hidrológicos* no **TerraHidro**. A tarefa de identificar atributos e funções comuns e cortes não é simples e exige cuidados. Testes estão sendo realizados para que se possa aferir a qualidade dos resultados já no ambiente **TerraLib/TerraHidro**, através de comparações com resultados conhecidos obtidos a partir do SPRING Câmara et al. (1996).

Também atua-se na definição dos elementos da camada *Modelo de Dados Hidrológicos*. Aqui, a preocupação é identificar e definir os objetos e relacionamentos necessários às aplicações hidrológicas. A idéia é avançar para estender os tipos do Modelo **TerraLib**, possibilitando a criação de tipos de dados para fácil manipulação nos problemas hidrológicos. Estes estudos seguem em conjunto com a camada de *Algoritmos Hidrológico*.

Espera-se obter em breve uma versão da plataforma TerraHidro, disponibilizada na internet e possibilitando a construção de aplicativos em algumas áreas dos estudos hidrológicos, em particular morfometria e modelos de carga na bacia. O que sabemos hoje é que temos muitos problemas em aberto e desafios computacionais importantes dentro da área de engenharia de sistemas de geoinformação (Vinhas (2002)).

#### 4. Bibliografia

- Lima, W.P. Importância das Florestas para Produção de Água, Simpósio sobre Recuperação da Cobertura Florestal da Bacia do Rio Corumbataí, Piracicaba, IPEF/ESALQ, 2000.
- Câmara, G.; Vinhas, L.; Souza, R.C.M.; Paiva, J.A.; Monteiro, A.M.V.; Carvalho, M.T.; Raoult, B. Design Patterns in GIS Development: The TerraLib Experience, GeoInfo 2001, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2001.
- Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Pedrosa, B.M.; Vinhas, L.; Monteiro, A.M.V.; Paiva, J.A.; Carvalho, M.T.; Gattass, M. TerraLib: Technology in Support of GIS Innovation”, II Workshop Brasileiro de Geoinformática, GeoInfo2000, São Paulo, 2000
- J.V. Soares, C.D. Rennó, “Comparing Contour-Line Based and Regular Grids for Spatial Representation of Drainage Basins”, to be submitted.
- Dawes, W.R.; Short, D.L. The Significance of Topology for Modelling the Surface Hydrology of Fluvial Landscapes, *Water Resour. Res.*, 30(4):1045-1055, 1994.
- Austern, M. Generic Programming and the STL: Using and Extending the C++ Standard Template library, Reading, MA, Addison-Wesley, 1998.
- Soille, P.; Gratin, C. An Efficient Algorithm for Drainage Network Extraction on DEMs, *Journal of Visual Communication and Image Representation*, v.5, N.2, June, 1994.
- Rosim, S.; Pellegrino, S.R.M. O SPRING e a Hidrologia: Início de uma Caminhada, GeoInfo 2001, Instituto Militar de Engenharia, Rio de Janeiro, 2001.
- Choi, H.I.; Shoi, S.W.; Moon, H.P. New Algorithm for Medial Axis Transform of Plane Domain, *Graphical Models and Image Processing*, v.59, n.6, November, 1997.
- Moore, I.D.; Grayson, R.B. Terrain-based Catchment Partitioning and Runoff Prediction using Vector Elevation Data, *Water Resources Research*, 27:1177-1991, 1991.
- Moore, I.D.; Turner, A.K.; Wilson, J.P.; Jenson, S.K.; Band, L.E. GIS and Landsurface-Subsurface Process Modeling, In: Goodchild, M.F.; Parks, B.O.; Steyaert, L.T; ed.. *Environmental modeling with GIS*, New York, Oxford University Press, Cap. 19, p. 196-230, 1993.
- Onstad, C.A.; Brakensiek, D.L. Watershed Simulation by Stream Path Analogy, *Water Resources Research*, 4:965-971, 1968. Whitehead, P.G.; Robinson, M. Experimental basin studies: an international and historic perspective of forest impacts. *Journal of Hydrology*, 145:217-230, 1993.
- Broadbridge, P.; White, I. Constant Rate Rainfall Infiltration: a Vesatile Nonlinear Model1. Analytic Solution, *Water Resour.*, 24, 145-154, 1988.
- Câmara, G.; Souza, R.C.M.; Freitas, U.M.; Garrido, J.C.P. SPRING: Integrating Remote Sensing and GIS with Object-Oriented Data Modelling, *Computer and Graphics*, v.15, n.6, July, 13-22, 1996.
- Vinhas, L. Engenharia de Sistemas de Geoinformação: Fundamentos e Exemplos, Exame de Qualificação. Doutorado Computação-INPE, Setembro, 2002 (A ser publicado como Relatório Técnico do INPE- RT/INPE)