

## Programação Orientada a Objetos para Desenvolvimento e Integração de um Modelo Hidrológico Distribuído Chuva-Vazão a um Sistema de Informações Geográficas Livre

Cristiano das Neves Almeida, Alain Marie Bernard Passerat de Silans

Laboratório de Recursos Hídricos e Engenharia Ambiental/UFPB

almeida74br@yahoo.com.br; alainsilans@yahoo.com.br

Edson Wendland

Departamento de Hidráulica e Saneamento – EESC/USP

ew@sc.usp.br

Jackson Roehrig

Institute for Technologies in the Tropics – Cologne University of Applied Sciences - Germany

Jackson.Roehrig@fh-koeln.de

Recebido: 02/08/07 – revisado: 22/06/07 – aceito: 25/10/07

---

### RESUMO

Apresenta-se neste artigo a implementação do modelo hidrológico distribuído de tipo chuva-vazão (AÇUMOD), baseado em conceitos da Programação Orientada a Objetos. Por meio desta técnica, a bacia hidrográfica e seus componentes (rios, captações d'água, barramentos, etc) são representados através de classes, o que facilita o entendimento dos códigos computacionais. Descreve-se também sua integração ao OpenGIS JUMP, que é um Sistema de Informações Geográficas livre e de código aberto. Este modelo hidrológico integrado ao JUMP compõe parte do Sistema de Suporte à Decisão Espacial (SSDE) denominado ARENA.

Este Sistema de Suporte à Decisão Espacial é totalmente livre, de código aberto, e pode ser executado tanto em plataforma Windows® como em Linux. O uso de OpenGIS JUMP e as facilidades trazidas pela Programação Orientada a Objetos à sistematização de sistemas complexos aparecem como as grandes vantagens da metodologia proposta. O SSDE foi aplicado à bacia hidrográfica do Rio Gramame (estado da Paraíba), comprovando a funcionalidade da ferramenta desenvolvida.

**Palavras-chave:** programação orientada a objetos, AÇUMOD, sistema de suporte à decisão.

---

### INTRODUÇÃO

A partir de 1997, com a promulgação da Política Nacional de Recursos Hídricos, Lei 9.433, as questões de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos vêm notadamente ganhando espaço no cenário nacional. Cinco ferramentas encontram-se previstas nessa lei, dentre as quais o sistema de informações sobre recursos hídricos. Esse sistema tem como objetivo principal a coleta, a consistência e a disponibilização de informações qualitativas sobre recursos hídricos no Brasil.

Tratar de questões de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos significa utilizar algumas das ferramentas do trinômio Sistema de Suporte à Decisão – SSD, Sistemas de Informações Geográficas – SIG e modelos hidrológicos.

Diversos exemplos de uso dessas três ferramentas podem ser encontrados em: Porto & Azevedo, 1997; Azevedo et al., 1998; Souza Filho, 1999; Almeida, 2001; Tsou & Whittemore, 2001; Cavalcanti, 2002; Rodrigues, 2005; Porto et al. 2005, entre outros.

Os SSD's são aplicativos utilizados no apoio à tomada de decisão sobre os recursos hídricos. Segundo Porto & Azevedo (1997) são três seus principais componentes: a base de dados; a base de modelos e a interface de diálogo. Os SIG's, em conjunto com bancos de dados georeferenciados, têm o objetivo de sistematizar as informações sobre recursos hídricos, para que os dados possam ser analisados espacialmente (Arctur & Zeiler, 2004). Já os modelos, de acordo com Tucci (1998), são utilizados a fim entender e representar o comportamento de bacias

hidrográficas e prever condições diferentes das observadas.

Nos últimos dez anos, os avanços da Tecnologia de Informação (TI) conduziram a mudanças na área de recursos hídricos, no que diz respeito ao desenvolvimento e aplicação das três ferramentas citadas. Modelos como o SWAT (Arnold et al., 1993), que durante muito tempo foi executado em sistema DOS, passou a ser executado em sistema Windows® e foi incorporado a um SIG, o que o torna seu uso mais atrativo. Atualmente, SIG's, de forma mais comum, passaram a integrar os SSD's, facilitando assim a entrada de dados para os modelos que compõem os SSD's. Os SIG's permitem o tratamento de informações de forma espacial e integrada. O ArcView® é um dos SIG's mais utilizados para tal propósito (Tsou e Whittemore, 2001). Porém, mais recentemente, com o surgimento dos sistemas de informações geográficas livres e de código aberto, conhecidos como os OpenGIS's, novas demandas de integração de modelos a esses sistemas têm surgido, é o caso de Almeida (2006), Jolma et al. (2006).

Outros avanços da TI são a Programação Orientada a Objetos (POO), o uso de formatos como o XML (*Extensible Markup Language*) e o UML (*Unified Modeling Language*), que têm melhorado a representação de sistemas complexos, em especial sistemas hídricos. A POO é uma forma de programação que procura representar o sistema a ser implementado por meio de classes descrevendo objetos reais. O XML é uma linguagem de marcação para formatação de arquivos. Já a UML é uma linguagem visual para representação, especificação, documentação, visualização e desenvolvimento de sistemas implementados de acordo com os conceitos da POO. Para representação de sistemas por meio da UML devem ser especificados o nome de cada classe, seus atributos e seus métodos (Figura 1).

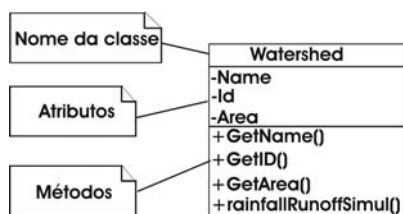


Figura 1 - Representação geral de uma classe em UML

Essas novas tecnologias, ao representarem as entidades existentes de forma semelhante à realidade

de sob a forma de classes, diagramas e formatos padronizados, tornam fácil a representação, o armazenamento, a manipulação e a troca de dados entre sistemas especialistas (Lal et al., 2005).

No contexto nacional, Viegas Filho e Lanna (2003) apresentaram a aplicação de conceitos da POO para desenvolvimento do modelo PROPAGAR MOO, que simula a propagação de vazões em bacias hidrográficas. Segundo os pesquisadores a grande vantagem da utilização da POO diz respeito à forma como os sistemas de recursos hídricos são representados, ou seja, de forma similar à realidade.

Wang et al. (2005a, 2005b) utilizaram a POO para implementação de uma nova versão do conhecido modelo hidrológico TOPMODEL (Beven & Kirkby, 1979) chamado de OBJTOP. Nesse modelo, a bacia hidrográfica é formada por classes que representam a precipitação, a evapotranspiração, a vegetação, o solo e os canais. Utilizaram a linguagem computacional C++. Os autores concluíram entre outros que a POO cria a oportunidade de explorar novos significados para descrever fenômenos hidrológicos complexos.

Este artigo tem como foco principal a aplicação de novos conceitos de TI para o desenvolvimento de um Sistema de Suporte à Decisão Espacial (SSDE) denominado ARENA (Análise de Recursos Naturais). Este SSDE é composto por simuladores de sistemas hídricos, entre os quais o modelo AÇUMOD, cuja implementação baseada em POO é descrita. O simulador do fluxo de águas subterrâneas, outro componente do ARENA, é descrito em Almeida et al. (2007). O ARENA é composto de um OpenGIS (JUMP – *Java Unified Mapping Platform*, 2003), uma base de dados georeferenciada e as GUI's (*Graphical User Interface*), que são os módulos de diálogo responsáveis pelo acesso a dados, execução de modelos, visualização e análise dos resultados. O uso do JUMP se traduz numa inovação trazida por este artigo, pois, em geral, os SIG's utilizados para compor os SSD's são comerciais, sendo o ArcView® um dos mais utilizados. Este trabalho foi desenvolvido com a linguagem Java e o ambiente de programação Eclipse, que não implicam em custos financeiros para o aplicativo desenvolvido.

Em seqüência, descreve-se a estrutura do modelo AÇUMOD, seguida de sua implementação computacional através da POO. Para tanto, faz-se uso da linguagem UML, que segue um padrão internacional proposto pelo consórcio *Object Management Group* ([www.omg.org](http://www.omg.org)). É descrita a integração do modelo ao OpenGIS JUMP, compondo assim o SSDE ARENA. Uma aplicação sucinta à bacia do rio

Gramame, no estado da Paraíba, é apresentada. Por fim, são apresentadas as conclusões.

## METODOLOGIA

A metodologia utilizada para o desenvolvimento do presente trabalho foi dividida em três etapas: 1) análise detalhada da estrutura do modelo chuva-vazão AÇUMOD; 2) Reestruturação e programação do AÇUMOD em Java, utilizando conceitos da POO; 3) integração do modelo a um OpenGIS.

## O modelo AÇUMOD

O modelo AÇUMOD (Silans *et al.*, 2000) é um modelo distribuído conceitual que simula o processo de transformação da chuva em vazão. Uma característica singular deste modelo é que o mesmo realiza o balanço hídrico dos elementos hidráulicos (açudes, captações d'água, etc.) existentes na rede de drenagem. Estes elementos modificam o regime de escoamento de uma bacia hidrográfica.

Em simulações com o AÇUMOD, a bacia hidrográfica e suas sub-bacias são discretizadas e representadas por quadrículas. Em cada uma destas, determinam-se as quantidades de Zonas Hidrológicas Homogêneas (ZHH's), que são áreas que estando em uma mesma condição inicial de umidade e ocorrendo sobre elas uma precipitação idêntica, produzirão respostas hidrológicas idênticas. As ZHH's são definidas a partir da superposição de mapas de usos do solo, vegetação, pedologia, etc. Realiza-se um balanço hídrico diário, a fim de determinar por quadrícula as lâminas evaporadas, infiltradas, armazenadas no solo, percoladas e escoadas superficialmente. As saídas do modelo, ou seja, essas lâminas acumuladas são apresentadas para um passo de tempo mensal.

A conceitualização do ciclo hidrológico é feita por meio de um conjunto de quatro reservatórios, para os quais são determinadas estas lâminas. O primeiro reservatório disponibiliza uma quantidade de água que será repartida em escoamentos superficial e infiltrado, no segundo reservatório. O terceiro reservatório é responsável pela geração do escoamento sub-superficial. O último reservatório gera o escoamento de base. As equações utilizadas no processamento desses cálculos são lineares.

A transferência dos escoamentos superficiais entre quadrículas é feita através do método das Isócronas. Para cada quadrícula é calculada, em dias, a zona isócrona em que ela se encontra, utilizando o

tempo de concentração da bacia hidrográfica e as declividades da mesma linha de fluxo até o exutório. Maiores detalhes sobre a estrutura do AÇUMOD podem ser encontrados em Silans *et al.* (2000) e Almeida (2006).

A

Figura 2 representa um esquema da sobreposição de camadas (*layers*) de um SIG, a fim de determinar os atributos ou informações de cada quadrícula do esquema de discretização.

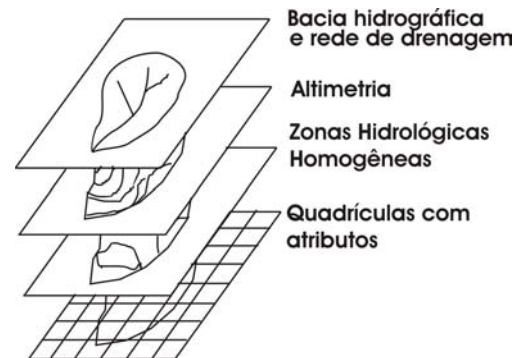


Figura 2 – Sobreposição de camadas para determinação das propriedades das quadrículas no modelo

Para a realização de simulações com o AÇUMOD é necessária uma série de dados. Em geral, estes dados encontram-se relacionadas a uma entidade geométrica, quais sejam: ponto, linha, polígono ou matriz de pontos (*raster*). Dessa forma, é conveniente a representação destas informações através de camadas de um SIG. A seguir, são apresentadas as principais informações requeridas para o processo de modelagem e a entidade geométrica que a representa:

1. Bacia hidrográfica – Camada com o limite desta entidade (polígono);
2. Rede de drenagem – Camada com os principais rios da bacia hidrográfica (linhas);
3. Estações pluviométricas, evaporimétricas e fluviométricas – Camadas com os postos pluviométricos, evaporimétricos e fluviométricos (pontos), localizados dentro ou na vizinhança da bacia. A estas camadas são relacionados os valores monitorados;
4. Zonas Hidrológicas Homogêneas (ZHH) – Camada representativa das diferentes ZHH (polígonos). À cada uma dessas ZHH associa-se um conjunto de parâmetros;

5. Exutórios das sub-bacias e da bacia – Camada com pontos de saídas das sub-bacias e da bacia hidrográfica (pontos);
6. Barragens superficiais (Açudes) – Camada com a localização dos açudes (pontos), à qual são associados os atributos dos açudes (nome, curva cota-área-volume, cotas mínimas e máximas, etc.);
7. Captações a fio d'água – Camada com a localização destas entidades (pontos), à qual são associados atributos da captação (nome, data de implantação, vazão, etc.);
8. Altimetria – Camada contendo informações topográficas da bacia hidrográfica (*raster*). Essa camada pode ser gerada através de um MDT (Modelo Digital do Terreno) ou mesmo por um arquivo contendo um conjunto de pontos x, y e z.

Através de ferramentas de superposição de camadas de um SIG, determinam-se os atributos da camada que contém as quadriculas (*CellsAtt*) de discretização da bacia hidrográfica.

### Utilização da POO para implementação do modelo

A implementação computacional da nova versão do AÇUMOD baseou-se em conceitos da POO. Para tanto, a linguagem Java da *Sun Microsystems* (1997) foi escolhida para programação e, como ambiente de desenvolvimento, o Eclipse foi escolhido por ser um software livre e de código aberto. A principal vantagem e motivo de escolha destas ferramentas foi o custo, já que o Java não é uma linguagem proprietária. Já o ambiente de programação Eclipse encontra-se disponível na WEB ([www.eclipse.org](http://www.eclipse.org)). Além disto, a adoção da linguagem Java permite também o uso gratuito de uma série de ferramentas. A exemplo tem-se a JFreeChart, que foi utilizada para o desenho de gráficos. Ademais, o Java é uma linguagem multi-plataforma, de maneira que o produto final pode ser executado tanto no sistema operacional Windows® como no Linux.

Na POO, o desenvolvimento de um programa concentra-se na criação de classes, que são entidades abstratas representativas de elementos de um sistema real. As classes são formadas por atributos, que são as características do sistema real, e métodos, que são suas funções. Um reservatório superficial (açude) é um exemplo de uma classe, que teria como atributos os seus volumes máximo, mínimo e morto.

As simulações diárias e mensais do balanço hídrico seriam métodos desta classe. Esta classe passa a ser um objeto a partir do momento que ela é criada (instanciada em tempo de execução) para ser usada num programa.

Viegas Filho & Lanna (2003) e Wang et al. (2005a, 2005b) apresentaram trabalhos nessa linha de pesquisa, onde a POO foi utilizada para implementação de modelos hidrológicos.

A POO conta com inúmeros conceitos que são intrínsecos a esta forma de programação. Os mais importantes e mais utilizados são:

- Generalização, que são classes que contém atributos e métodos gerais;
- Especialização, que ocorre no momento da criação de classes a partir de classes gerais. Na classe especializada são criados atributos e métodos específicos dessa nova classe;
- Herança, que está relacionada aos dois itens anteriores. Quando da criação de classes especializadas (subclasses) a partir de classes generalizadas (superclasses), todos os atributos e métodos da superclasse são herdados pela subclasse.

As características intrínsecas da POO conduzem a códigos mais simples, permitindo o reuso de classes e a criação de novas classes a partir de superclasses, evitando-se assim a repetição de códigos. Com relação ao modelo implementado, um conjunto de classes e pacotes (agrupamento de classes por finalidade comum) foi idealizado (Figura 3).

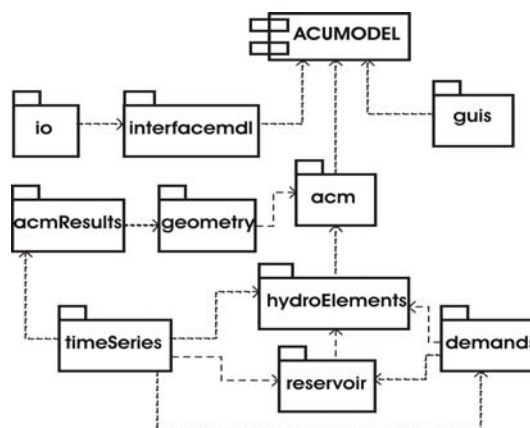


Figura 3 - Pacotes e classe principal do modelo AÇUMOD

Os pacotes que compõem este modelo e a sua classe principal (a *ACUMODEL*) são descritos resumidamente a seguir:

- Pacote *io* – Responsável pela leitura e armazenamento de dados em arquivos;
- Pacote *interfacemdl* – Responsável pela integração do SIG e do simulador. Por meio da classe *ACM\_JUMP*, são extraídos os atributos de uma camada de informações formato *shape (\*.shp)*, do SIG. Com esses atributos, são criados os objetos (entidades geométricas) representativos do sistema a ser simulado;
- Pacote *guis* – São as janelas de entrada, saída e edição de dados. Através delas, os elementos e características de uma bacia hidrográfica podem ser acessados, os procedimentos executados e os resultados das simulações disponibilizados e analisados;
- Pacote *acmResults* – Composto por classes que armazenam os resultados da simulação do ciclo hidrológico;
- Pacote *geometry* – Formado por classes que representam a geometria característica do AÇUMOD. Dentre estas classes, a *CellAtt* é a mais importante, pois é a unidade de simulação do modelo;
- Pacote *acm* – Composto por quatro classes, sendo responsável pela simulação do processo de transformação da chuva em vazão, execução do método de Thiessen e cálculo do tempo de concentração. É dependente dos pacotes *hydroElements*, que contém a bacia hidrográfica e seus elementos hidráulicos, e do pacote *geometry*, que trata da discretização da bacia hidrográfica em quadrículas;
- Pacote *timeSeries* – Serve para armazenar conjunto de dados diários, mensais e anuais, por exemplo, séries pluviométricas, fluviométricas, etc. Os dados hidroclimáticos podem ser resultantes de medições ou séries de dados resultantes de simulações;
- Pacote *hydroElements* – Composto pelas classes que representam o sistema a ser simulado. Nesse pacote, há classes que representam a bacia hidrográfica e seus componentes;
- Pacote *demands* – Formado por três classes, sendo a *DailyDemand* e *MonthlyDemand* as mais importantes, que armazenam dados diários e mensais de demandas. A terceira classe serve para enumerar os oito tipos de

demandas possíveis: abastecimento humano, animal, industrial, irrigação e outras demandas possíveis, sendo que estas podem ser consideradas retiradas diretamente de um açude ou por meio de vazões liberadas pelas descargas de fundos dos açudes para abastecimento a jusante;

- Pacote *reservoir* – Este pacote é um subpacote do *hydroElements*. As classes do pacote *reservoir* são responsáveis pela descrição de sistemas de reservatórios superficiais;
- Classe *ACUMODEL* – Classe principal do simulador chuva-vazão, pelo fato de que, através dela, as demais classes do projeto completo são acessadas, assim como os métodos para simulação de uma bacia são ativados. É nessa classe que os atributos necessários a uma simulação ficam armazenados.

O conjunto de pacotes anteriormente descrito é formado por inúmeras classes. Para resumir o processo de descrição destas classes, apresenta-se em seguida o conjunto de classes representativas da bacia hidrográfica, o pacote de geometria específico do AÇUMOD e as classes que compõem o pacote *acm*, responsável pela simulação do ciclo hidrológico.

O pacote *hydroelements* é composto por nove classes implementadas para representar bacias hidrográficas além de três classes nativas do Java (*Point2D*, *Area* e *GeneralPath*) (

Figura 4). É importante notar que as classes gerais *HydroLocation*, *River* e *Watershed* são criadas a partir de classes geométricas nativas do Java que as representam. Os elementos exutório (*Outlet*), captação d'água (*WaterCapture*), posto pluviométrico (*Gauge*) ou evaporimétrico (*Gauge*), posto fluviométrico (*DischargeGauge*) e açude (*reservoir*), que são representados geometricamente por um ponto, são criados a partir da classe *HydroLocation*. Esta classe geral contém os seguintes atributos: *id*, *name* e *elevation*, que caracterizam um ponto qualquer na bacia hidrográfica. A classe *HydroLocation* herda os atributos e métodos da classe nativa da linguagem Java, *Point2D*. Assim, para as entidades representáveis por ponto, há três níveis de classes. O primeiro nível é formado pela classe *Point2D* responsável pela representação geométrica. O segundo nível representa um ponto qualquer na bacia hidrográfica, sendo assim, uma classe mais geral. Especializando-se a classe *HydroLocation* chega-se ao terceiro nível, onde estão as classes representativas dos elementos hidráulicos de uma bacia hidrográfica, como é o caso

das classes *Outlet*, *WaterCapture*, *Gauge*. A classe representativa da estação fluviométrica (*DischargeGau-*

*ge*) é uma especialização da classe *Gauge*.

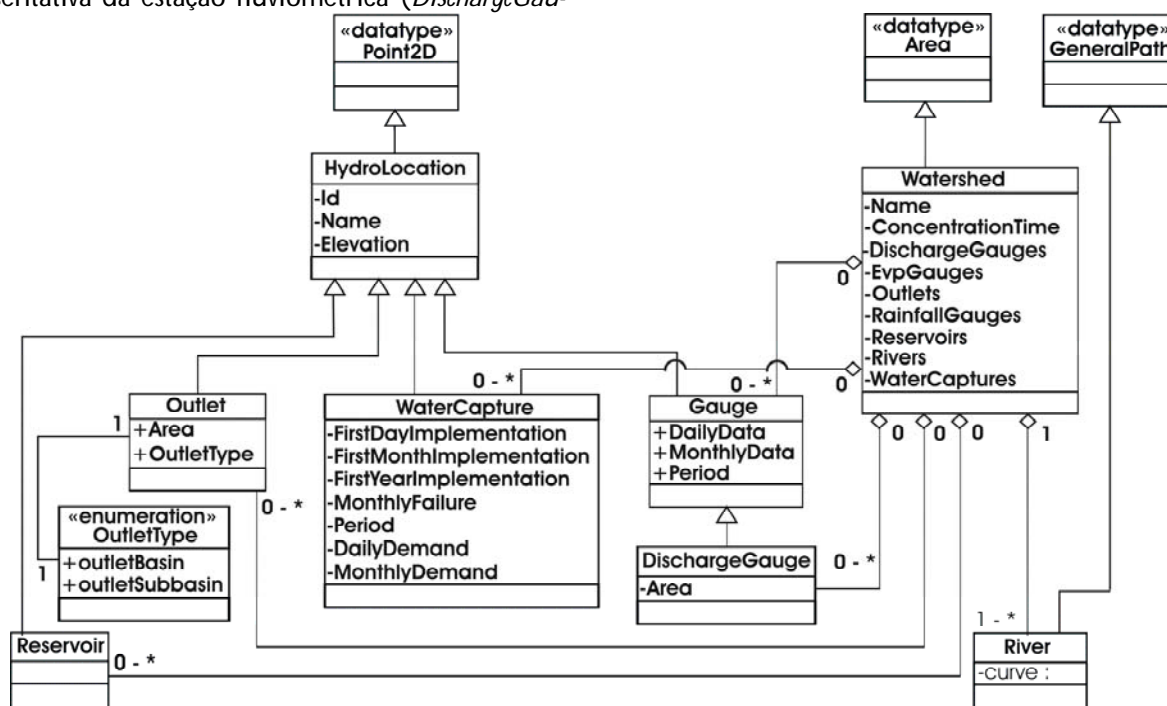


Figura 4 – Diagrama de classes do pacote hydroElements – Os termos foram mantidos em língua inglesa, para estarem em conformidade com o código desenvolvido

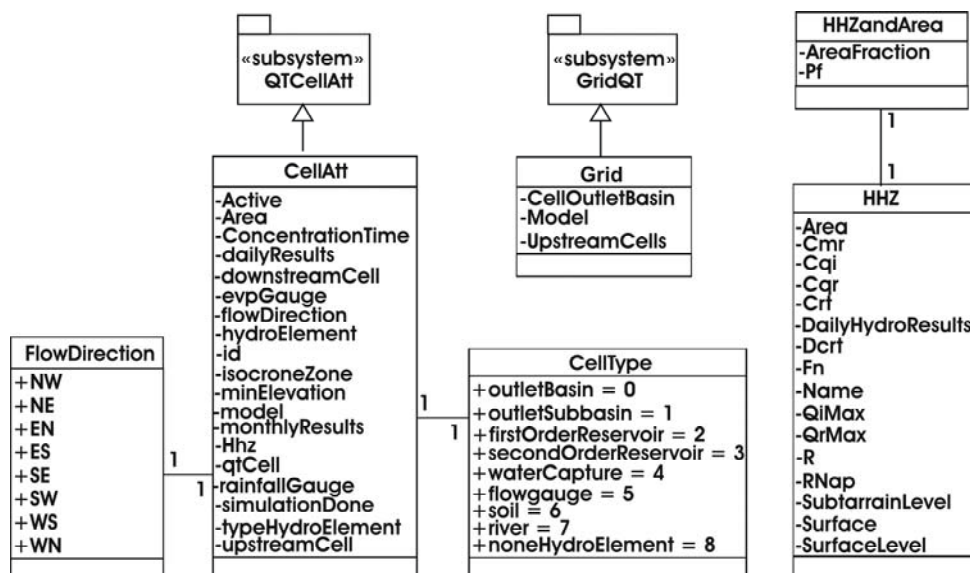


Figura 5 - Diagrama de classes do pacote geometry – Os termos foram mantidos em língua inglesa, para estarem em conformidade com o código desenvolvido



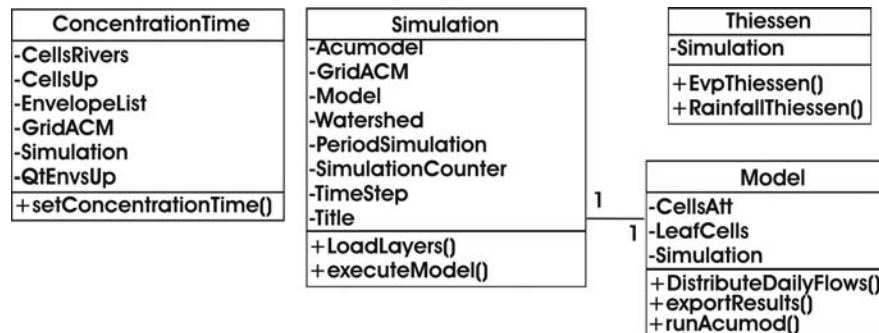


Figura 6 – Diagrama de classes do pacote acm – Os termos foram mantidos em língua inglesa, para estarem em conformidade com o código desenvolvido

Para a classe representativa da bacia hidrográfica, representada por um polígono, existem dois níveis de classes. O primeiro, a classe *Area*, nativa da linguagem Java, é responsável pela representação de um polígono de forma qualquer. No segundo nível, representado pela classe *Watershed*, programaram-se os atributos e métodos relativos a uma bacia hidrográfica. Pode-se ver, por exemplo, que esta classe tem como atributos postos fluviométricos, pluviométricos, evaporimétricos, açudes, captações d'água e exutórios. Percebe-se através da descrição anterior, que a POO permite programar uma entidade, por exemplo, a bacia hidrográfica, com a feição similar à realidade.

Na

Figura 4 são também desenhados os relacionamentos entre classes. Estes relacionamentos representam à realidade, por exemplo, uma bacia hidrográfica pode ter zero ou vários postos fluviométricos. Neste caso, o relacionamento entre as classes *Watershed* e *DischargeGauge* é do tipo zero para vários (0-\*). Outro exemplo, numa bacia hidrográfica sempre haverá um exutório, podendo haver vários exutórios de sub-bacias. Neste caso, o relacionamento entre as classes *Watershed* e *Outlet* é do tipo um para vários (1-\*).

Como o AÇUMOD representa a bacia hidrográfica por meio de quadrículas, onde o ciclo hidrológico é simulado, um pacote para representação da geometria foi implementado, o *geometry* (

Figura 5). É neste pacote que se encontra a classe *CellAtt*. Esta classe foi criada a partir da classe *QTCelAtt*, em que os métodos relacionados à descrição

geométrica, do tipo "quaisAsVizinhas", "qualAArea", estão programadas. Os atributos da *CellAtt* (

Figura 5) são os necessários à discretização da bacia e à modelagem. Por exemplo, o atributo *hydroElement* indica o tipo de elemento hidráulico da quadrícula. O atributo *minElevation* (altitude mínima) é utilizado para ordenar as quadrículas de acordo com o sentido de drenagem, atributo *flowDirection* é o definidor do sentido de drenagem. Os atributos *monthlyResults* e *dailyResults* armazenam os resultados mensais e diários da simulação do ciclo hidrológico. Já o atributo *Hhz* representa as zonas hidrológicas homogêneas que compõem a quadrícula. Já o *rainfallGauge* é o posto pluviométrico que tem área de influência na quadrícula.

Para realização dos cálculos que simulam o ciclo hidrológico, o pacote *acm* (Figura 6) foi implementado. Este pacote é formado por quatro classes. A classe *Simulation* é composta por atributos que representam a bacia hidrográfica (*watershed*), o modelo chuva-vazão (*Model*), o período de simulação (*periodSimulation*), o passo de tempo de cálculo (*timeStep*) e o conjunto de quadrículas (*gridACM*). O atributo *watershed* é o pacote anteriormente descrito na

Figura 4. Ademais, o pacote *acm* conta com uma classe para determinar o posto pluviométrico de influência de cada quadrícula (classe *Thiessen*). Na classe *ConcentrationTime* determina-se a zona isócrona de cada quadrícula e na classe *Model* simula-se o ciclo hidrológico. Na classe *Model* são efetuados todos os cálculos do AÇUMOD através do método *runAcumod()*.

## Integração do AÇUMOD a um OpenGIS

O OpenGIS utilizado para compor o ARENA é o JUMP, um SIG livre de código aberto, desenvolvido pela empresa canadense Vivid Solutions®. Entre as vantagens que este OpenGIS apresenta, três merecem destaque. Em primeiro lugar, a implementação computacional através dos conceitos da POO, em linguagem Java, o que facilita o entendimento de seu código computacional e permite a execução do mesmo em diferentes plataformas. Em segundo lugar, a implementação de seus códigos computacionais baseada em normas e padrões internacionais do consórcio *Open Geospatial Consortium* – OGC (2004), o que facilita a integração de classes existentes (programadas no JUMP) na programação de modelos hidrológicos. A última vantagem diz respeito aos custos financeiros, pois este OpenGIS encontra-se disponível gratuitamente na WEB.

O consórcio OGC, que vem criando normas e padrões para a área de geotecnologias, conta com documentação de padronização das camadas de informação, as quais são denominadas de *features*. É nas *features* que se encontram armazenadas a geometria e os dados tabulares relacionados à geometria. As *features* ainda guardam informações sobre o estado das camadas, tal como: cores, espessuras de linhas, objetos selecionados, etc. Sua utilização direta no processo de simulação implicaria no carregamento destas últimas informações, as quais não são necessárias a simulações. Assim, optou-se pela criação de um pacote *feat* representativo das camadas de informação, porém contendo apenas as entidades geométricas e as informações a estas relacionadas. O pacote *feat* é a interface entre as classes do modelo AÇUMOD e os dados externos que vêm de um SIG. Dessa forma, não há dependência direta entre o pacote criado e um SIG específico. Assim, o modelo hidrológico pode ser integrado a qualquer outro OpenGIS.

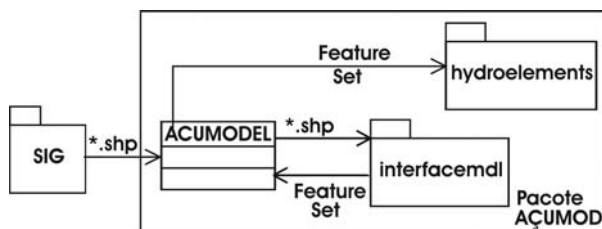


Figura 7 - Esquema de integração do modelo hidrológico AÇUMOD ao OpenGIS, através da interface *feat*

A Figura 7 ilustra o esquema utilizado para a integração das entidades geométricas do JUMP com as classes do AÇUMOD. Uma vez aberto (ou carregado) uma camada (do tipo *shapefile*, por exemplo) no JUMP, esta camada é enviada para a classe principal do pacote AÇUMOD, a *ACUMODEL*. Esta classe envia a camada para o pacote *interfacemdl*, que filtra as informações, retornando à classe principal apenas objetos do pacote *feat* (*Feature Set*), ou seja, objetos geométricos e dados tabulares relacionados a estes. Estes objetos, por sua vez, são utilizados para criar os objetos representativos do sistema em simulação, formados a partir do pacote *hydroelements*.

## APLICAÇÃO DO MODELO AÇUMOD

A fim de testar o modelo e as potencialidades do SSDE ARENA, foi realizada uma aplicação para a bacia hidrográfica do Rio Gramame. Esta bacia localiza-se no litoral do Estado da Paraíba, entre os paralelos de 7° 11' e 7° 23' (Sul) e os meridianos de 34° 48' e 35° 10' (Oeste) (Figura 8).

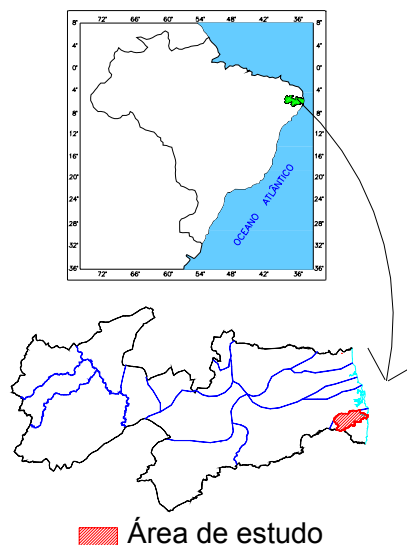


Figura 8 - Localização da bacia do Rio Gramame

Conta com uma área de 589 km<sup>2</sup>, onde escoam os três rios principais: Gramame, Mumbaba e Mamuaba. Nela localiza-se o açude Gramame-Mamuaba, com 56 milhões de m<sup>3</sup>, o qual é responsável pelo abastecimento de cerca de 24% da população do Estado da Paraíba, ou seja, 850 mil habitan-



tes (IBGE, 2000). Nesta região estão instaladas as principais indústrias do Estado. Desta forma, a bacia estudada tem uma importância fundamental para o desenvolvimento socioeconômico da Paraíba.

O período chuvoso concentra-se em 5 meses, compreendidos entre março e julho, tendo uma

precipitação anual média de aproximadamente 1.600 mm. Segundo a classificação de Köppen (1948), quase toda a região envolvida neste estudo localiza-se em clima tropical chuvoso. A evaporação, medida em tanque classe A na estação climatológica

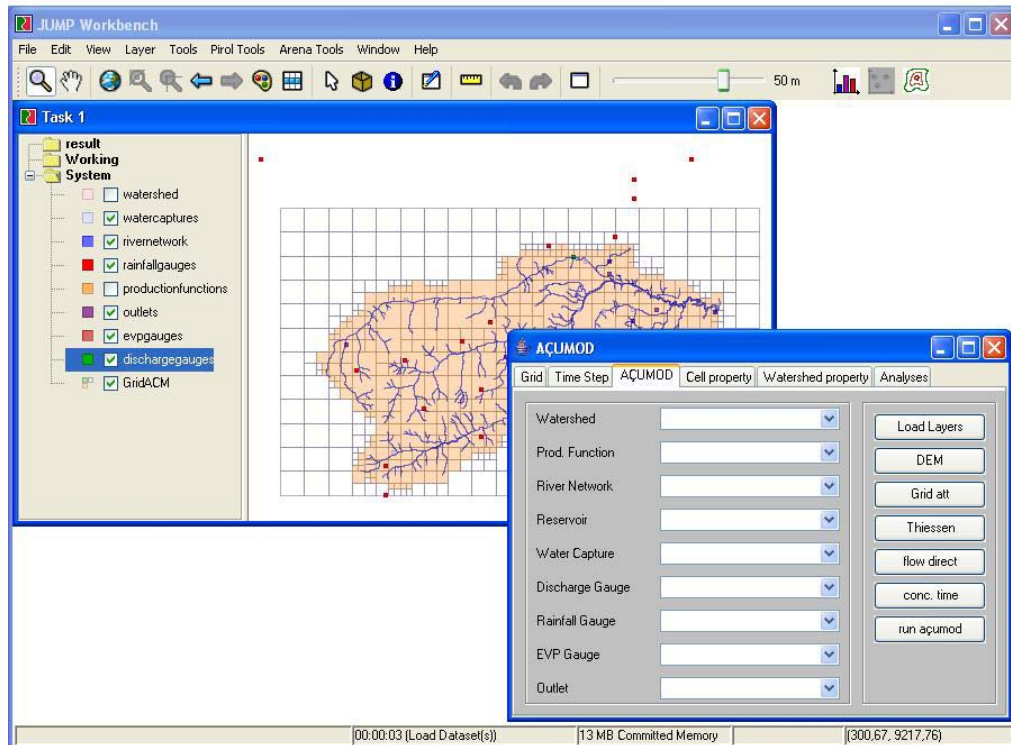


Figura 9 – Interface gráfica do sistema ARENA, do modelo AÇUMOD e discretização da bacia hidrográfica do Rio Gramame

de Marés, apresenta um valor médio de 1.300 mm/ano.

Para a calibração e validação do AÇUMOD foram utilizados 2 postos fluviométricos e foram considerados dados diários de: 15 postos pluviométricos, uma estação climatológica, para cálculo da evapotranspiração. Através da superposição de mapas de solo e geologia foi gerada uma camada contendo 5 Zonas Hidrológicas Homogêneas (ZHH). Sobre as ZHH's sabe-se que parte da bacia é coberta por Podzol Hidromórfico, ou seja, solos arenosos e profundos, com taxa de infiltração elevada e baixa retenção de água. São solos geradores de escoamento retardado. Já os solos podzólicos com fragipan, sejam eles com textura argilosa e textura média, apresentam permeabilidade razoável até encontrar em torno de 1,50 m de profundidade uma camada impermeável com fraturas. Solos desta natureza,

conduzem a escoamentos superficiais relativamente elevados. O aquífero do grupo Barreiras é alimentado por fraturas, conduzindo a água de precipitação em direção às calhas do rio com uma cinética bastante baixa. Esses solos predominam na bacia hidrográfica do rio Mumbaba.

A

Figura 9 apresenta a interface gráfica do sistema ARENA e do modelo AÇUMOD. Pode-se ver na figura, a bacia hidrográfica do Rio Gramame, já discretizada em quadriculas, os postos pluviométricos e a rede de drenagem.

O processo de calibração foi realizado para os postos fluviométricos de Mamuaba e Mumbaba, para o período compreendido entre janeiro de 1972 e abril de 1975. Os dois postos fluviométricos encontram-se no curso médio dos respectivos rios, a montante da barragem de Gramame-Mamuaba, portan-

to, os dados monitorados correspondem às vazões naturais. Neste artigo apenas os resultados do posto fluviométrico de Mamuaba são apresentados. Maiores detalhes sobre a aplicação do AÇUMOD a essa bacia podem ser encontrados em Almeida (2006).

A

Figura 10 apresenta os hidrogramas observado e calculado para o posto fluviométrico de Mamuaba. Na

Tabela 1 são apresentados os parâmetros usados para avaliar a qualidade da calibração.

A validação foi feita para o mesmo posto, no período de janeiro de 1975 a dezembro de 1977. Os resultados são apresentados na Figura 11 e na

Tabela 2.

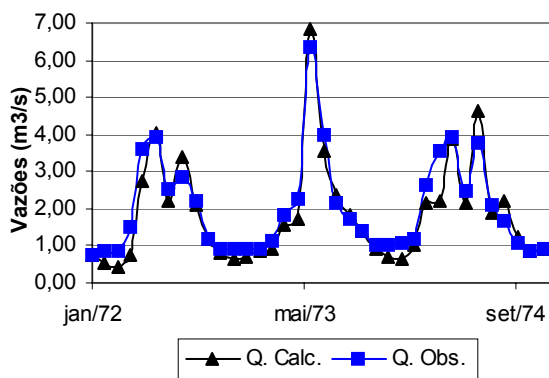


Figura 10 – Hidrograma do período de calibração, posto fluviométrico de Mamuaba.

Tabela 1 – Parâmetros de avaliação da qualidade da calibração para o posto fluviométrico Mamuaba

Parâmetros Estatísticos	Q <sub>Obs</sub> (m³/s)	Q <sub>Calc</sub> (m³/s)
Média	2,00	1,86
Desvio Padrão	1,29	1,38
Mínimo	0,74	0,44
Máximo	6,33	6,82
Coef. De correlação entre Vazões obs. E calc.	0,96	

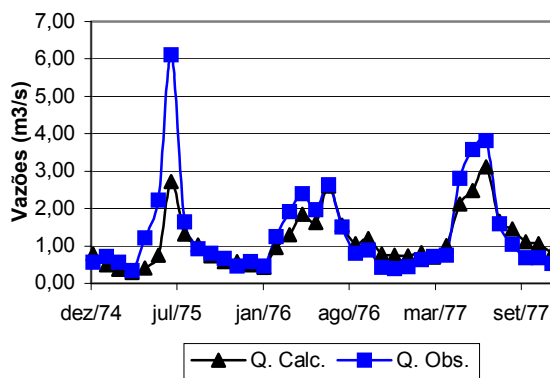


Figura 11 - Hidrograma do período de validação, posto fluviométrico de Mamuaba

Tabela 2 – Parâmetros de avaliação da qualidade da validação para o posto fluviométrico Mamuaba

Parâmetros Estatísticos	Q <sub>Obs</sub> (m³/s)	Q <sub>Calc</sub> (m³/s)
Média	1,35	1,16
Desvio Padrão	1,22	0,71
Mínimo	0,35	0,30
Máximo	6,11	3,11
Coef. De correlação entre Vazões obs. E calc.	0,86	

Como pode ser visto, tanto graficamente como numericamente, o processo de calibração apresentou melhores resultados que o de validação. No processo de validação observa-se uma grande discrepância entre os valores observados e calculados para julho de 1975. Neste mês, registrou-se na região cheias ditas catastróficas, principalmente, na região metropolitana de Recife (Cunha & Kaviski, 1995), área semelhante em termos de climatologia. Os dados de precipitação utilizados na validação nesse mês não representam esse comportamento regional, apesar de terem sido consistidos. Infere-se dessa constatação que talvez a chuva registrada foi inferior à real. Foi feita uma análise sobre as precipitações dos 3 meses antecedentes aos picos da calibração e da validação. O período anterior à maior cheia da fase de calibração apresenta cerca de 30% a mais de precipitação, do que o período anterior à maior cheia da fase de validação, o que sugere uma condição de umidade do solo maior que a da maior cheia da validação, proporcionando assim mais con-

dições para geração de vazões de cheia. A própria precipitação no mês de maior cheia da validação é também cerca de 30% maior da ocorrida na fase de calibração.

Uma vez calibrado e validado o modelo, utilizou-se o SSDE ARENA para analisar os resultados de forma espacial. Dentre os diversos resultados possíveis, apresenta-se na

Figura 12 a espacialização das lâminas máximas mensais do escoamento superficial. Por meio da

Figura 12 pode-se notar como a integração de um modelo hidrológico distribuído a um SIG pode ser útil ao processo de planejamento e gerenciamento de recursos hídricos, pois pode-se, por exemplo, delimitar áreas mais propícias a um determinado tipo de agricultura ou à construção de barramentos. Uma série de análises espaço-temporais pode ser realizada com o SSDE ARENA.

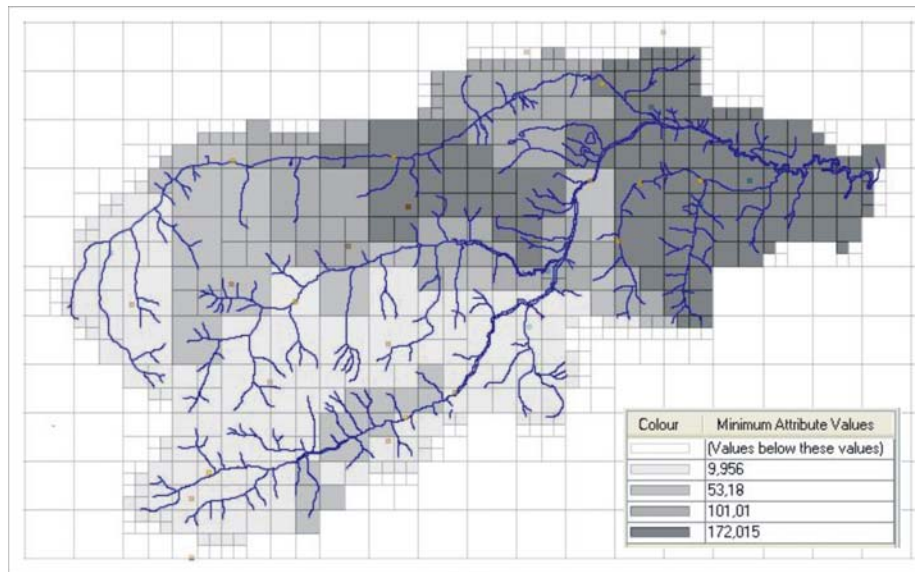


Figura 12 – Lâminas máximas mensais do escoamento superficial, valores em mm

## CONCLUSÕES

Neste artigo, a implementação do modelo hidrológico AÇUMOD baseado em conceitos da Programação Orientada a Objetos foi apresentada. Descreveram-se suas classes principais e sua integração a um OpenGIS, o JUMP, compondo um Sistema de Suporte à Decisão Espacial (SSDE) denominado ARENA. No decorrer do desenvolvimento deste trabalho, as seguintes observações e conclusões puderam ser verificadas:

- A Programação Orientada a Objetos (POO) permitiu uma melhor representação do sistema de recursos hídricos e do modelo AÇUMOD, facilitando o desenvolvimento do programa. Desta forma, futuras modificações e manutenções desse programa serão realizadas mais facilmente;
- As características intrínsecas da POO (herança, generalização, especialização, etc.) facilitaram o processo de desenvolvimento do SSDE e a integração do modelo ao OpenGIS;
- A utilização conjunta de técnicas como POO e UML permite um melhor entendimento do aplicativo desenvolvido, facilita a transferência de informações entre usuários, o armazenamento de dados, além de melhorar a compreensão dos pacotes, classes e, conseqüentemente, do programa como um todo;
- A utilização de um OpenGIS no apoio ao processo de modelagem é adequada e necessária, visto que o AÇUMOD requer uma grande quantidade de dados espaciais para a realização de simulações de bacias hidrográficas;

- A aplicação da ferramenta desenvolvida para um estudo de caso (bacia hidrográfica do Gramame) comprovou a funcionalidade do pacote e sua utilidade no gerenciamento de recursos hídricos.

Por fim, salientam-se as propriedades do SSDE como um todo. Devido ao ambiente de desenvolvimento (Eclipse), à linguagem de programação (Java) e ao OpenGIS (JUMP) utilizados, foi gerado um programa livre de custos financeiros relacionados à aquisição desses aplicativos.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CNPq, CAPES e DAAD pelo auxílio financeiro. Agradecem também ao professor Tarciso Cabral da Silva (UFPB) pelo continuado apoio no desenvolvimento deste trabalho. Os autores também ficam gratos aos revisores anônimos que forneceram subsídios para melhoramento do artigo.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, C. N. Modelagem integrada de recursos hídricos com apoio de um sistema de informações geográficas. 147 p. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. 2006.
- ALMEIDA, C. N. Implantação de um sistema de apoio ao planejamento e gerenciamento de recursos hídricos na bacia do rio do Peixe, com ênfase no modelo transformação chuva-vazão. 157 p. Dissertação (Mestrado) – Escola de Engenharia de São Carlos. 2001.
- ALMEIDA, C. N.; ROEHRIG, J.; WENDLAND, E. Desenvolvimento e Integração de um Simulador do Fluxo Subterrâneo a um Sistema de Informações Geográficas. *Revista Brasileira Águas Subterrâneas*. São Paulo, 2007. No prelo.
- AZEVEDO, L. G. T.; PORTO, R. L. L.; PORTO, M. Sistema de apoio à decisão para o gerenciamento integrado de quantidade e qualidade da água. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.3, n.1, p.21-52, 1998.
- ARCTUR, D.; ZEILER, M. Designing geodatabases – Case studies in GIS Data Modeling. Esri Press, 2004.
- ARNOLD, J.G.; ALLEN, P.M.; BERNHARDT, G. A comprehensive surface-groundwater flow model. *Journal of Hydrology*, v. 142, n. 1-4, p. 47-69. 1993.
- BEVEN, K. J.; KIRKBY, M.J. A physically based, variable contributing area model of basin hydrology. *Hydrological Sciences Bulletin*, n. 24, p. 24-69, 1979.
- CAVALCANTI, M. A. M. P. A modelagem matemática associada ao sistema de informações geográfica como instrumento de previsão no estudo do impacto hidrogeológico de reservatórios. 188 p. Tese (doutorado) – Instituto de Geociências, Universidade de São Paulo, 2002.
- CUNHA, Laertes Munhoz da, KAVISKI, Eloy. Análise de Frequência de Cheias Incorporando Marcas de Cheias Históricas - Aplicação à Série de União da Vitória. *Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos*, Recife. 1995.
- ECLIPSE, Disponível em: <<http://www.eclipse.org/>>. Acesso em: 11.nov.2004.
- IBGE, Censo Demográfico 2000, 2000.
- JOLMA, A.; AMES, D.P.; MITASOVA, H.; NETELLER, M.; RACICOT, A.; SUTTON, T. Free and Open Source Geospatial Tools for Environmental Modeling and Management. *Proceedings of the iEMSs Third Biennial Meeting: "Summit on Environmental Modelling and Software"*. Disponível em: <<http://www.iemss.org/iemss2006/sessions/all.html>>. Acesso em 08.ago.2006.
- JUMP Unified Mapping Platform – Technical Report. (2003). Documento acessado no endereço <http://www.vividsolutions.com/>, em março de 2005.
- KÖPPEN, W., 1948, Climatologia – Com un estudio de los climas de la Tierra. Trad P.R.H. Perez. Fondo de Cultura Económica. México.
- LAL, A.M.W., ZEE, R.V., BELNAP, M. Case Study: Model to Simulate Regional Flow in South Florida. *Journal of Hydraulic Engineering*, vol. 131, n. 4, p. 247-258, 2005.
- Open Geospatial Consortium Inc., 2004. Geospatial portal reference architecture: a community guide to implementing standards-based geospatial portals. OGC Draft Report No OGC 04-039., 17 p.

- PORTO, R. L.; AZEVEDO, L. G. Sistemas de suporte a decisões aplicados a problemas de recursos hídricos. In: Técnicas quantitativas para o gerenciamento de recursos hídricos. Coordenação e organização científica: PORTO, R. L. Porto Alegre: Ed. Da Universidade/UFGS/ABRH, (Coleção ABRH de recursos hídricos). p. 42-95, 1997.
- PORTO, R. L.; MÉLLO, A. V.; ROBERTO A. N.; PALOS, J. C. Acquanet: Arquitetura, Estratégias e Ferramentas. XVII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, João Pessoa, 2005.
- RODRIGUES, R. B. SSD RB – Sistema de Suporte à Decisão Proposto para a Gestão Qualitativa dos Processos de Outorga e Cobrança pelo Uso da Água, SP. São Paulo. 179 p. Tese (doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, 2005.
- SILANS, A. M. B.; ALMEIDA, C. N.; ALBURQUERQUE, D. J. S.; PAIVA, A. E. D. B. Aplicação do modelo hidrológico distribuído AÇUMOD à bacia hidrográfica do Rio do Peixe – Estado da Paraíba. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 5, n. 3, p 5-19, 2000.
- SOUZA FILHO, F. A. Aplicação de um Sistema de Suporte à Decisão à Alocação de Água: o SSD da COGERH-CE. XIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, Belo Horizonte, 1999.
- SUN MICROSYSTEMS, Java Code Conventions, 1997, Disponível em: <<http://java.sun.com/docs/codeconv/>>. Acesso em: 11.nov.2004.
- TSOU, M. S.; WHITTEMORE, D. O. User Interface for Ground-water Modeling: ArcView Extension. *Journal of Hydrologic Engineering*, v. 6, n. 3, p. 251-257, 2001.
- TUCCI, C. E. M. (1998). Modelos hidrológicos, Editora da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Rio Grande do Sul, 669 p.
- VIEGAS FILHO, J. S.; LANNA, A. E. L. O Paradigma da Modelagem Orientada a Objetos Aplicada a Sistemas de Recursos Hídricos – (I) Modelo Básico de Objetos para uma Rede Hidrográfica, *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 8, n. 3, pág. 79-89, 2003.
- WANG, J.; HASSET, J. M.; ENDRENY, T. A. An object oriented approach to the description and simulation of watershed scale hydrologic processes. *Computers & Geosciences*, v. 31, n. 4, p. 425-435, 2005a.
- WANG, J.; ENDRENY, T. A.; HASSET, J. M. A flexible modeling package for topographically based watershed hydrology. *Journal of Hydrology*, v. 314, n. 1-4, p. 78-91, 2005b.

***Object Oriented Programming for the Development and Integration of a Distributed Hydrological Rainfall-Runoff Model to an Open Geographic Information System***

**ABSTRACT**

*In this paper the development of the hydrological distributed rainfall-runoff model AÇUMOD, based on Object Oriented Programming (OOP) is presented. Through this technique the watershed and its components (rivers, dams, etc.) are represented by classes, making the computational code easier to understand. The integration of this model to OpenGIS JUMP, which is a free and open source Geographic Information System, is also described. The hydrological model integrated to JUMP is part of the Spatial Decision Support System (SDSS) named ARENA. This SDSS is totally free and open, and can be run either in Windows® or Linux. The potentials of JUMP in the water resources area and the facilities presented by OOP for the systematization of complex systems appear as the main advantages of the proposed methodology. An application of the SDSS to the Gramame watershed (in Paraíba state) is presented, confirming the functionalities of the developed tool.*

**Keywords:** *Object-oriented programming; AÇUMOD; decision support system.*