

Implantação dos Módulos de Calibração Automática de Modelos Hidrológicos e de Modelagem de Poluição Difusa no Sistema de Informações para Gerenciamento da Alocação de Água-SIGA

Conceição de Maria A. Alves¹; Francisco Venicius Fernandes Barros² & Glaudiney Moreira Mendonça Junior³

RESUMO --- A aplicação de modelagem matemática nas atividades de gestão e operação de sistemas hídricos tem se expandido através da concepção e implementação de sistemas de informações em recursos hídricos. Este trabalho apresenta o desenvolvimento de dois módulos do SIGA-Sistema de Informações para o Gerenciamento da Alocação de Água em desenvolvimento na FUNCEME-Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos. O primeiro módulo refere-se à calibração automática de parâmetros do modelo hidrológico SMAP (Lopes, 1981) utilizando o algoritmo evolucionário MOPSO. O segundo módulo faz a simulação da carga de poluentes originária da poluição difusa. Para tanto, utiliza a formulação conceitual do modelo GWLF (Haith, 1996) para simulação da produção de sedimento e das cargas de nitrogênio e fósforo (dissolvido e particulado). Os novos módulos foram completamente integrados aos demais componentes do SIGA já em operação, tais como, Módulos de Hidrologia, de Apresentação de Resultados e de Desenho de Sistemas Hídricos apresentados em Alves et al. (2006).

ABSTRACT --- Mathematical modeling has been increasingly used in water resources operations and management through the conceptualization and implementation of water resources information systems. This work presents the development and implementation of two modules in SIGA (Information System for Management of Water Allocation). The first module refers to automatic calibration of hydrologic models employing the multi objective evolutionary algorithm MOPSO. The second module provides estimates of non-point source pollution loads by employing the GWLF (Haith, 1996) conceptual model, which is capable of simulating sediment yield and Nitrogen and Phosphorous loads (dissolved and particulate). Both new modules were completely integrated to the already implemented components of SIGA, such as, Hydrologic Simulation, Result Analyses and Visualization, and Network Design modules, as shown in Alves et al. (2006).

Palavras-chave: sistema de informações, calibração, poluição difusa

1) Pesquisadora Colaboradora da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Av Rui Barbosa, 1246 Fortaleza-CE CEP: 60115-221 conceicao@funceme.br

2) Bolsista da Fundação Cearense de Meteorologia e Recursos Hídricos, Av Rui Barbosa, 1246 Fortaleza-CE CEP: 60115-221 veniciusfb@yahoo.com.br

3) Universidade Federal do Ceará-Departamento de Ciências da Computação (CRAb-Computação Gráfica) glaudiney@gmail.com

1. INTRODUÇÃO

Os recursos oferecidos pela tecnologia da informação estão à frente do que o que tem se observado em termos de aplicação de sistemas de informação no dia-a-dia dos usuários. É comum a oferta de sistemas sofisticados, versáteis e complexos nos quais apenas uma parcela pequena de suas funcionalidades é realmente utilizada pelos usuários. Em algum momento ao longo do desenvolvimento desses sistemas, não houve comunicação ou entendimento entre projetista/analista e usuários do sistema. O resultado dessa falha de comunicação e interação reflete-se de imediato na baixa aceitação e aplicabilidade do sistema, muitas vezes percebida apenas após a finalização do projeto e até mesmo da implementação do sistema.

Diversas tarefas de operação desenvolvidas em agências de gestão de águas e outras instituições responsáveis pelo acompanhamento da quantidade e qualidade da água poderiam ser efetuadas com o auxílio e suporte de sistemas de informações mais compactos e de simples aplicação. A disseminação desses sistemas depende eminentemente da facilidade de assimilação de suas funções e vantagens por parte dos usuários, quando os mesmos são colocados frente ao desafio de aprender e se familiarizar com uma nova tecnologia ou ferramenta de trabalho. Por outro lado, para disponibilizar ferramentas computacionais que tenham funcionalidade compatível com as demandas existentes é imprescindível o conhecimento das reais necessidades dos usuários e da disponibilidade de informações existentes para resolução dos problemas.

Essas informações podem ser obtidas através da construção do sistema seguindo a metodologia bottom-up que prioriza o conhecimento e a experiência dos usuários durante a definição dos elementos que irão compor o sistema e suas funcionalidades. É necessária a construção da visão compartilhada do sistema (*shared-vision system*) para que o mesmo atenda as necessidades para o qual está sendo criado respeitando limites de custos (Loucks, 1995).

A construção de um sistema que incorpore uma visão compartilhada dos usuários no que se referem às prioridades e metas dos sistemas hídricos prevê a colocação das demandas dos diversos usuários em mesa de discussão. É a possibilidade de construir soluções a partir do conhecimento mais amplo do perfil dos usuários e de suas necessidades. Um sistema ou um programa ou um plano que seja desenvolvido e implementado com uma visão compartilhada tem mais chance de ser aceito pelo público alvo e mais amplamente aplicado. Esse imperativo tem sido enfatizado como um elemento imprescindível à ciência da tecnologia da informação sob pena de comprometer seus principais objetivos, a democratização da informação e o aperfeiçoamento de decisões de gestão e planejamento.

Para reforçar esse argumento, é suficiente reconhecer que o modelo de gestão de recursos hídricos implementado no país enfatiza a participação contínua dos usuários de água no processo de

planejamento e gestão das águas. A inclusão desses atores no processo decisório significa incorporar seus diferentes objetivos, interesses e realidades. A negociação e compartilhamento de informações vão ditar quão corretas e viáveis serão as decisões tomadas pelo fórum. Sistemas de informações que incorporem essa visão compartilhada têm a possibilidade de agregar valor a essas decisões, democratizá-las e torná-las mais aceitáveis.

Ao longo desse trabalho, estaremos falando sobre sistemas de informações aplicados a sistemas de recursos hídricos através da apresentação da implantação dos módulos de calibração automática de modelos hidrológicos e de modelagem da poluição difusa no Sistema de Informações para o Gerenciamento da Alocação de Água-SIGA.

2. CONCEPÇÃO GERAL E DESENVOLVIMENTO DO SIGA

Em meados de 2005, a FUNCEME iniciou o projeto de desenvolvimento de um sistema de informações em recursos hídricos para representar os processos hidrológicos atuantes numa bacia hidrográfica e oferecer ferramentas computacionais para auxiliar a operação e a gestão de sistemas hídricos. Concebido inicialmente como um Sistema de Informação para o Gerenciamento da Alocação de Água - SIGA, essa ferramenta é composta por oito módulos ou componentes computacionais integrados através do compartilhamento de dados e de informações geradas internamente. O SIGA estará composto pelos módulos listados na Figura 1.

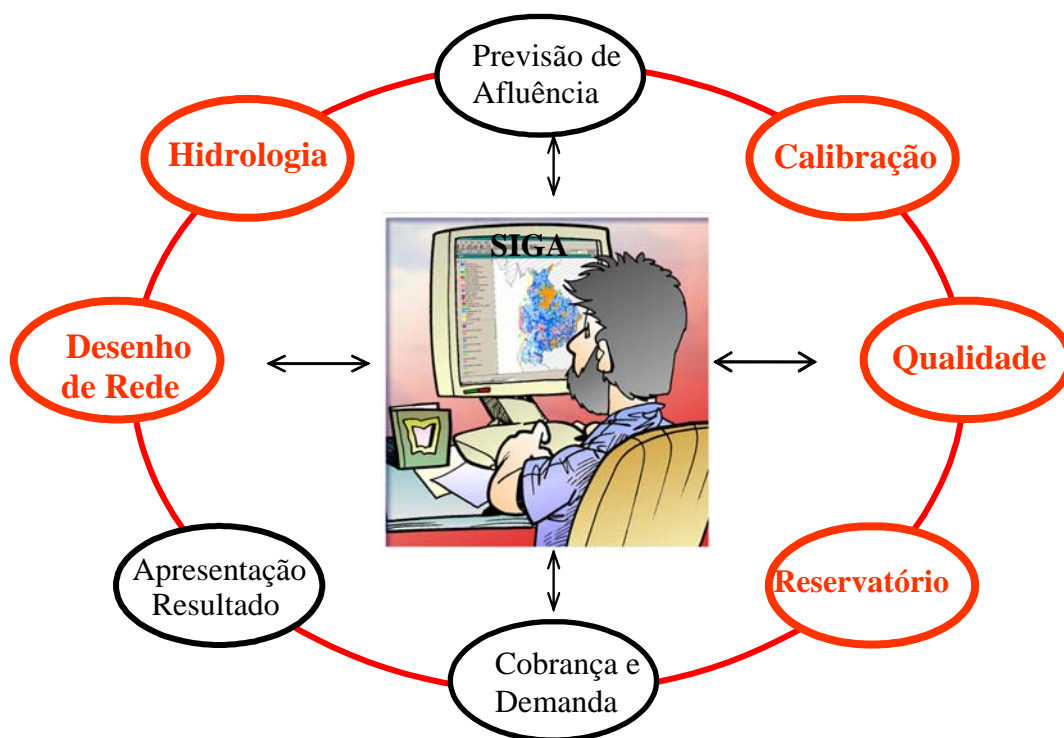


Figura 1 – Componentes do SIGA e suas interações, sendo em vermelho os módulos já implementados e em preto os módulos em desenvolvimento.

2.1. Breve descrição dos módulos: implementados e a serem desenvolvidos

Os módulos já implementados no SIGA são Módulo de Desenho de Rede de Fluxo, Módulo de Simulação Hidrologia, Módulo de Apresentação e Análise de Resultados. Maiores detalhes sobre esses módulos e suas interfaces estão apresentados em Alves et al (2006). Os módulos de Calibração Automática de Modelos Hidrológicos e de Simulação de Fontes não Pontuais de Poluição estão finalizados e em fase de teste e são objeto de apresentação no presente trabalho nas seções 3 e 4 a seguir.

O Módulo para Desenho de Rede de Fluxo é responsável pela representação do sistema hídrico objeto da análise a ser desenvolvida pelo SIGA. Essa representação é feita utilizando-se dois tipos básicos de elementos de rede: nós e trechos. Os Nós são definidos como elementos com ou sem capacidade de acumulação de água. Os Nós representam início de um trecho de rede, junção de dois trechos, pontos de captação (demanda) ou lançamentos (águas de retorno), áreas de drenagem ou sub-bacias, reservatórios, lagos naturais, aquíferos, etc. Os trechos representam linhas de fluxo do sistema hídrico, definidos no sentido do escoamento de montante a jusante, e sempre possuem capacidade de acumulação de água.

O módulo para Simulação Hidrológica é responsável pela representação através de modelos matemáticos dos processos físicos que compõem o ciclo da água no âmbito de uma bacia hidrográfica, tais como, precipitação, evapotranspiração, infiltração, percolação, escoamento superficial, vazão. O SIGA disponibiliza dois modelos hidrológicos conceituais, concentrados e diários, o modelo GWLF (Haith et al., 1996) e o modelo SMAP diário (Lopes et al, 1981), cuja descrição com mais detalhes está apresentada nas seções 5.1 e 3.1, respectivamente.

Os resultados gerados pelos diversos módulos de simulação podem ser visualizados e analisados através do Módulo de Apresentação e Análise de Resultados. Esse módulo apresenta séries temporais resultantes de simulações através de gráficos ou planilhas. O usuário pode escolher quais resultados ele deseja visualizar para cada um dos módulos do SIGA e para cada um dos nós da rede de fluxo que representa o sistema hídrico. Estatísticas básicas, tais como média, desvio padrão, coeficiente de variação, valores máximo e mínimo, são disponibilizados para as séries selecionadas pelo usuário.

O desenvolvimento do SIGA continua com a implementação dos seguintes módulos: Operação de Reservatórios; Módulo de Simulação da Qualidade da Água em Rios e Reservatórios; Módulo para Estudo de Demandas e Cobrança sobre o Uso da água; e Módulo para Previsão de Afluências. O Módulo de Operação de Reservatórios estará fortemente integrado aos módulos de Simulação Hidrológica e de Desenho de Rede de Fluxo. Para definição da operação dos reservatórios serão utilizadas regras de operação fornecidas pelos usuários ou técnicas de otimização.

O Módulo de Simulação da Qualidade da Água em Rios e Reservatórios vai integrar modelos para simulação da qualidade da água considerando a existência de fontes pontuais e não pontuais de poluição. Esse módulo utiliza os resultados de simulação do módulo de hidrologia que define a vazão disponível no sistema hídrico ou recebe esses valores através da leitura de arquivos textos. Os principais elementos químicos a serem simulados são: oxigênio dissolvido, DBO, nitrogênio orgânico, amônia, nitrato, fosfato, algas e componentes tóxicos.

O Módulo para Estudo de Demandas e Cobrança sobre o Uso da Água será concebido no intuito de auxiliar discussões e argumentos entre usuários de água com interesses diversos no âmbito de bacias hidrográficas. Esse módulo vai dispor de técnicas para projeção de demandas futuras, modelos ou metodologias para definição de valores de tarifas de uso da água para diferentes categorias de usuários e técnicas de negociação (arbitragem). O Módulo para Previsão de Afluências utiliza-se de técnicas estocásticas para a definição de afluências futuras no âmbito de uma bacia hidrográfica ou área de drenagem.

3. MÓDULO DE CALIBRAÇÃO DE MODELO HIDROLÓGICO

O módulo de calibração do SIGA está implementado para aplicação junto aos modelos hidrológicos incluídos no sistema. Aqui será apresentada a implementação da calibração automática para o modelo hidrológico SMAP (Lopes, 1981) em sua versão diária.

Para a calibração automática foi utilizado um algoritmo evolucionário multi-objetivo, o MOPSO (Multiobjective Particle Swarm Optimization) que evoluiu do algoritmo uni-objetivo PSO (Particle Swarm Optimization) proposto inicialmente por Kennedy e Eberhart (1995), os quais buscaram inspiração no comportamento social de grupos, tais como pássaros, peixes e insetos. A versão multi-objetivo MOPSO foi introduzida por Alvarez et al. (2005).

O algoritmo MOPSO está apto a encontrar soluções não-dominadas para diversas combinações de funções objetivo, dentre as equações implementadas, podemos citar: a equação de Nash & Suttcliffe, a equação de Nash & Suttcliffe modificada para a curva de permanência, a equação do erro quadrático médio. Nas seções seguintes, apresenta-se uma breve descrição desses algoritmos, do modelo SMAP e da metodologia de análise de problemas multi-objetivo utilizando o conceito de dominância de Pareto.

3.1. Modelo SMAP

O modelo hidrológico chuva-vazão SMAP (Soil Moisture Accounting Procedure) para o intervalo de simulação diária foi desenvolvido por Lopes et al. (1981) e tem sua estrutura relativamente simples. O modelo consiste de seis parâmetros, os quais possuem uma interpretação física, possibilitando assim uma possível determinação a partir de informações físicas/ambientais. São eles:

1. Capacidade de saturação do solo (SAT), em mm;
2. Parâmetro de recarga subterrânea (CREC), em %;
3. Abstração inicial (AI), em mm;
4. Capacidade de campo (CAPC), em %;
5. Constante de recessão do escoamento superficial (K2t), em dias;
6. Constante de recessão do escoamento básico (Kkt), em dias.

Esse modelo classifica-se como conceitual, determinístico, e concentrado com escala temporal diária. O presente modelo tem sua concepção baseada no balanço de umidade do solo, onde três reservatórios lineares fictícios representam a superfície, o solo e o aquífero. Utilizando-se de três reservatórios para representar o armazenamento e o fluxo de água numa bacia, o modelo computa um balanço hídrico diário. Os três reservatórios representam o armazenamento de água superficial, sub-superficial e subterrâneo. O modelo SMAP utiliza a metodologia do “Soil Conservation Service” (SCS) para cálculo do escoamento superficial. Outros processos representados pelo modelo são evaporação, escoamento subterrâneo, escoamento superficial e vazão total.

3.2. Abordagem multi-objetivo utilizando o conceito de dominâncias de Pareto

Do ponto de vista multi-objetivo, faz-se necessária a introdução de um novo conceito em substituição a simples comparação uni-objetivo de diferentes soluções, como por exemplo, o conceito de dominância de Pareto. Esta abordagem multi-objetivo é descrita abaixo, e, logo em seguida, são apresentadas algumas técnicas que procuram tratar problemas decorrentes da utilização direta dos conceitos de Pareto na determinação de frente ótima para problemas multi-objetivos.

Consideremos um problema de minimização multi-objetivo expresso pela seguinte equação:

$$\min f(\underline{x}) = \begin{bmatrix} f_1(\underline{x}) \\ f_2(\underline{x}) \\ \vdots \\ f_M(\underline{x}) \end{bmatrix}$$

onde $f_i(\underline{x})$ é a i -ésima de M funções objetivo e \underline{x} é uma possível solução que satisfaz o problema.

Pode-se observar da expressão acima que duas soluções distintas (u e v) podem se relacionar da seguinte forma, segundo Alvarez et al. (2005):

- Se $f_i(u) \leq f_i(v) \mid \forall i = 1, \dots, M$ e $f_i(u) < f_i(v)$ para algum i , então u é dita estritamente dominante de v , o que é representado pela expressão $u \prec v$;
- Ou, se $f_i(u) \leq f_i(v) \mid \forall i$, u é denominada fracamente dominante de v , o que é representado pela expressão $u \preceq v$.

Caso não seja dominada por v , e v não seja dominada por u , então u e v são ditas soluções não-dominadas. Desta forma, fica claro que problemas multi-objetivo possuem mais do que uma solução como ótimo e esse conjunto é denominado de frente ótima de Pareto ou frente verdadeira de Pareto, a qual é composta por soluções não-dominadas por qualquer possível solução.

3.3. Algoritmo MOPSO

Algoritmos evolucionários compreendem aqueles métodos de busca que têm sua inspiração em processos naturais, tais como: comportamento social de grupos de animais, reprodução de animais, entre outros. Esses algoritmos baseiam-se na seleção natural como processo de escolha de soluções com o objetivo de encontrar a solução ótima, apoiados na teoria que na natureza os mais aptos prevalecem sobre os menos aptos.

Os algoritmos evolucionários possuem características que os tornam mais eficazes do que outros algoritmos na busca de ótimos, dentre as quais destacam-se:

- A capacidade de trabalhar com uma população de soluções simultaneamente, introduzindo assim uma perspectiva global e uma maior diversidade de busca. Tal característica proporciona uma grande capacidade de encontrar ótimos globais em problemas que possuem diversos ótimos locais;
- Com relação às funções objetivo em análise, os algoritmos evolucionários não requerem que estas sejam côncavas, convexas ou contínuas, como alguns outros algoritmos que se baseiam no cálculo diferencial ou outro procedimento específico;
- Quanto ao domínio da busca, não se faz necessário um conhecimento prévio, podendo este ser multidimensional, com ou sem restrições, lineares ou não-lineares

As modificações introduzidas por Alvarez et al. (2005) no algoritmo PSO possibilitaram a aplicação desse algoritmo para problemas multi-objetivo. A seguir, apresentamos o processo natural de inspiração para os algoritmos PSO e MOPSO e o algoritmo MOPSO em maiores detalhes.

Uma população de indivíduos, por exemplo, pássaros, que se encontram dispersos no espaço, agrupam-se com o objetivo de iniciar uma busca por seu ninho ou alimento.

Esta busca é dada em função da experiência de cada indivíduo e da experiência do grupo. Inicialmente, todos levantam vôo e aglomeram-se até que um deles (a partícula) encontre uma posição que seja melhor que as posições dos demais indivíduos da população. Este indivíduo serve de guia para o grupo durante o vôo. Outro indivíduo pode vir a obter uma posição melhor que a posição do guia atual vindo a se tornar o novo guia.

Esse processo conduz os indivíduos até o objetivo final, ou seja, o ninho ou alimento.

Inicialmente, como no PSO é gerada uma população inicial de soluções (bando) aleatoriamente, e então, avaliada segundo as diversas funções objetivo em questão.

A partir dos conceitos de dominância de Pareto, já descritos anteriormente, determinam-se quais soluções são não-dominadas na população inicial. Estas soluções são armazenadas em um repositório de soluções não-dominadas (frente de Pareto).

Dentro dessa nova abordagem, cada solução (partícula) possui um melhor global, determinado pela seguinte regra:

- Se a solução (partícula) é dominada por soluções da frente, o melhor global para essa solução (partícula) é determinado aleatoriamente entre as soluções da frente que a dominam;
- Se a solução (partícula) entra na frente, o melhor global para ela é uma solução da frente determinada aleatoriamente.

O melhor individual de cada solução (partícula) é determinado, seguindo as seguintes regras:

- Se a nova posição da solução (partícula) domina a melhor posição individual, a melhor posição individual é alterada para a nova posição;
- Se a nova posição da solução (partícula) não domina e nem é dominada pela melhor posição individual, então a melhor posição individual é alterada para a nova posição;
- Se a nova posição é dominada pela melhor posição individual, esta permanece a mesma.

O processo de evolução das soluções (partículas) na busca se dá da mesma forma que no PSO. No primeiro passo no processo de busca, o melhor individual de cada solução é sua posição inicial e o melhor global segue a regra anteriormente descrita. Similarmente à abordagem uni-objetivo, o processo é repetido até que o critério de parada, previamente determinado, seja satisfeito.

3.4. Interface da Calibração Automática

A interface do módulo foi desenvolvida de forma a facilitar ao máximo a utilização pelo usuário, apresentando-se bastante intuitiva. A Figura 2 mostra a interface do Módulo de Calibração Automática do SIGA aplicada ao Modelo Hidrológico SMAP. Assim como em todas as interfaces do sistema, a interação com o usuário é feita através de objetos disponíveis na lateral direita da tela e através do desenho do sistema hídrico exposto no centro da interface. Através de botões, campos de edição, tabelas e outros objetos o usuário interage com o sistema para dar entrada nos parâmetros e fazer a leitura dos arquivos contendo dados de entrada para os exercícios de simulação a serem desenvolvidos.

O destaque em vermelho na Figura 2 indica os botões de comando para leitura dos parâmetros através de arquivos, para execução do módulo, para visualização dos resultados e finalmente, para executar análise de sensibilidade nos parâmetros do modelo SMAP através do botão em verde com desenho de *check-mark*. A Análise de sensibilidade é uma funcionalidade extra do módulo de calibração através do qual o usuário poderá analisar a variabilidade de funções objetivo indicadas pelo usuário a partir da variabilidade dos parâmetros do modelo hidrológico em análise.

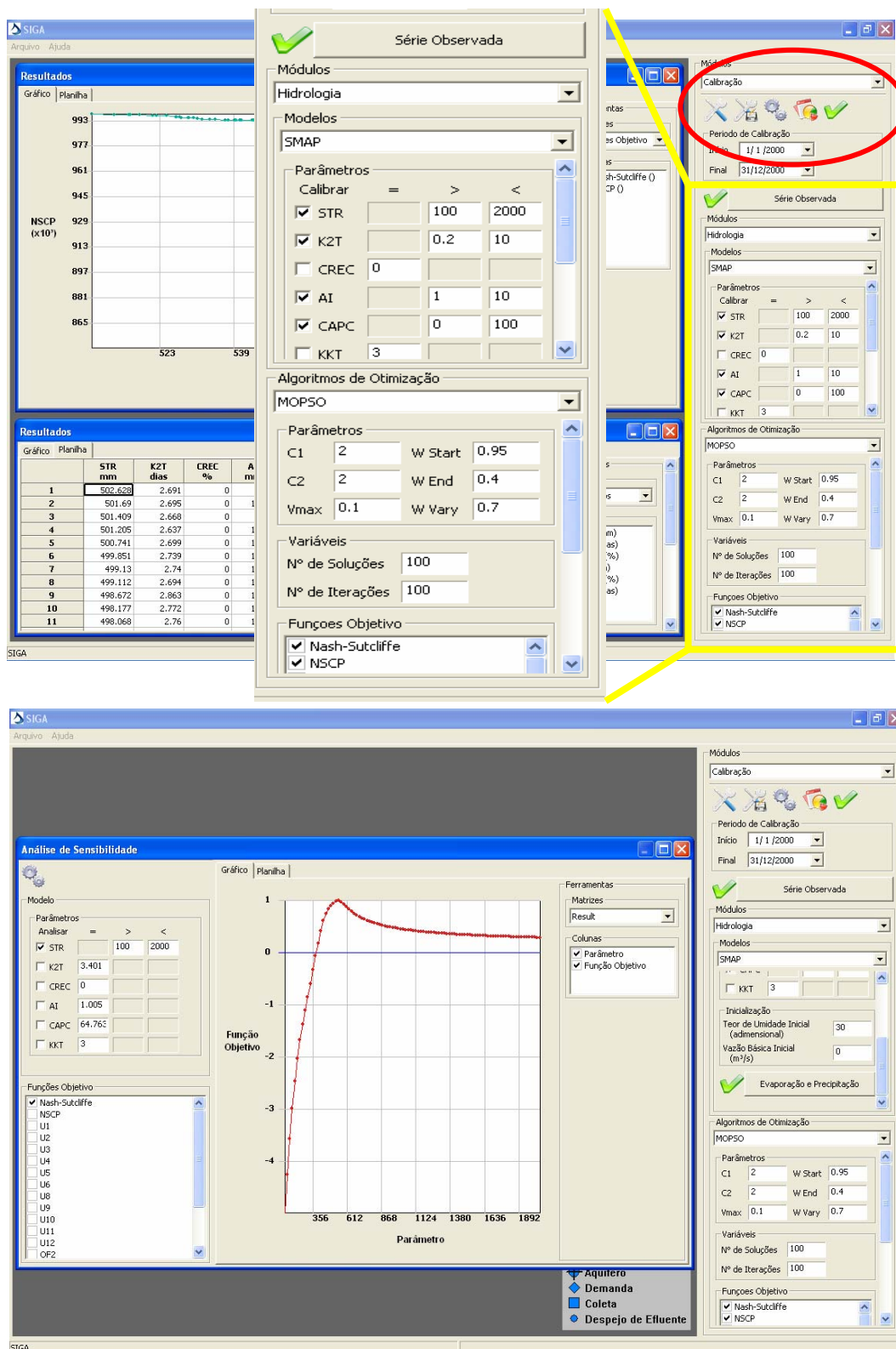


Figura 2: Interface do módulo de calibração automática aplicado ao modelo SMAP e aplicativo para análise de sensibilidade.

A interface deve ser operada da seguinte forma:

1. Inicialmente, o usuário deve escolher o período de simulação a ser utilizado para a calibração e dar entrada da série de dados observados através do Botão “Série Observada”;

2. Em seguida, o usuário seleciona o modelo hidrológico a ser analisado e para o caso do SMAP são apresentados seus parâmetros calibráveis e valores de inicialização, bem como as séries requeridas pelo modelo (Evaporação e Precipitação);

3. Mais abaixo na coluna de entrada de dados interativa do SIGA, são mostrados os algoritmos disponíveis, com seus parâmetros, variáveis e as funções objetivos a serem utilizadas pelo algoritmo de multi-objetivo de otimização.

Após a execução da calibração, uma janela de resultados é apresentada. Os resultados apresentam todas as soluções ótimas encontradas pelo algoritmo de otimização. A janela apresenta os valores dos parâmetros e das funções objetivo utilizadas. A Figura 3 a seguir apresenta o resultado de forma gráfica para duas funções-objetivos. A frente de Pareto é desenhada e os valores do conjunto de parâmetros para cada solução ótima não dominada pode ser visualizada através da listagem apresentada na folha *Planilha*.

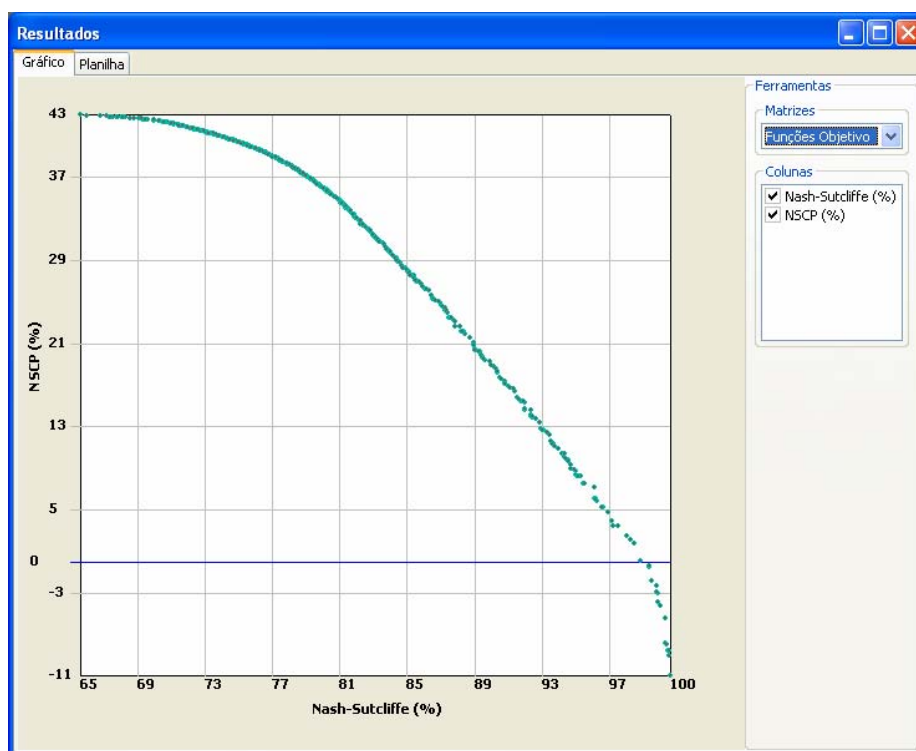


Figura 3: Apresentação de resultados do módulo de calibração com a Frente de Pareto.

4. MÓDULO DE SIMULAÇÃO DE POLUIÇÃO DIFUSA

O módulo de poluição difusa do SIGA é baseado no modelo *Generalized Watershed Loading Functions* (GWLF) (Haith et al., 1996) e inclui algumas modificações sugeridas em Schneiderman et al. (2002). As equações do GWLF são aplicadas para cada área fonte com características homogêneas com relação ao uso e tipo de solo. Resultados da simulação são computados na escala de sub-bacias, dessa forma, considera-se que a implantação do GWLF é semi-distribuída. A Figura

4 apresenta a concepção da contribuição da poluição difusa numa bacia hidrográfica conforme modelado no SIGA.

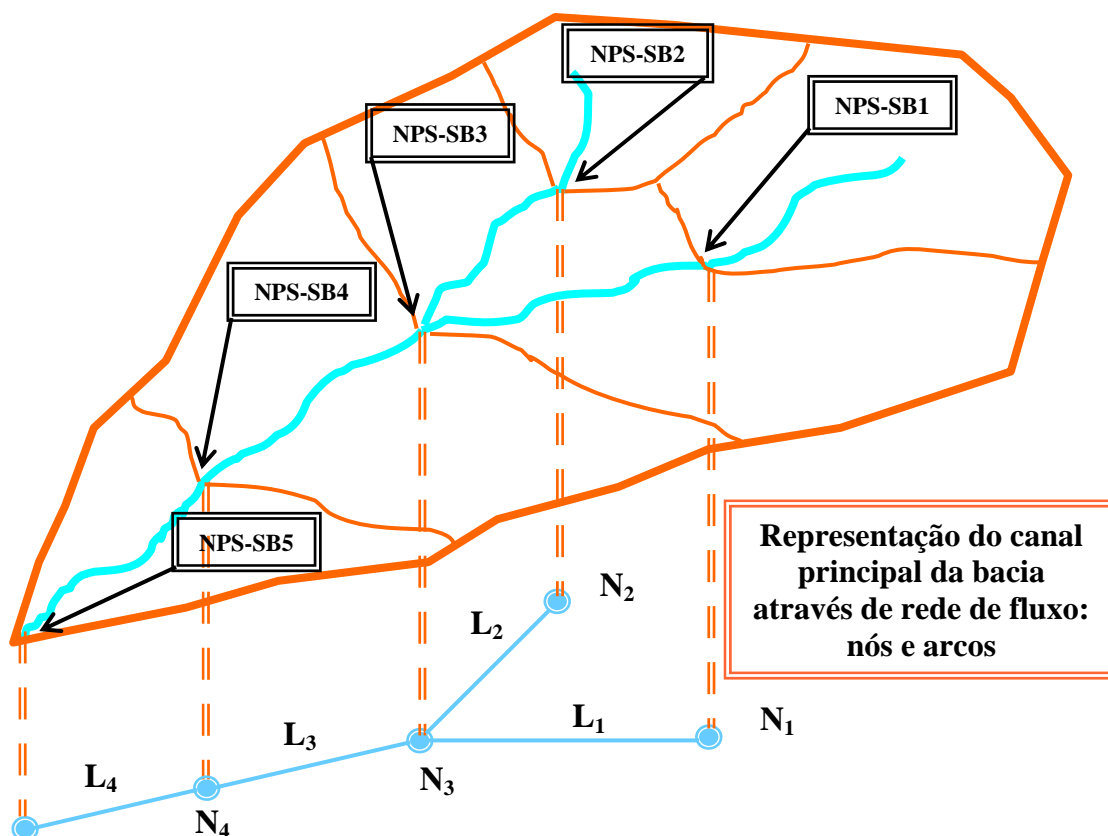


Figura 4: Representação esquemática da contribuição de poluição difusa no SIGA.

A componente de chuva-vazão é baseada na abordagem de número de curva, CN (Curve Number), definida pelo Serviço de Conservação do Solo dos EUA (US SCS). A simulação de valores de evapotranspiração potencial é corrigida por um fator de cobertura vegetal para obter valores de evapotranspiração real. Variações no conteúdo de água na zona não saturada e na zona saturada são comandadas por um cálculo diário de balanço hídrico no solo.

A produção de sedimentos é computada utilizando-se a Equação Universal de Perda de Solo e a capacidade de transporte de sedimentos como uma função da vazão na bacia e do taxa de depósito de sedimento (*sediment delivery rate-SDR*). O módulo de sedimento original no GWLF foi modificado conforme sugestão de Schneiderman et al (2002) resumidamente descritas abaixo:

- Transferência de umidade da zona não saturada para zona saturada;
- Mudança no cálculo do tempo de transporte de sedimento do solo para a rede de fluxo;
- Consideração da contribuição de sedimentos e nutrientes dissolvidos de áreas urbanas;
- Diferenciação da concentração de nutriente sólido para cada área fonte da sub-bacia.

Quatro elementos contribuem para o cálculo de cargas dissolvidas de nutrientes: cargas transportadas por escoamento superficial; cargas oriundas de fontes pontuais de poluição; contribuição de águas subterrâneas; e contribuição de sistemas sépticos existentes na bacia. Já as

cargas sólidas de nutrientes originam-se de três fontes: cargas resultantes de áreas rurais; cargas resultantes de áreas urbanas e cargas oriundas de fontes pontuais de poluição. Uma descrição detalhada das equações e formulações do modelo GWLF revisado está disponível em Alves (2005) e Schneiderman et al (2002). A Figura 5 apresenta um resumo da concepção do modelo GWLF.

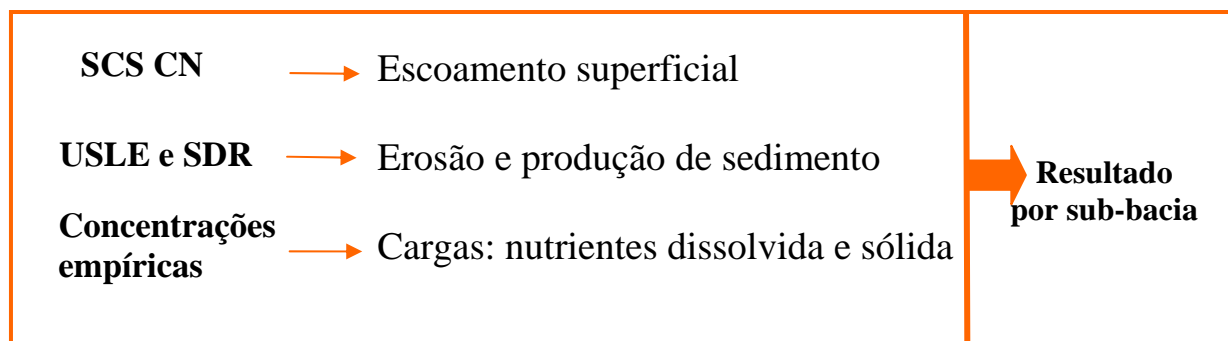


Figura 5: Concepção geral do modelo GWLF (Haith, 1996) para poluição difusa.

4.1. Interface do módulo de simulação de poluição difusa

A interface do módulo de simulação da contribuição de poluição difusa está inserida no componente de qualidade da água do SIGA que incluirá também funções para simulação de fontes pontuais em rios e de qualidade da água em reservatórios. A poluição difusa é descrita como contribuição da *Bacia* e deve ser selecionado no botão *ComboBox* de *Modelos de Qualidade* mostrado na Figura 6. Os botões padrões de simulação do SIGA, ressaltados no balão em vermelho, devem ser utilizados para operação do módulo de poluição difusa, nas etapas de leitura de parâmetros, gravação de arquivo de parâmetros, execução do modelo e visualização dos resultados.

O usuário deve selecionar o poluente a ser simulado, sedimento, fósforo ou nitrogênio, conforme destaque no balão em azul. A interface para introdução dos parâmetros deverá alterar-se com a escolha do poluente a ser simulado, pois os parâmetros utilizados para cada poluente são diferentes. Uma importante etapa para simulação de cargas poluentes é a descrição dos parâmetros diferenciados para cada área fonte de poluição. Para cada poluente, o usuário também deve definir os parâmetros associados às áreas fontes de acordo com o uso do solo e a pedologia definida no componente de Hidrologia do GWLF. Dessa forma, o módulo de poluição difusa somente pode ser executado após o cálculo das vazões em cada nó (ou sub-bacia) definido no Módulo de Simulação Hidrológica.

Os resultados da simulação podem ser visualizados para cada poluente simulado separadamente e de forma tabular e em gráficos e de acordo com o período especificado pelo usuário através do componente de calendário. Essa visualização é padrão para o sistema SIGA.

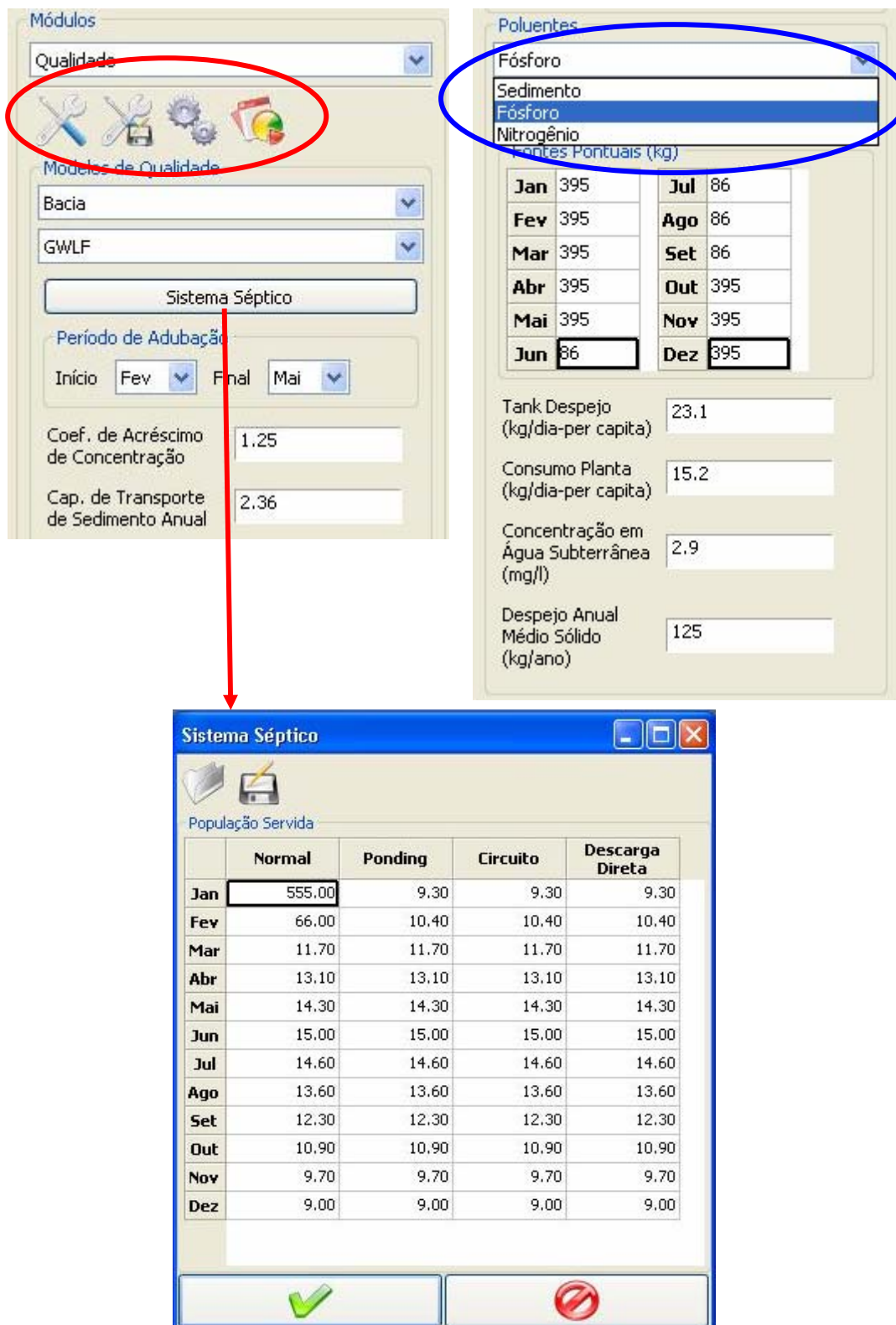


Figura 6: Interface do módulo de poluição difusa mostrando em destaque a definição de parâmetros e a seleção de poluente a ser simulado, bem como a introdução das contribuições de diferentes sistemas sépticos como fontes de poluição.

5. OPERACIONALIZAÇÃO DO SIGA NO AMBIENTE DE COMPANHIAS DE GESTÃO DE RECURSOS HÍDRICOS

Dentro da concepção geral do projeto SIGA, estão se desenvolvendo esforços para a introdução do sistema no ambiente de atividades e decisões da Companhia de Gestão dos Recursos Hídricos do Ceará (COGERH). Apesar de se encontrar numa etapa bastante incipiente, esses esforços buscam fazer adaptações necessárias ao SIGA para que o mesmo seja a ferramenta de análise e simulações para auxiliar nas atividades operacionais da COGERH incluindo o processo de tomada de decisões para alocação negociada da água e no licenciamento de pequenas obras hídricas.

5.1. As atividades de gestão da COGERH

A COGERH foi criada pela Lei nº 12.217 de 18 de novembro de 1993 com o objetivo de gerenciar a oferta dos recursos hídricos constantes dos corpos d'água superficiais e subterrâneos de domínio do Estado, visando a equacionar as questões referentes ao seu aproveitamento e controle. Atualmente, a COGERH é responsável pelo gerenciamento da maior parte das águas acumuladas em reservatórios públicos, estaduais e federais, no Estado do Ceará bem como de outros elementos que compõem os sistemas hídricos estaduais, tais como adutoras, canais, elevatórias. Uma das funções da COGERH constitui-se na definição da alocação da água disponível nos sistemas hídricos do estado. A distribuição racional e mais eficiente de água entre múltiplos usuários, com interesses muitas vezes conflitantes, não é uma tarefa simples. Ela envolve a compatibilização entre oferta e demanda de água num espaço geográfico ao longo de um determinado espaço temporal.

A alocação de água entre usuários influencia diretamente a emissão de outorgas e de licenças para construção de obras hídricas. As outorgas de uso da água são emitidas pela Secretaria de Recursos Hídricos, segundo orientação da COGERH e as licenças de obras hídricas são emitidas pela própria COGERH no Âmbito da Gerência de Estudos e Projetos. Sabe-se que o uso de sistemas de informações em recursos hídricos baseados em modelagem matemática permitiria uma maior racionalidade e eficiência no desenvolvimento dessas tarefas e possibilitaria mais agilidade na sua operacionalização.

5.2. Metodologia de Cooperação com a COGERH para aplicação do SIGA

Para adaptação do SIGA às funcionalidades e necessidades da COGERH, pretende-se desenvolver o perfil usuário COGERH através das seguintes etapas de cooperação:

- realização de reuniões de trabalho para definição das demandas da COGERH para os módulos em teste, definindo de que forma o sistema possa auxiliar o desenvolvimento de tarefas de gestão desenvolvidas nessas instituições e que tenham relação com o módulo de operação de reservatório em desenvolvimento e de simulação da qualidade da água;

- realização de reuniões de trabalho para definição do desenho da interface dos módulos que seja baseado no perfil de usuário característico da COGERH, de maneira a facilitar a introdução do sistema nas atividades operacionais dessas instituições;
- desenvolvimento do módulo por parte da equipe da FUNCEME em comunicação direta com os profissionais da COGERH;
- apresentação e disponibilização de protótipos dos módulos que possam ser submetidos a testes e aplicações em sistemas hídricos “pilotos” definido pela COGERH;
- disponibilização de versão final do SIGA através de CDs e juntamente com Manual de Usuário;
- integração entre os profissionais envolvidos no desenvolvimento dos módulos e os profissionais usuários a fim de garantir a introdução e incorporação das funcionalidades do sistema SIGA nas atividades operacionais da COGERH.

6. CONCLUSÃO

Esse trabalho apresentou a fundamentação teórica, a concepção e o desenvolvimento dos módulos de Calibração Automática para Modelos Hidrológicos e de Modelagem da Poluição Difusa do Sistema de Informação para o Gerenciamento da Alocação da Água – SIGA, em fase de implementação no âmbito do Departamento de Recursos Hídricos - DEHID da FUNCEME. O objetivo principal do sistema é disponibilizar ferramentas computacionais para auxiliar a operação e a gestão de sistemas hídricos. O SIGA compõe-se de oito módulos integrados. Encontram-se implementados e em fase de testes o Módulo de Desenho de Rede de Fluxo, o Módulo de Simulação Hidrológica e o Módulo de Apresentação e Análise de Resultados. Os demais módulos estão em desenvolvimento.

Ao longo do desenvolvimento do sistema foram desenvolvidas interfaces que facilitassem a comunicação do usuário com o sistema e que incorporassem características particulares para cada tipo de perfil de usuário. A filosofia de programação orientada a objeto (POO) foi escolhida para o desenvolvimento do software no intuito de facilitar o trabalho de programação em módulos e a atualização de versões com reaproveitamento. O sistema hídrico a ser simulado é representado através de uma rede de fluxo composta por nós e trechos (links). O SIGA disponibiliza modelos hidrológicos com diferentes graus de complexidades para atender a uma maior diversidade de usuários e aplicações. O sistema representa um esforço para a democratização do uso de sistemas de informação para o desenvolvimento de programas e planos em recursos hídricos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem as valiosas contribuições dos pesquisadores da FUNCEME Eduardo Sávio Martins e Dirceu Silveira Reis Junior durante as etapas de concepção e avaliação de diversos

módulos do SIGA e a colaboração dos professores Joaquim Bento Cavalcante Neto e Creto Augusto Vidal do Departamento de Computação da UFC.

BIBLIOGRAFIA

- ALVAREZ-BENITEZ, J.E.EVERSON, R.M., FIELDSEND, J.E. (2005). *A MOPSO Algorithm Based Exclusively on Pareto Dominance Concepts*, in Anais de Evolutionary Multi-Criterion Optimization: Third International Conference, EMO 2005, Guanajuato, Mexico, March 9-11, 2005, Springer Berlin/Heidelberg.
- ALVES, C. M. A. (2005). *A Watershed Information System (WIS) for Water Quality Analyses*, Ph.D. Thesis, School of Civil and Environmental Engineering, Cornell University, Ithaca, New York.
- ALVES, C. M. A.; BARROS, F.V.F & MENDONÇA, G.M,Jr (2006). *Desenvolvimento do protótipo do sistema de Informação para Gerenciamento da Alocação de Água-SIGA*, Anais do VIII Simpósio de Recursos Hídricos do Nordeste, Gravatá-PE.
- HAITH, D.A.; MANDEL, R.; WU, R. S. (1996). *Generalized Watershed Loading Functions. Version 2.0. User's Manual*. Cornell University, Ithaca.
- KENNEDY, J. E EBERHART, R.C. (1995). *Swarm Intelligence*. In. Proceedings of the IEEE International Conference on Neural Networks, pag. 1942-1948.
- LOPES, J.E.G., BRAGA, B.P.F. E CONEJO, J.G.L. (1981). *Simulação Hidrológica: Aplicações de um Modelo Simplificado*, In: Anais do III Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, v.2, 42-62, Fortaleza.
- LOUCKS, D. P. (1995) *Developing and implementing decision support systems: a critique and a challenge*. Water Resources Bulletin, Vol.31, No.4, pp.571-582.
- SCHNEIDERMAN, E. M.; PIERSON, D. C.; LOUNSBURY, D. G.; ZION, M. S. (2002). *Modeling the hydrochemistry of the cannonsville watershed with Generalized Watershed Loading Functions (GWLF)* Journal of the American Water Resources Association, Vol. 38, No. 5, October, pp 1323-1347.