

Modelagem Hidrológica Integrada em Sistemas de Informação Geográfica

Ivairton Monteiro Santos, *UFF Niterói RJ*

Peter Zeilhofer, *UFMT Cuiabá MT*

Conteúdo [[esconder](#)]

1. Introdução
2. Conceitos
 - 2.1 SIBAC
 - 2.2 NGFlow
 - 2.3 Integração plena de NGFlow no SIBAC
3. Implementação da Integração
4. Aplicação e Validação do Modelo
5. Discussão
6. Conclusão
7. Referências bibliográficas

▶ [Resumo](#)

1. Introdução

Modelos hidrológicos podem ser definidos como representações matemáticas do fluxo de água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou sub-superfície terrestre, permitem a simulação de processos físicos nas suas dimensões temporais (PULLAR & SPRINGER, 2000). Possuem importância na previsão de enchentes ou para estimativas da disponibilidade hídrica em situações de escassez.

Freqüentemente modelos de previsão não examinam os fenômenos hidrológicos no seu contexto geográfico, utilizando uma representação de elementos espaciais simplificada, assumindo a bacia hidrográfica como uniforme. Estas limitações dos modelos chamados não-distribuídos, podem ser superadas pelo uso de modelos semi-distribuídos ou distribuídos que permitem a detecção de efeitos e anomalias locais (TUCCI, 1998). Entretanto modelos distribuídos se apresentam complexos na sua operação e demandam grandes volumes de dados de entrada especializados para descrição da variabilidade da paisagem. Para manipular esse volume de dados e considerar a heterogeneidade fisiográfica das bacias e espacialização das simulações, Sistemas de Informação Geográfica (SIG) se tornam ferramentas valiosas. SIG é uma tecnologia que permite manipular dados geográficos digitalmente. Dentre suas habilidades, permite o pré-processamento de dados, análises espaciais, modelagem e pós-processamento e visualização de resultados (GOODCHILD, 1993; BURROUGH & McDONNELL, 1998), fornecendo uma visão integrada dos sistemas hídricos (McKINNEY & CAI, 2002).

O acoplamento de SIGs com modelos hidrológicos facilita a manipulação de informações espaciais e permite a interpretação dos resultados de simulações no contexto geográfico.

Conforme os níveis de acoplamento, são diferenciadas as estratégias de integração, variando entre acoplamentos livres, próximos/rígidos ou plenas (NYERGES, 1991).

SUI & MAGGIO (1999) como também CÂMARA *et al.* (1996) salientam que os modelos que representam espaço, tempo, escala e objetos em SIG não são compatíveis com a maioria dos modelos hidrológicos. Estes autores enfatizam limitações dos bancos de dados espaciais e não-espaciais utilizados em SIGs na representação da característica dinâmica de fenômenos hidrológicos. Recomenda-se, portanto, para modelações em alta resolução temporal, um acoplamento livre (*loose coupling* conforme termo de GOODCHILD *et al.* (1992) e MATSON *et al.* (1995)) entre o modelo hidrológico e o SIG, sendo utilizado somente para pré, pós-processamento e visualização (CLARK, 1998; ROUSSEAU *et al.*, 1997). Exemplos de um acoplamento livre foram apresentados por OLIVEIRA & MAIDMENT (1999) que desenvolveram um pré-processador para o *Hydrologic Model System* - HMS (YU & SCHWARTZ, 1998) e USEPA (1998) que integraram o modelo de qualidade de água QUAL2E no sistema BASINS.

Em integrações plenas, a proximidade lógica e física entre os sub-sistemas é máxima e as tarefas funcionais do modelo são incorporadas no SIG, ou seja, todas as tarefas da modelação podem ser realizadas a partir do SIG (RAFAELI NETO, 2000). DE RÔO (1998) apresentou uma integração plena para modelação de vazão e transporte de sedimentos em bacias hidrográficas utilizando o ambiente de desenvolvimento SIG *PC Raster*. PULLAR & SPRINGER (2000) enfatizam em sua avaliação do estado da arte na integração de modelos hidrológicos em SIGs as vantagens de uma integração plena, melhorando a capacidade no pré-processamento de dados e facilitando o manuseio dos sistemas.

Diversos autores salientam a aptidão do modelo de dados orientado a objetos (OO) para integrações rígida ou plena de modelos ambientais em SIG (CROSBIE, 1996; FEDRA, 1996; FEDRA & JAMIESON, 1996). Esse modelo de dados é baseado na idéia que os componentes do espaço geográfico interagem de diversos modos. Os chamados objetos espaciais representam entidades reais com atributos geográficos, físicos, ambientais ou sócio-econômicos (McKINNEY & CAI, 2002). Estes objetos espaciais possuem métodos, que são funções para descrever ou explorar relacionamentos entre si. Como exemplo, o cálculo do balanço hídrico em uma sub-bacia. Desta forma, modelos ou funções de um SIG podem ser entendidos como um conjunto de objetos com seus métodos. Assim, a integração de modelos em um SIG se torna uma questão pragmática de escolher métodos apropriados para realizar tarefas nos objetos a serem representados (FEDRA, 1996).

ARGENT & GRAYSON (2001) enfatizam a importância de considerar os recursos humanos e financeiros da comunidade de usuários projetados, sua estrutura organizatória e as demandas ao sistema em diferentes níveis funcionais no desenvolvimento de aplicações SIGs. Para garantir acesso fácil e uma democratização da base de dados, CIRILIO *et al.* (1997) implementaram o sistema de informação de recursos hídricos do estado de Pernambuco sem utilização de produtos SIG comerciais. Os autores salientam, entretanto, que este tipo de solução tende a reduzir a funcionalidade para análises espaciais ou modelações distribuídas. É comum, portanto, o desenvolvimento de aplicações integradas a partir da programação de um software SIGs, cujas linguagens de macros permitem abstrações de alto nível, ou seja, o usuário não necessita preocupar-se com detalhes do armazenamento interno ou detalhes de implementação (RAFAELI NETO, 2000). Integrações de modelos tais como o SWAT (ARNOLD *et al.*, 1998; DI LUZIO *et al.*, 2004) ou o desenvolvimento de ferramentas integradas para manejo de recursos hídricos tais como BASINS (US ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY, 2001) ou GIBSI (ROUSSEAU *et al.*, 1997), são baseadas em softwares SIG comerciais.

Neste trabalho é apresentada a integração plena de um modelo semi-distribuído de bacias hidrográficas (*catchment model*) NGFlow, previamente desenvolvido por YE *et al.* (1996) no Sistema Integrado de Monitoramento Ambiental da Bacia do Rio Cuiabá – SIBAC. SIBAC está sendo desenvolvido como uma ferramenta de análise e monitoramento de bacias

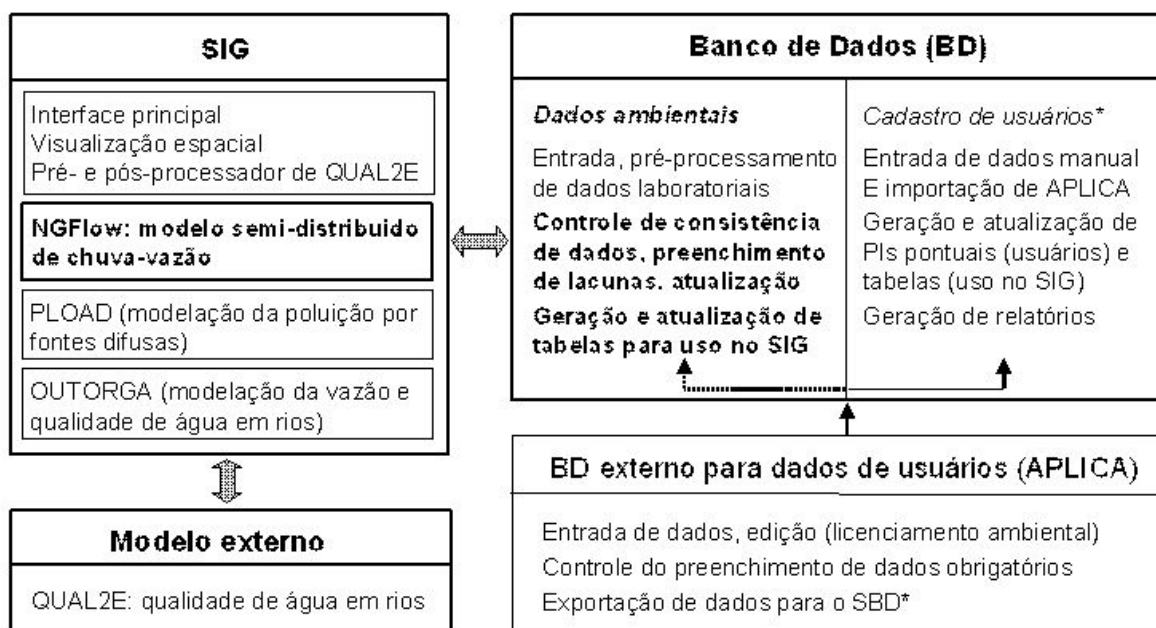
hidrográficas, reunindo um ambiente SIG e banco de dados personalizado acoplado com modelos hidrológicos e de qualidade de água (ZEILHOFER et al. 2002). Na implementação de SIBAC optou-se por uma solução baseada no software SIG ArcView (ESRI), aplicando conceitos de orientação a objetos. Teve como objetivo o desenvolvimento de um ambiente que permita a realização de todas as tarefas relacionadas ao manejo de recursos hídricos a partir de um único ambiente computacional. É demonstrado que um SIG acoplado com um gerenciador de banco de dados pode ser utilizado para o pré-processamento automatizado de informação temática e espacial. E também que a integração de um modelo de vazão no ambiente SIG pode promover um sistema interativo que permite ao usuário a alimentação rápida, a calibração do modelo e a visualização de simulações. Uma validação do modelo na bacia do rio Cuiabá avalia sua aplicabilidade para previsões de vazões médias mensais na região Centro-Oeste do Brasil.

2. Conceitos

2.1 SIBAC

SIBAC está sendo desenvolvido como uma ferramenta de monitoramento e análise de bacias hidrográficas, reunindo um ambiente SIG e banco de dados acoplado com modelos hidrológicos. Está projetado para integrar uma vasta gama de informações dispersas, sendo elas temáticas e espaciais, originariamente mantidas em diversos formatos por diversas instituições. Deve permitir análises da disponibilidade hídrica e de impactos na qualidade de água, dando informações sobre os processos ocorridos em diferentes partes da bacia hidrográfica, subsidiando a tomada de decisão para manejo e a outorga dos recursos hídricos, prevista a ser implementada no estado de Mato Grosso a partir de 2004.

O banco de dados de SIBAC é composto por dois componentes: (1) componente para manejo de cadastros de usuários da água, atualizado junto a Fundação Estadual de Meio Ambiente do estado de Mato Grosso - FEMA a partir de processos administrativos vinculados ao Licenciamento Ambiental (Fig. 1, “Banco de Dados (BD) - Cadastro de usuários”) e, (2) um componente para armazenamento e pré-processamento de dados hidro-ambientais (Fig. 1, “Banco de Dados (BD) - Dados ambientais”).



*componente mantido e atualizado junto a Fundação Estadual de Meio Ambiente de Mato Grosso – FEEMA.

Figura 1 : Concepção de SIBAC. Itens em negrito indicam componentes com relevância para a integração de NGFlow.

Um aplicativo de banco de dados externo – APLICA permite aos usuários o preenchimento digital das informações solicitadas sobre o uso dos recursos hídricos nos seus empreendimentos, solicitados em processos administrativos de licenciamento ambiental. São de relevância para a integração de NGFlow, procedimentos para a manipulação de series temporais de precipitação e vazão, que incluem módulos para o preenchimento de lacunas por métodos regressivos (TUCCI, 1998) e para a geração de tabelas formatadas para utilização no ambiente SIG.

Utilizado para modelação de vazões em resolução temporal diária ou mensal, NGFlow exerce funções fundamentais no contexto do monitoramento integrado de bacias hidrográficas. Além de permitir estimativas da disponibilidade hídrica e extensão de series temporais de vazão, gera entradas para os modelos QUAL2E (USEPA 1998) e OUTORGA (DA HORA 2001), para simulação de qualidade de água e alocação de recursos hídricos por aspectos quantitativos e qualitativos, respectivamente.

2.2 NGFlow

NGFlow é um modelo hidrológico semi-distribuído do tipo “Precipitação-Vazão”, para simulação contínua do escoamento de rios em bacias hidrográficas, originariamente desenvolvido para aplicação no rio Niger, África (YE *et al.* 1996). NGFlow considera vários componentes do ciclo hidrológico, incluindo os processos de precipitação, escoamento superficial nas sub-bacias e nos canais dos rios. Possui, em sua versão original, um componente para simulação de fluxo de águas subterâneas, que pode ser acoplado ao modelo de águas superficiais.

Uma modelação com NGFlow necessita três conjuntos de dados de entrada básicos: um Modelo Numérico de Terreno (MNT), uma representação espacial das estações climatológicas

e as séries temporais de precipitação associadas (Fig. 2). No caso da existência de represas, será necessário o acréscimo de um respectivo plano de informação pontual com uma tabela de atributos da sua caracterização (volume, extensão, liberação de água etc.). Para efetuar uma calibração de NGFlow, devem ser disponíveis também um plano de informação (PI) dos postos fluviométricos com series temporais de vazão acopladas.

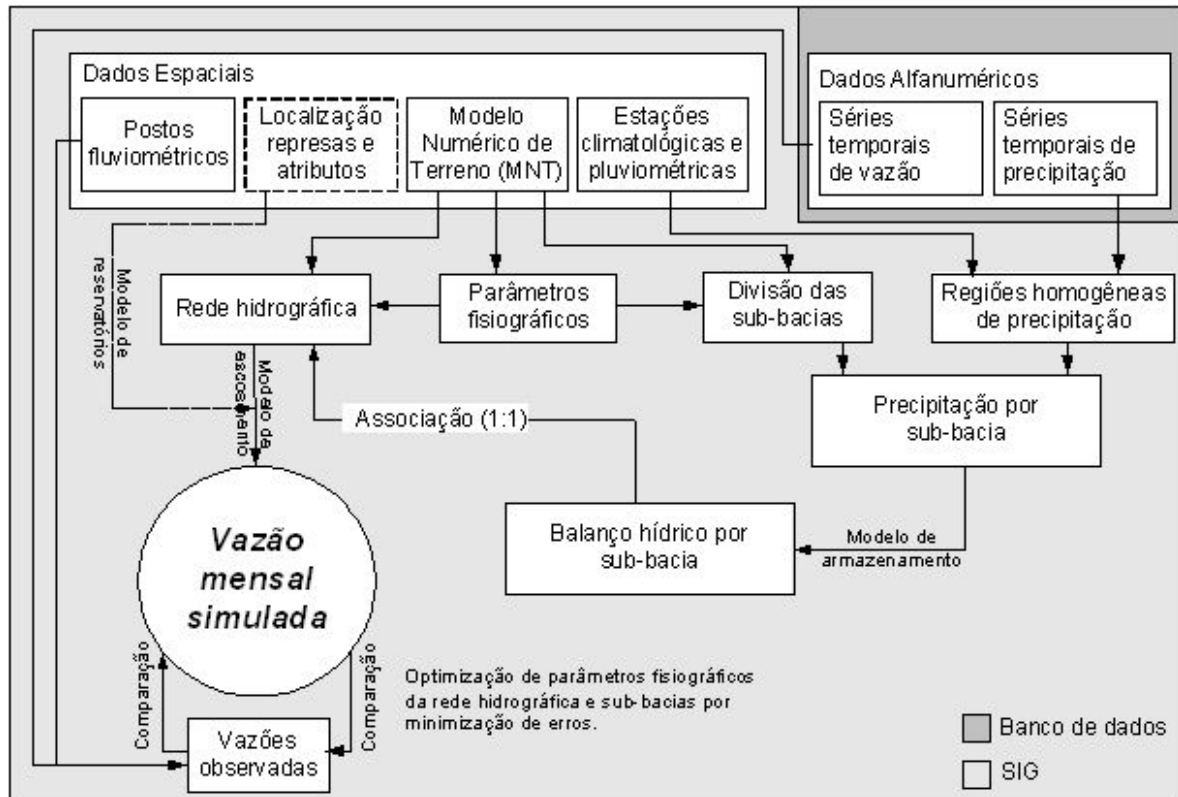


Figura 2 : Fluxo de dados na integração do modelo NGFlow no ambiente SIBAC.

Toda parametrização da bacia hidrográfica e da rede de escoamento é realizada a partir de pré-processadores de modelos numéricos de terreno (MNT). Um plano de dados espaciais das estações climatológicas e pluviométricas é utilizado para espacialização das series temporais de precipitação, mantidas no componente de banco de dados. O balanço hídrico e excedente é estimado a partir de um modelo simples de reservatórios (MINTZ & SERAFINI, 1992), utilizando como entradas as estimativas das precipitações por sub-bacias, capacidade de armazenamento de solo e evaporação potencial. As estimativas das vazões locais por sub-bacias se dão a partir de um componente de escoamento superficial, baseado em uma função de resposta da vazão local no volume de água excedente e um componente sub-superficial que pode ser simulado com um modelo linear de armazenamento. O escoamento nos canais pode ser simulado com os métodos Muskingun ou Muskingun-Cunge (CHOW *et al.* 1988). Na existência de represas, um sub-módulo específico de simulação acessa um respectivo PI espacial que possui atributos das características fisiográficas da lagoa (extensão, volume etc.) e das características de operação da usina (liberação média de vazão etc.). NGFlow pode ser calibrado a partir de series temporais de vazão observadas, otimizando os parâmetros fisiográficos da rede hidrográfica e sub-bacias.

2.3 Integração plena de NGFlow no SIBAC

A integração de NGFlow no ambiente SIG de SIBAC apresentada foi desenvolvida a partir da programação em ambiente ArcView 3.2 (ESRI) na linguagem proprietária Avenue (ESRI) que é

baseada no conceito de orientação a objetos. A integração se motiva por três objetivos principais:

1. Compatibilização do modelo com a estrutura do banco de dados temático e espacial de SIBAC
- 2.
3. Aperfeiçoamento e acréscimo de pré-processadores, permitindo a realização de todas as tarefas de pré-processamento e modelação a partir do ambiente SIG, e
- 4.
5. Modularização e padronização do código para facilitar o manuseio pelo usuário e garantir a aplicabilidade do modelo em qualquer bacia hidrográfica.
- 6.

Para a compatibilização do modelo com as estruturas do banco de dados temático e espacial, foram realizadas adaptações na denominação de planos de informação, tabelas e campos e nos próprios *scripts* em Avenue para acesso desses objetos.

Na versão original da integração de NGFlow (YE *et al.* 1996), várias tarefas de pré-processamento, tais como pré-processamento do modelo numérico de terreno e interpolação espacial das chuvas, precisam ser realizadas com softwares SIG externos, impedindo uma aplicação do modelo somente a partir do ambiente SIG ArcView (ESRI). Adicionalmente, cálculos de parâmetros fisiográficos tais como comprimento de rampas e tempo de escoamento médio por sub-bacias não estão sendo calculados de forma automatizada, reduzindo significativamente a interatividade da implementação.

A padronização do código de NGFlow na sua integração no SIBAC visa suprir as deficiências encontradas no modelo original, como a automação dos cálculos, centralização dos processos no ambiente SIG ArcView (ESRI), além da geração de PIs com denominações padronizadas, que são interpretados por pré-processadores e módulos subsequentes. A modularização dos componentes visa a disponibilização de seqüências objetivas nos passos de trabalho consecutivos, permitindo ao usuário um manuseio facilitado do modelo e garantindo a aplicabilidade do modelo em qualquer bacia hidrográfica, generalidade.

3. Implementação da Integração

A implementação de NGFlow é totalmente baseada no software SIG ArcView na versão 3.2 (ESRI). Os pré-processadores do Modelo Numérico de Terreno (MNT) necessitam da extensão *Spatial Analyst*, versão 2.0, para análise de PIs matriciais.

Na sua integração no ambiente SIBAC, uma modelação de vazão com NGFlow é efetuada em quatro passos principais: (1) o pré-processador de MNT gera os dados espaciais vetoriais de entrada (sub-bacias e rede hidrográfica); (2) os pré-processadores do modelo realizam a confecção e inicialização das tabelas de atributos e séries temporais necessárias; (3) execução do cálculo de parâmetros fisiográficos da rede de drenagem e sub-bacias e (4) a interpolação espacial da precipitação. Após o cálculo do balanço hídrico por sub-bacia, outro módulo simula o escoamento nos canais. Além do módulo de otimização que ajusta os parâmetros fisiográficos da rede de drenagem e sub-bacias para calibração do modelo para a área de estudo.

A Fig. 3 mostra em detalhe o fluxo de dados e operações seqüenciais percorridos em uma modelação com NGFlow-SIBAC. A única entrada do pré-processador de dados espaciais para parametrização da rede hidrográfica e sub-bacias é um MNT (módulo 1).

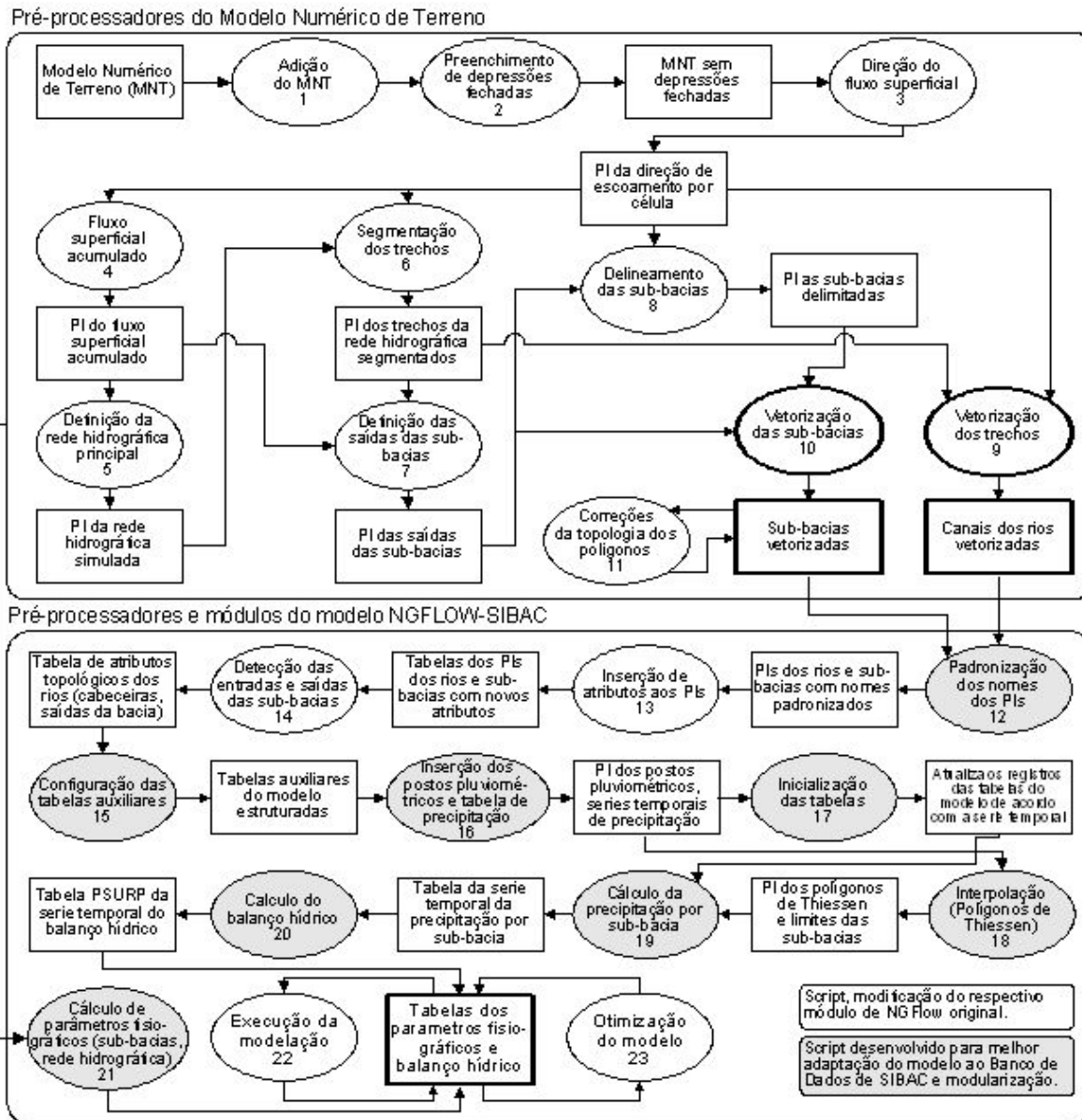


Figura 3 : Fluxograma dos pré-processadores e módulos de NGFlow na sua implementação no SIBAC.

O pré-processador da versão original de NGFlow mostrou limitações para seu uso operacional. A mais importante foi a necessidade da utilização do software ArcInfo (ESRI) para geração dos PIs das sub-bacias e trechos associados, fato que exige do usuário o conhecimento deste produto, eleva de forma significativa tempo e custos para modelações e pode induzir a geração de arquivos de entrada com formatação, denominação e estruturação incompatível com os módulos consecutivos do modelo. Além de também não possuir implementação automatizada para interpolação espacial das chuvas.

Na apresentada integração de NGFlow no SIBAC, todos os passos consecutivos de pré-processamento podem ser executados de forma dirigida no ambiente ArcView a partir de interfaces personalizadas. Os módulos 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8 e 11 (Fig. 3) foram desenvolvidos com base no pré-processador do modelo HMS (OLIVEIRA & MAIDMENT, 1999), adaptados para as necessidades de NGFlow. Os módulos restantes (9, 10) são adaptações dos respectivos scripts dos pré-processadores disponibilizados pela versão original de NGFlow.

Após a adição do MNT (módulo 1) é verificada a existência de eventuais depressões fechadas (*sinks*) do MNT que são corrigidas pelo módulo 2. Do MNT corrigido podem ser derivados os temas da direção do fluxo superficial (módulo 3), que simula a direção do escoamento em cada célula da matriz através das diferenças de altitude, e do fluxo superficial acumulado (módulo 4), que determina, a partir de um valor variável de acumulação definido pelo usuário, quais células fazem parte dos canais, dessa forma é possível simular a rede hidrográfica principal (módulo 5). Após a segmentação dos trechos (módulo 6), que divide a rede hidrográfica simulada em seus segmentos com base em suas confluências, a definição das saídas das sub-bacias (módulo 7), o delineamento das sub-bacias (módulo 8), segue a vetorização dos temas do rio e das sub-bacias, que até neste momento se encontram armazenados no modelo de dados matricial (módulos 9 e 10). A transformação dos PIs matriciais demanda uma correção da topologia e relacionamentos dos temas vetoriais criados, processo disponível a partir do módulo 11. Os temas vetorizados dos trechos e sub-bacias são as principais entradas para iniciar uma modelação com NGFlow.

A parte inferior da figura 3 mostra as operações a serem executadas para efetuar simulações com NGFlow-SIBAC após o pré-processamento dos dados espaciais. A maioria destes módulos originais sofreu modificações extensas e outros novos foram desenvolvidos.

É necessária a execução de pré-processadores do modelo para padronização dos nomes dos temas espaciais (módulo 12), modificação e inicialização de tabelas dos temas espaciais e séries temporais (módulos 13, 15, 17), e análise topológica da rede hidrográfica (módulo 14). Após adição de postos pluviométricos (módulo 16) segue a interpolação espacial das séries temporais de precipitação a partir do método “Polígonos de Thiessen” (GOOVAERTS, 2000). Por sobreposição dos PIs da divisão das sub-bacias e das regiões homogêneas de precipitação (polígonos de Thiessen) é obtida uma tabela estimada da série temporal da precipitação média para cada sub-bacia (módulos 18, 19). Podem ser efetuados em seguida os cálculos do balanço hídrico a partir de um modelo de armazenamento e a estimativa de parâmetros fisiográficos adicionais nas sub-bacias, derivados do MNT (módulos 20, 21). Com a montagem final dos dados espaciais e tabulares pode ser executado o módulo central (módulo 22) que consiste na atribuição dos excedentes nas sub-bacias à rede hidrográfica (cada sub-bacia contém um único trecho de rio) e na execução dos algoritmos Muskingun ou Muskingun-Cunge para estimativa da vazão nos canais em cada passo temporal.

NGFlow-SIBAC dispõe de pós-processadores, o mais importante deles para efetuar otimizações interativas do modelo a partir do ajuste de parâmetros fisiográficos da rede hidrográfica e das sub-bacias (módulo 23), comparando séries temporais de vazões simuladas e observadas em postos hidrológicos. Os demais módulos de pós-processamento, componentes para a visualização da distribuição das vazões, construção de pontos de checagem e represas, não foram submetidos a alterações significativas para a integração de NGFlow no SIBAC.

4. Aplicação e Validação do Modelo

Desempenho e confiabilidade do modelo integrado foram validados a partir de um conjunto de dados da bacia hidrográfica do alto e médio rio Cuiabá, localizada entre 14°15' e 16°10' de latitude sul e 54°45' e 56°55' de longitude oeste, no sul do estado de Mato Grosso, com uma extensão de aproximadamente 29.000 km² (Fig. 4).

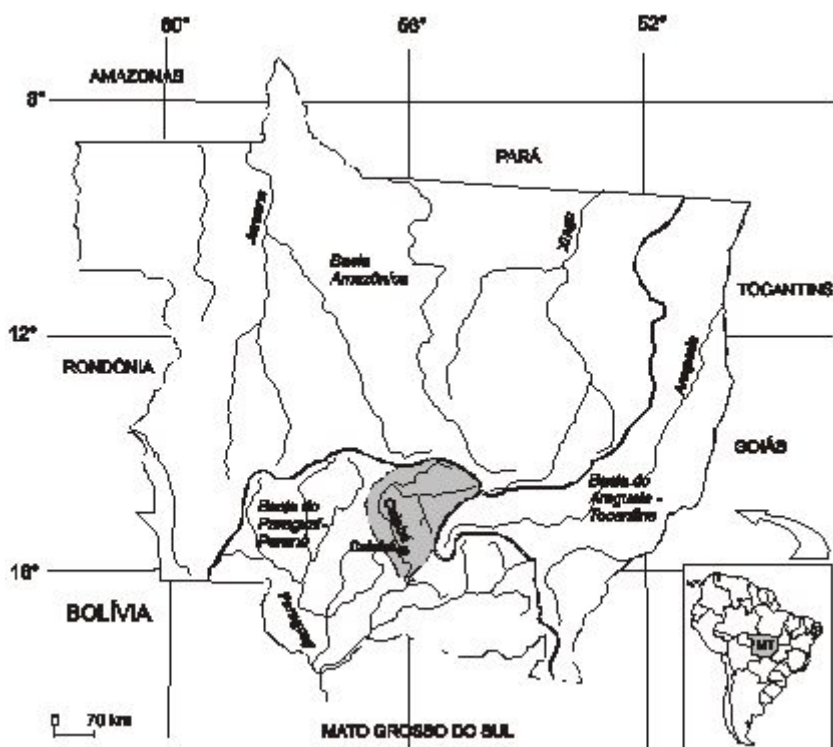


Figura 4 : Localização da bacia hidrográfica do alto e médio rio Cuiabá.

O clima semi-úmido no sul de Mato Grosso é caracterizado por temperaturas médias anuais entre 22 and 25 °C e precipitação anual entre cerca de 800 e 1600 mm. A sazonalidade expressiva da precipitação reflete fortemente na vazão. O rio Cuiabá na cidade de Cuiabá mostra médias mensais entre 100 m³/s em Agosto e 828 m³/s em fevereiro (serie temporal 1948-98).

Para o estudo foi interpolado um MNT utilizando os dados plano-altimétricos de 19 folhas topográficas (curvas de níveis, pontos cotados, rede de drenagem) da escala 1:100.000, sendo 14 folhas com equidistância das curvas de nível de 40 m, e 05 folhas, na parte setentrional da área de estudo, de 50 m (ZEILHOFER, 2001). Foi utilizado para a interpolação o algoritmo Topogrid, implementação de um interpolador desenvolvido por HUTCHINSON (1989, 1996) do conceito “localmente adaptado” (*locally adaptive*). Topogrid permite a imposição das linhas de drenagem que garante a integridade do declive do terreno na direção do escoamento superficial, característica indispensável de MNTs utilizados em simulações hidrológicas (SCHUMANN *et al.*, 2000, LEE *et al.*, 1992). O MNT foi discretizado em células de área igual a 22.500 m²(150m x 150m), resolução horizontal considerada compatível para a resolução vertical dos dados plani-altimétricos (ZEILHOFER, 2001). Para simulação da rede hidrográfica perene foi utilizado, após testes empíricos, um valor limite de 10000 células acumuladas.

A localização dos postos pluviométricos e fluviométricos e suas respectivas series temporais foram obtidas pelo portal “Hidroweb” (ANA, 2002) ou cadastrados por medições de campo, utilizando um receptor GPS Garmin XL (Garmin).

O desempenho do modelo foi avaliado a partir da raiz do quadrado do erro médio do balanço de massa (*Root Mean Square Error - RMSE*) (1) e o Coeficiente Eficiência de Nash e Sutcliffe – *COE* (2) (ASCE, 1993).

RMSE e COE são dadas por:

$$RMSE = \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n E_m} \quad (1)$$

e:

$$COE = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (E_m - E_s)^2}{\sum_{i=1}^n (E_m - \bar{E})^2} \quad (2)$$

sendo, que E_m é o evento observado, E_s o evento simulado, E a média do evento observado no período de simulação e n o número de eventos. O COE pode variar de negativo infinito a 1, sendo 1 um ajuste perfeito.

A Fig. 5 mostra o MNT interpolado, sobreposto com os PIs vetoriais das 95 sub-bacias, delimitadas a partir dos pré-processadores de NGFlow desenvolvidos. O planalto, região nordeste da bacia, formado por rochas sedimentares apresenta altitudes acima de 700 m. As escarpas, situadas na região central e sudeste, ficam visíveis por apresentarem variações de tonalidade abruptas. A bacia do médio rio Cuiabá com relevo suavemente ondulado é caracterizada por altitudes abaixo de 300 m na maior parte da sua extensão.

A Fig. 6 representa a precipitação média anual por sub-bacia, espacializada a partir de 11 postos pluviométricos utilizados para geração das series temporais pelo método “Polígonos de Thiessen”. Observa-se na distribuição das chuvas um gradiente leste - oeste a nordeste – sudoeste com as máximas acima de 1600 mm nas cabeceiras do rio Cuiabá no norte da bacia e as regiões de encosta e planaltos da Chapada dos Guimarães no leste da bacia e valores abaixo de 1300 mm no início da planície inundável do Pantanal Mato-grossense no sudoeste da bacia.

Observa-se que no pré-processador automatizado não são interpolados PIs espaciais da precipitação para cada passo temporal da serie, mas cálculos percentuais das áreas de cada sub-bacias nos respectivos polígonos de Thiessen, valores tabulares que em seguida são utilizados no cálculo do balanço hídrico de cada sub-bacia.

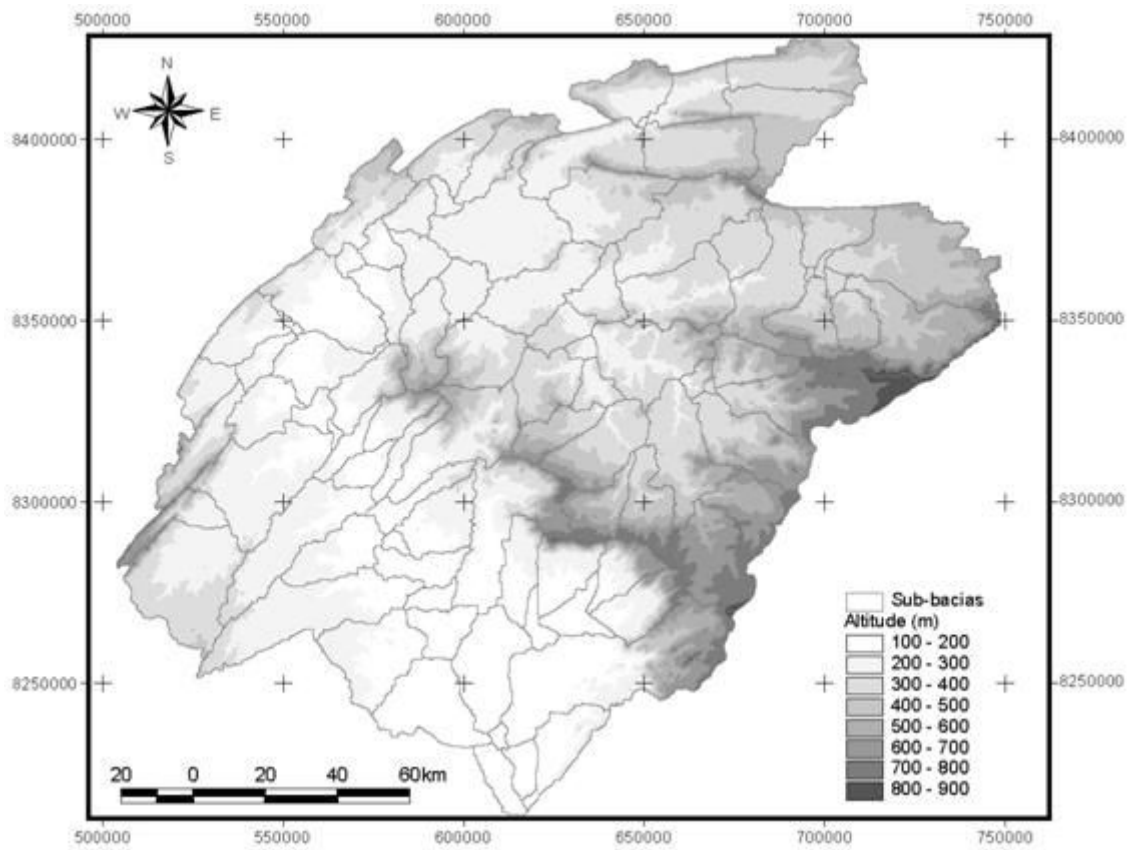
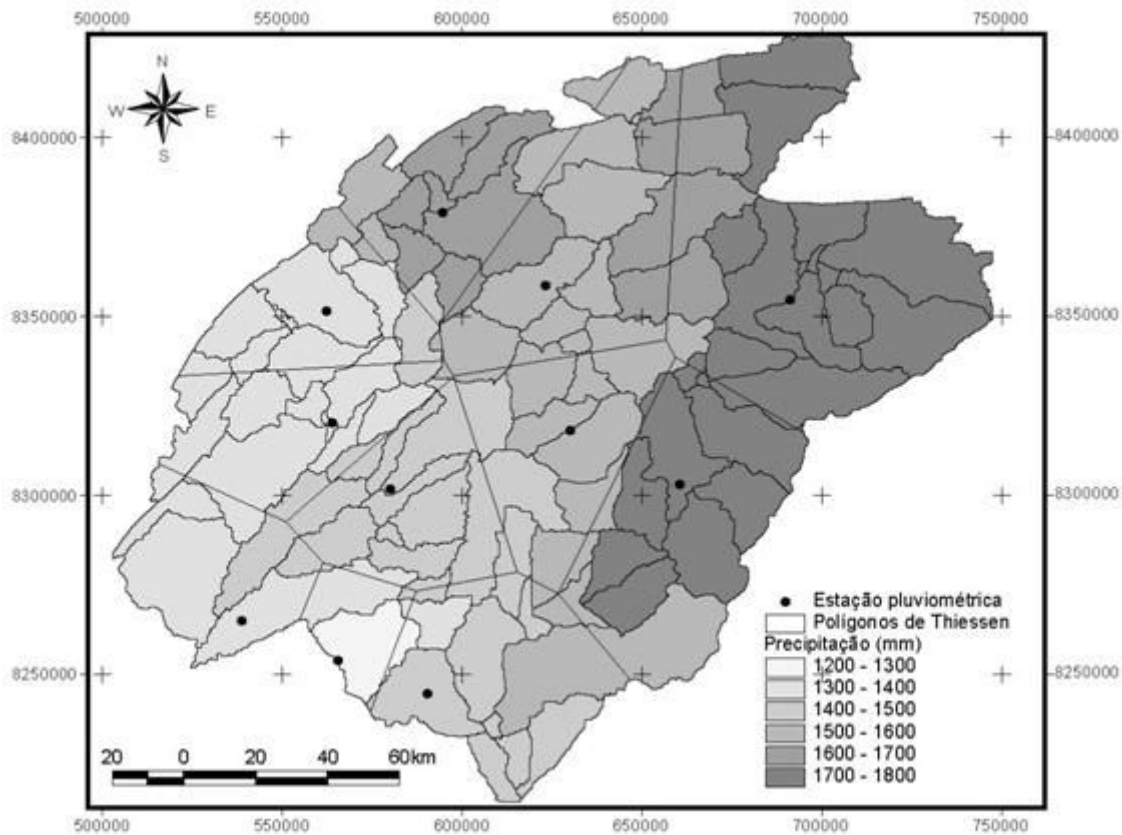


Figura 5 : Modelo Numérico de Terreno da bacia do alto e médio rio Cuiabá.



**Figura 6 : Precipitação média anual bacia do alto e médio rio Cuiabá, espacializada a partir do método “Polígonos de Thiessen”.
Serie temporal 1994-99.**

A Fig. 7 mostra a *interface* de ArcView com o resultado de uma ajuste parcial (otimização) de uma simulação da vazão mensal na Bacia do Rio Cuiabá. A janela gráfica (SIBAC) inclui a representação da rede hidrográfica simulada e a divisão das sub-bacias. No lado esquerdo superior da interface (Massfit.cht) são visualizadas uma comparação da vazão média mensal observada em uma seção de controle (*Target*) e a simulada (*Bestmass*) no mês de Novembro 1994 da série temporal, utilizando como critério de ajuste a melhor conservação de massa (comparação dos somatórios das vazões simuladas e observadas) na série temporal utilizada (72 meses). No lado esquerdo inferior da *interface* é apresentado, para quatro iterações de ajuste, o erro relativo das discrepâncias de massa (Optmass.cht). No lado direito da *interface* são visualizadas na janela gráfica a rede de drenagem e a bacia hidrográfica com os trechos selecionados para a otimização na parte baixa da bacia e a tabela comparativa (target.dbf) da serie temporal (campo “Time”) entre os valores de vazão observados (campo “Target”) e simulados (campos “Besterr” e “Bestmass”). Por fins ilustrativos são também incluídos na figura os respectivos sub-itens dos menus “Pré-processadores NGFlow” e “Modelo NGFlow” que devem ser executados seqüencialmente para a realização de modelações.

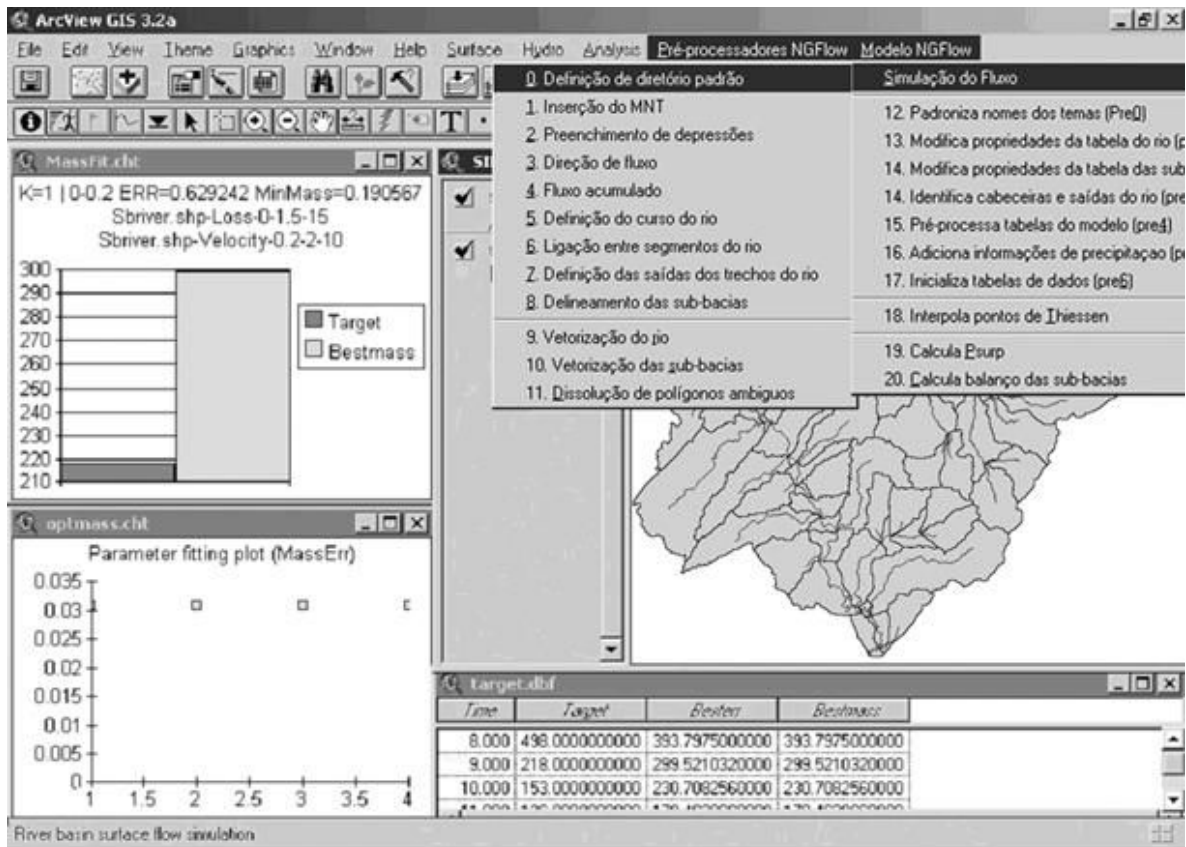


Figura 7 : Interface do modelo implementado e resultado exemplar de uma otimização.

A figura 8 mostra um comparativo das vazões mensais observadas e simuladas de 05 postos hidrológicos na bacia do alto e médio rio Cuiabá. Para avaliar a aplicabilidade do modelo em bacias não monitoradas, o modelo não foi calibrado a partir de vazões observadas para as simulações expostas. A sobre-estimação das vazões nos primeiros meses da serie explica-se pelas condições iniciais do modelo que, por padrão, considera uma saturação completa do solo. Após cerca de seis meses não podem ser mais observados desvios sistemáticos entre os valores simulados e observados. O ajuste sem calibração tende a ser inferior nas cabeceiras (Rc2_1), limitação que está sendo mais claramente detectada pelo indicador valor COE (0.433).

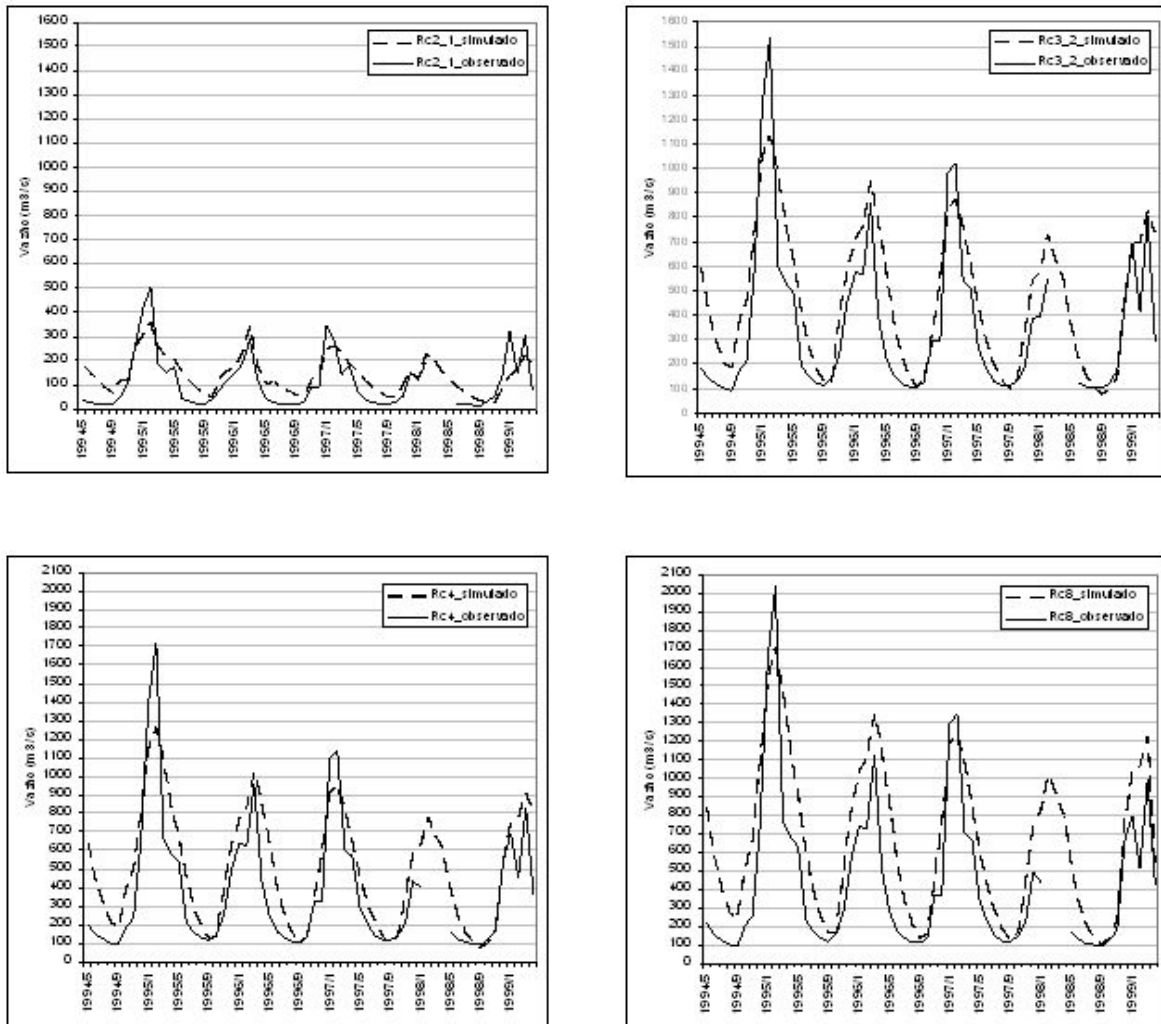


Figura 8 : Comparações de vazões médias mensais observadas e simuladas em 05 estações hidrológicas do Rio Cuiabá e Manso (05/1994-04/1999).

A fração entre o escoamento superficial e sub-superficial, parâmetro fixo que deve ser introduzido no início de cada simulação, mostrou-se forte impacto nos resultados das simulações.

5. Discussão

Foi apresentada uma integração operacional plena do modelo hidrológico NGFlow no ambiente ArcView (ESRI) de SIBAC, seguido por um estudo de caso com aplicação e validação do modelo na bacia hidrográfica do alto e médio rio Cuiabá.

A integração de NGFlow exige um embasamento aprofundado dos conceitos da simulação hidrológica, da representação destes conceitos em sistemas computacionais, como também das técnicas de programação em ambientes Avenue/ArcView (ESRI). Mesmo contando com um sistema pré-operacional e documentado, disponibilizado por YE *et al.* (1996), a implementação se mostrou uma tarefa complexa com uma demanda elevada de tempo para desenvolvimento e teste do sistema.

A utilização de um modelo de dados OO, entretanto, subsidia e facilita a estruturação conceitual e implementação da integração do modelo no SIG (McKINNEY & CAI, 2002). Em abordagens OO, a bacia hidrográfica pode ser modelada por seus constituintes reais (rede

hidrografia, sub-bacias etc.), representados por instancias de classes de objetos espaciais. A possibilidade de aplicar esse tipo de modelagem OO se deve a característica de componentes OO, de incluírem variáveis e métodos: a rede hidrográfica, por exemplo, como modelada em NGFlow, possui determinados atributos espaciais e temáticos padronizados. Sendo que uma instância de um PI vetorial de linhas - *FTheme* na nomenclatura de Avenue - pode ser acessada, com todas suas características, por qualquer módulo no decorrer de uma simulação, utilizando os métodos inerentes a classe: essa característica resulta em uma capacidade de comunicação sensivelmente superior de sistemas OO comparados com métodos da programação estruturada, garantindo uma troca de dados mais eficiente entre os módulos (ARGENT, 2004).

Outra característica de sistemas baseados em componentes OO é sua pré-disposição a serem modularizados. O código para cada módulo pode ser programado independentemente de outros componentes. Essa estrutura facilitou o entendimento da funcionalidade de módulos disponibilizados na versão original de NGFlow e dos pré-processadores de HMS, que puderam ser reaproveitados em boa parte. Neste contexto, VOINOV *et al.* (2004) mencionam uma tendência de uma repetitiva “reinvenção” na modelação de ecossistemas, necessária para a re-implementação em diferentes sistemas computacionais ou áreas de estudo. O presente estudo mostra que essa tendência poderia ser superada com a utilização conseqüente de componentes OO padronizados. O alto grau de modularização da integração apresentada permite a utilização imediata dos objetos e módulos desenvolvidos, em outras aplicações no ambiente ArcView. O modelo OUTORGA de SIBAC (Figura 1) acessa, por exemplo, dinamicamente os resultados de uma simulação de vazão com NGFlow, utilizando as tabelas e PIs padronizados.

Apesar da linguagem *script* Avenue (ESRI) presente no *software* ArcView não suportar todos os conceitos de programação orientada a objetos - POO, como construtores, destrutores, polimorfismo, pacotes, tipos abstratos e *interfaces* (BOOCH, 1994; PAGE-JONES, 1999), o que leva o programador a ter uma tendência em programar proceduralmente, foi possível implementar os módulos com os recursos disponíveis alcançando as vantagens da OO descritas por McKINNEY & CAI (2002) e ARGENT (2004).

Como mencionado por ARGENT & HOUGHTON (2001), a modularização pode favorecer a comparação de diferentes modelos em uma área de estudo, garantindo que o usuário aumente a eficiência na geração de dados de entrada (precipitação, temperatura, solos etc.). A alta demanda de tempo para a elaboração e formatação destes dados, tarefa que deve ser repetida para alimentação de cada modelo, impede estudos comparativos e a seleção do modelo que garante a melhor representação do problema ou a melhor compatibilidade para os dados disponíveis.

A integração plena baseada em modelo de dados OO permite que dados (*objetos espaciais*), funções de pré-processamento e simulação (*métodos*) e *interfaces* de usuário possam ser integrados em um único ambiente computacional (SIG), facilitando desta forma não somente o desenvolvimento, mas também a aplicação do sistema. A estrutura modular permite o direcionamento do usuário na execução das sucessivas tarefas da modelação. A chamada *encapsulação*, que consiste na separação dos aspectos externos de um objeto, dos detalhes internos de implementação, garante que os módulos tornam-se independentes: uma interação errônea pelo usuário em um determinado módulo de NGFlow pode ser detectada e corrigida, evitando uma interrupção ou mal-função de toda modelação. É evidente que o alto grau da automatização do sistema, objetivando uma solução operacional que permita a realização de modelações também por usuários menos experiente em questões de aplicação de SIGs para na simulação hidrológica, aumenta proporcionalmente o tempo gasto para o desenvolvimento do sistema. YANG *et al.* (2002) mencionam neste contexto a importância de *interfaces* amigáveis para aceitação de modelos pelo usuário: na integração apresentada, cada módulo

possui uma ou várias *interfaces* visuais para definição de entradas, que retornam parcialmente no caso de seleções errôneas, mensagens de erro explicativas.

Neste contexto deve ser considerada de suma importância a padronização na denominação dos objetos (PIs espaciais, tabelas etc.) e suas variáveis (atributos), garantindo desta forma integridade sintática entre o banco de dados e os parâmetros do modelo (PULLAR & SPRINGER, 2000). Sucessivos módulos devem acessar os objetos standardizados, evitando desta forma situações ambivalentes, nas quais o próprio usuário deve informar quais são os PIs e atributos “certos” que devem ser utilizados em um determinado passo da modelação. Neste contexto mostrou-se importante o uso consequente de métodos de classes do modelo de dados. Devem ser confeccionadas listas de objetos que incluem somente instancias com variáveis e métodos apropriados para uso em módulos que exigem uma seleção de PIs pelo usuário. São gerados, por exemplo, pelos pré-processadores do MNT uma serie de PIs matriciais e vetoriais, que são acrescentados ao projeto atual. Devem ser apresentados ao usuário, entretanto, para seleção de entrada em um determinado módulo somente instâncias que possuem características apropriadas (ex. classe de PIs vetoriais de linhas), evitando que o usuário escolha um PI “errado” para ser utilizado (ex. um PI matricial, quando o módulo necessita de um PI vetorial, ou um PI de polígonos, quando o módulo exige um PI de linhas). Da mesma forma, a execução sucessiva dos módulos deve gerar saídas que não necessitam uma edição interativa pelo usuário antes do seu consecutivo uso.

A validação do modelo na bacia do alto e médio rio Cuiabá já indica uma boa aplicabilidade para simulações das vazões médias nas condições climáticas da região. Projeta-se, entretanto, para o futuro a introdução opcional de planos de informação dos tipos de solos e do uso e ocupação de solo no modelo, representando de forma melhor as heterogeneidades espaciais das taxas de infiltração e permitindo a simulação de cenários do escoamento em função de mudanças no uso e ocupação.

6. Conclusão

A integração plena do modelo NGFlow em um ambiente SIG facilita o manuseio do modelo e acrescentou componentes que permitem a realização de todas as tarefas de uma modelação hidrológica em um ambiente ArcView, incluindo os passos de pré-processamento de dados espaciais.

A criação de novos *scripts* e modificações de *scripts* pré-existent permitiram a adaptação e compatibilização de NGFlow com os componentes de Banco de Dados e SIG de SIBAC.

A modularização e padronização dos módulos permitem seu reaproveitamento em outras aplicações e a aplicação imediata do modelo em outras bacias hidrográficas da região, visando, também, o desempenho satisfatório, validado em estudo de caso na bacia do Rio Cuiabá.

7. Referências Bibliográficas

- ARGENT,R.M.; GRAYSON,R.B. *Design of information systems for environmental managers: an example using interface prototyping*. Environmental Modelling & Software. 16, p. 433–438, 2001.
-
- ANA - Informações Hidrológicas – Estações telemétricas. Brasília, DF: Agencia Nacional das Águas. <http://hidroweb.ana.gov.br/HidroWeb/>, Último acesso em 2002.
-

- ARGENT,R.M. *An overview of model integration for environmental applications - components, frameworks and semantics*. Environmental Modelling & Software 19, p. 219–234, 2004.
-
- ARGENT,R.M.; HOUGHTON,B. *Land and water resources model integration: software engineering and beyond*. Advances in Environmental Research, 5, p. 351-359, 2001.
-
- ARNOLD,J.G.; SRINIVASIN,R.; MUTTIAH,R.S.; WILLIAMS,J.R. *Large Area Hydrologic Modelling and Assessment: Part I. Model Development*. JAWRA, 34(1), p. 73-89. 1998.
-
- - American Society of Civil Engineers *Task Committee on Definition of Criteria for Evaluation of Watershed Models of the Watershed Management Committee, Irrigation and Drainage Division*. Journal of Irrigation and Drainage Engineering, v. 119, p. 429-442, 1993.
-
- BOOCH,G. *Object-Oriented Analysis and Design with Applications*. Readin, MA; Addison-Wesley, 1994.
-
- BURROUGH,P.A.; McDONNELL,R.A. *Principals of Geographical Information Systems*. Oxford University Press. (2nd edition) Oxford (February 1998), p. 333, reprinted August 1998.
-
- CÂMARA, A. S.; FERREIRA, F.; CASTRO, P. *Spatial simulation modelling*. In: Fischer, M., Scholten, H. J., Unwin, D. (eds), *Spatial Analytical Perspectives on GIS*. Taylor & Francis, p. 201-212, 1996.
-
- V.T.; MAIDMENT,D.R.; MAYS,L.W. *Applied Hydrology*. McGraw-Hill, New York. p 572, 1988.
-
- CIRILO,J.A.; SAMPAIO Jr,R.A.; AGRA,M.C.M.; CUNHA,F.A.G.C.; TORRES FILHO,C.O. *Sistema de Informações de Recursos Hídricos do Estado de Pernambuco: Subsistema de Informações ao Usuário*.Revista Brasileira de Recursos Hídricos, 2(1), p. 29-43, 1997.
-
- CLARK,M.J. *Putting water in its place: a perspective on hydrology and water management*. Hydrological Processes, 12, p. 823-834, 1998.
-
- CROSBIE,P. *Object-oriented design of GIS: a new approach to environmental modeling*. In: *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. GIS World Book, Goodchild M.F. (Eds.), Fort Collins, p. 383-386, 1996.
-
- LUZIO,M.; SRINIVASAN,R.;ARNOLD,J.G. *A GIS-Coupled Hydrological Model System for the Watershed Assessment of Agricultural Nonpoint and Point Sources of Pollution*. *Transactions in GIS*. 8(1): p. 113-136, 2004.
-
- FEDRA,K. *Distributed models and embedded GIS: integration strategies and case studies*. In: Goodchild, M.F. et al. (Eds.), *GIS and Environmental Modeling: Progress and Research Issues*. GIS World Book, Fort Collins, p. 414–417, 1996.
-

- FEDRA,K.; JAMIESON,D.G. *An object-oriented approach to model integration: a river basin information system example*. In: HydroGIS' 96, IAHS publ. No. 235, p. 669–676, 1996.
-
- HORA,A.F. *Metodologia para a Outorga do Uso de Recursos Hídricos - Ênfase: Usinas Hidrelétricas*. Tese de Doutorado em Ciências de Engenharia de Produção, COPPE, UFRJ, RJ, p. 238, 2001.
-
- ROO,A.P. *Modelling runoff and sediment transport in catchments using GIS*. Hydrological Processes 12, p. 905–922, 1998.
-
- GOOVAERTS,P. *Geostatistical approaches for incorporating elevation into the spatial interpolation of rainfall*. Journal of Hydrology 228, p. 113–129, 2000.
-
- GOODCHILD,M.F. *Data models and data quality: problems and prospects*. In: M. F. Goodchild, B. O. Parks, and L. T. Steyaert, editors, Environmental Modeling with GIS. Oxford University Press: New York, p. 94-103, 1993.
-
- GOODCHILD,M.F.; HAINING,R.; WISE,S. *Integrating GIS and spatial data analysis: Problems and possibilities*. Int. J. Geographical Information Systems 6(5): p. 407-423, 1992.
-
- HUTCHINSON,M.F. *A new procedure for gridding elevation and stream line data with automatic removal of spurious pits*. Journal of Hydrology, 106, p. 211-232, 1989.
-
- HUTCHINSON,M.F. *A locally adaptive approach to the interpolation of digital elevation models*. 1996. In: Proceedings of 3rd International Conference/Workshop on Integrating GIS and Environmental Modeling, Santa Fe, January 21-26, <http://www.ncgia.ucsb.edu/conf>, consulta em novembro de 2003.
-
- J.; SNYDER,P.K.; FISHER,P.F. *Modeling the effect of data errors on feature extraction from digital elevation models*. Photogrammetric Engineering and Remote Sensing, 58, p. 1461-1467. 1992.
-
- MATSON,K.C.; STALLINGS,C.; JENNINGS,G.D.; McLAUGHLIN,R.A.; COFFREY,S. *Watershed Scale Hydrologic Modeling in a GIS Environment*. Proceedings of the GIS/LIS '95 Annual Conference, ASPRS/ACSM, Nashville, TN, p. 12, 1995.
-
- McKINNEY,D.C.; CAI,X. *Linking GIS and water resources management models: an object-oriented method*. Environmental Modelling & Software 17: p. 413–425, 2002.
-
- MINTZ,Y.; SERAFINI,Y.V. *A Global Monthly Climatology of Soil Moisture and Water Balance*. Climate Dynamics, 8, p. 13-27, 1992.
-
- NYERGES,T. *Geographic Information Abstractions: Conceptual Clarity for Geographic Modeling*. Environment and Planning A, vol. 23: p. 1483-1499, 1991.
-
- OLIVEIRA,F.; MAIDMENT,D.R. *GIS Tools for HMS Modeling Support*. 19th Annual ESRI International User Conference, 26-30 de Julho, San Diego, California. 1999.
-

- PAGE-JONES,M. *Fundamentals of Object-Orientede Design in UML*. Reading, MA: Addison-Wesley, 1999.
-
- PULLAR,D.; SPRINGER,D. *Towards integrating GIS and catchment models*. Environmental Modelling & Software, 15, p. 451–459, 2000.
-
- RAFAELI NETO,S.L. *Um Modelo Conceitual de Sistema de Apoio à Decisão Espacial para Gestão de Desastres por Inundações*. Tese apresentada à Escola Politécnica da Universidade de São Paulo para obtenção do título de Doutor em Engenharia, p. 231, 2000.
-
- ROUSSEAU,A.N.; MAIHOT,A.; MASSICOTTE,S.; DUCHEMIN,M.; DUPONT,J.; VILLENEUVE,J.P. *GIBSI: A watershed-based software system for the integrated management of surface water quality*. Journal of Soil and Water Conservation, 25(4), p. 284-301, 1997.
-
- SCHUMANN,A.H.; FUNKE,R.; SCHULZ,G.A. *Application of a geographic information system for conceptual rainfall-runoff modeling*. Journal of Hydrology, 240, p. 45-61, 2000.
-
- D.Z.; MAGGIO,R.C. *Integrating GIS with Hydrological Modeling: Practices, Problems, and Prospects*. Computer, Environment and Urban Systems, 23(1): p. 33-51, 1999.
-
- TUCCI,C.E.M. *Modelos hidrológicos*. Ed. Universidade/ UFRGS, Porto Alegre, p. 669, 1998.
-
- ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. *Better Assessment Science Integrating Point and Nonpoint Sources – BASINS user’s manual*. Washington, DC. EPA-823-B-01001, 2001.
-
- USEPA. *Better Assessment Science integrating Point and Nonpoint Sources – BASINS user’s manual*. EPA-823-B-98-006, Washington, 1998.
-
- VOINOV,A.; FITZ,C.; BOUMANS,R.; COSTANZA,R. *Modular ecosystem modeling*. Environmental Modelling & Software 19, p. 285–304, 2004.
-
- L.; LIN B.; KASHEFIPOUR,S.M.; FALCONER,R.A. *Integration of a 1-D river model with object-oriented methodology*. Environmental Modelling & Software, 17, p. 693–701, 2002.
-
- Z.; MAIDMENT,D.R.; McKINNEY,D.C. *Map-based surface and subsurface flow simulation models: an object oriented and GIS approach*. Center for research in water resources, The University of Texas, Austin, TX. 1996.
-
- Z.; SCHWARTZ,F.W. *Application of integrated Basin-Scale Hydrologic Model to simulate surface water and ground-water interactions in Big Darby Creek Watershed, Ohio*. Journal of American Water Resources Association, v. 34, nº 2, p. 1-17. 1998.
-
- ZEILHOFER,P. *Aplicabilidade de Mapas Topográficos 1:100.000 para a Modelação de Relevo e Obtenção de Parâmetros Fisiográficos na Bacia do Rio Cuiabá*. Revista Brasileira de Recursos Hídricos, Vol. 6, nº 3, p.18-29, 2001.

-
- ZEILHOFER,P.; LIMA,E.B.R.; SANTOS,F.M.; RIGO Jr,L.O. *SIBAC: A GIS-Based environmental monitoring system for the Cuiabá watershed, central Brazil*. GIS Brasil 2002, Curitiba – PR, p. 8, 2002.

Agradecimentos: *Os autores agradecem ao CNPq, FINEP e Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de Mato Grosso – FAPEMAT pelo financiamento das suas pesquisas.*

GEODÉSIA *online* · 4/2005 · [ISSN 1415-1111]
Revista da Comissão Brasileira de Geodésia