

# APLICAÇÃO DO SISTEMA DE SIMULAÇÃO HIDROLÓGICA RIO GRANDE PARA A BACIA INCREMENTAL DO RIO PARANAÍBA ENTRE AS UHE'S ITUMBIARA E SÃO SIMÃO

*Guilherme Rodrigues de Paula Chiari<sup>1</sup>; Luiz César Mendes Botelho<sup>2</sup>; Mauro Naghettini<sup>3</sup>; Nilo de Oliveira Nascimento<sup>4</sup> & Wilson Fernandes<sup>5</sup>*

**RESUMO** --- Modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar os processos de transformação chuva-vazão em uma bacia hidrográfica e prever condições futuras a partir de previsões meteorológicas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização e dos objetivos a serem alcançados. Este trabalho tem por objetivo apresentar a aplicação do Modelo de Simulação Hidrológica Rio Grande a área de drenagem incremental compreendida entre a UHE São Simão e UHE Itumbiara, com a avaliação dos resultados obtidos.

**ABSTRACT** --- The hydrologic model is one of the tools that science has developed to better understand and represent the rainfall-runoff transformation processes in a given river basin, as well as to predict future streamflows from meteorological forecasts. The hydrologic simulation is limited by the physical heterogeneity of the watershed and its hydrological processes, which has caused the development of a great number of models differing among themselves by the data used, by the refinement of their spatio-temporal discrete intervals, and by the objectives to be reached. This paper presents the application of the Hydrologic Simulation System Rio Grande for the drainage area in between the São Simão and Itumbiara hydropower plants, located in the Paranaíba river, in southcentral Brazil.

**Palavras-chave:** simulação hidrológica, previsão de vazões, calibração de modelos

1) Engenheiro de Planejamento Hidroenergético - Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, Av. Barbacena 1200, Belo Horizonte, MG, 30123-970. e-mail: gchiari@cemig.com.br

2) Engenheiro de Planejamento Hidroenergético - Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG, Av. Barbacena 1200, Belo Horizonte, MG, 30123-970. e-mail: lbotelho@cemig.com.br

3) Professor – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Av. do Contorno, 842, Belo Horizonte, MG, 30110-060 e-mail: naghett@netuno.lcc.ufmg.br

4) Professor – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Av. do Contorno, 842, Belo Horizonte, MG, 30110-060 e-mail: niloon@ehr.ufmg.br

5) Doutorando – Universidade Federal de Minas Gerais, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos, Av. do Contorno, 842, Belo Horizonte, MG, 30110-060 e-mail: wilson@ehr.ufmg.br

## 1- INTRODUÇÃO

O modelo hidrológico é uma das ferramentas que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar os processos de transformação chuva-vazão em uma bacia hidrográfica e prever condições futuras a partir de previsões meteorológicas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização e dos objetivos a serem alcançados.

Apesar do vertiginoso avanço das técnicas de simulação hidrológica nas últimas décadas e, portanto, da enorme profusão de modelos disponíveis, cada qual com sua concepção e parâmetros próprios, a seleção de um deles para uso geral torna-se tarefa de grande dificuldade. Isso se deve principalmente à ampla gama de aplicações possíveis, cada uma com suas particularidades de escala temporal e/ou espacial, assim como peculiaridades diversas quanto aos dados disponíveis. Mesmo depois de um modelo particular ter sido selecionado entre um conjunto de candidatos, resta ainda os problemas relativos à caracterização da área em estudo e sua relação com os parâmetros. Em geral, são poucas as diretrizes para calibração dos parâmetros e, como consequência, o usuário é obrigado a tomar decisões com base em um entendimento incompleto da intenção de quem concebeu a estrutura do modelo.

Os modelos hidrológicos determinísticos são normalmente definidos como aqueles que produzem sempre uma mesma resposta de  $y(t)$  para um mesmo valor de entrada  $x(t)$ , o que não ocorre no caso dos modelos estatísticos e estocásticos. Ou seja, no caso dos modelos determinísticos, as variáveis e os parâmetros não são descritos como aleatórios. Já nos modelos estatísticos e estocásticos, as variáveis e os parâmetros são descritos por meio de distribuições de probabilidade. Existem, igualmente, modelos híbridos que combinam componentes determinísticos e estocásticos. Por vezes, o simples tratamento dado ao processo de calibração de parâmetros de um modelo inteiramente determinístico pode torná-lo um modelo híbrido. Isso ocorre, por exemplo, em análise de incerteza de modelagem, se os parâmetros de um modelo determinístico são descritos por distribuições de probabilidade e à variável de saída atribui-se um intervalo de confiança.

O modelo Rio Grande foi concebido pelo Departamento de Engenharia Hidráulica e de Recursos Hídricos da Escola de Engenharia da Universidade Federal de Minas Gerais em 2002, como parte de uma pesquisa encomendada pela Gerência de Planejamento Hidroenergético da CEMIG – Companhia Energética de Minas Gerais. Primeiramente o Modelo Rio Grande foi concebido para a bacia hidrográfica da UHE Camargos, localizada na cabeceira do rio Grande.

Posteriormente o modelo passou por modificações visando torná-lo apropriado a aplicações genéricas e passou a se chamar Sistema Rio Grande.

Quanto à caracterização espacial, o Sistema Rio Grande pode ser classificado como concentrado por sub-bacias. Nos modelos concentrados, a bacia hidrográfica é assimilada a uma unidade geométrica única. Admite-se, nesse caso, que a variabilidade de suas características, tais como tipo e uso do solo, cobertura vegetal, declividade dos terrenos e outras, pode ser representada por valores médios, ou seja, simula-se uma bacia hipotética homogênea. Este tipo de estrutura é utilizado para bacias de pequeno porte, onde a distribuição espacial dos parâmetros e variáveis não compromete os resultados para o estudo desejado. Os modelos concentrados evoluíram de modo que se permite a subdivisão da bacia em várias sub-bacias. Modelos concentrados por sub-bacias representam a bacia hidrográfica como uma agregação funcional de sub-bacias ou de sub-áreas e de trechos de curso d'água. Nesse caso, cada sub-bacia ou sub-área, assim como cada trecho de curso d'água são tratados como unidades hidrológicamente homogêneas. Portanto, um modelo concentrado por sub-bacias é uma agregação de modelos concentrados.

O Sistema Rio Grande foi concebido com a finalidade primeira de controle operacional, uma vez que ele compreende um modelo matemático completo das funções de produção e transferência do ciclo hidrológico, cujas equações procuram sintetizar as relações entre as variáveis do estado atual, permitindo o prognóstico dos estados futuros. Entretanto, o Sistema Rio Grande, devido à sua estrutura conceitual, também permite a simulação de cenários singulares, não necessariamente relacionados a prognósticos futuros, a partir de seqüências hipotéticas de precipitação e do conhecimento de valores plausíveis para os parâmetros das funções de produção e transferência. Tais cenários inusitados podem ser ainda modificados pela incorporação de regras operativas diversas, o que remete novamente à idéia de controle operacional. Portanto, neste amplo sentido, o Sistema Rio Grande cumpre a dupla função de simulação hidrológica e previsão de aflúências, provendo elementos para a tomada de decisões quanto ao controle operacional de estruturas de aproveitamento de recursos hídricos. Por esta razão, o Sistema Rio Grande é visto como um sistema integrado para simulação hidrológica e previsão de aflúências para controle operacional. O Sistema Rio Grande integra em três módulos as etapas de calibração de parâmetros, simulação hidrológica e previsão de vazões, as quais, a despeito de serem dependentes no que se refere à identificação do conjunto de parâmetros e à topologia da bacia em estudo, guardam uma relativa independência em seus objetivos intrínsecos.

Resumidamente, no Sistema Rio Grande, a síntese determinística contínua da transformação chuva-vazão é realizada inicialmente de modo concentrado (ou seja, em uma dada

sub-bacia), por meio de duas funções: a primeira, de produção, a qual executa a separação de um certo pulso de chuva bruta em deflúvio superficial por unidade de tempo, enquanto a segunda, de concentração, faz a distribuição temporal dos pulsos de deflúvios superficiais, calculados em diferentes intervalos de tempo, concentrando-os e transformando-os em vazões na seção exutória. Em seguida, uma terceira função, de propagação, combina as vazões simuladas em sub-bacias tributárias, ao longo dos trechos fluviais que as interligam, permitindo, assim, a síntese hidrológica de modo semi-distribuído. Essas três funções permitem atribuir à síntese hidrológica do Sistema Rio Grande a classificação de contínua e semi-distribuída. A figura 1 apresenta os elementos diagramáticos utilizados pelo Sistema Rio Grande na representação de uma bacia hidrográfica genérica. A figura 2 demonstra o *layout* de uma bacia hidrográfica genérica composta de duas sub-bacias localizadas no mesmo curso d'água.

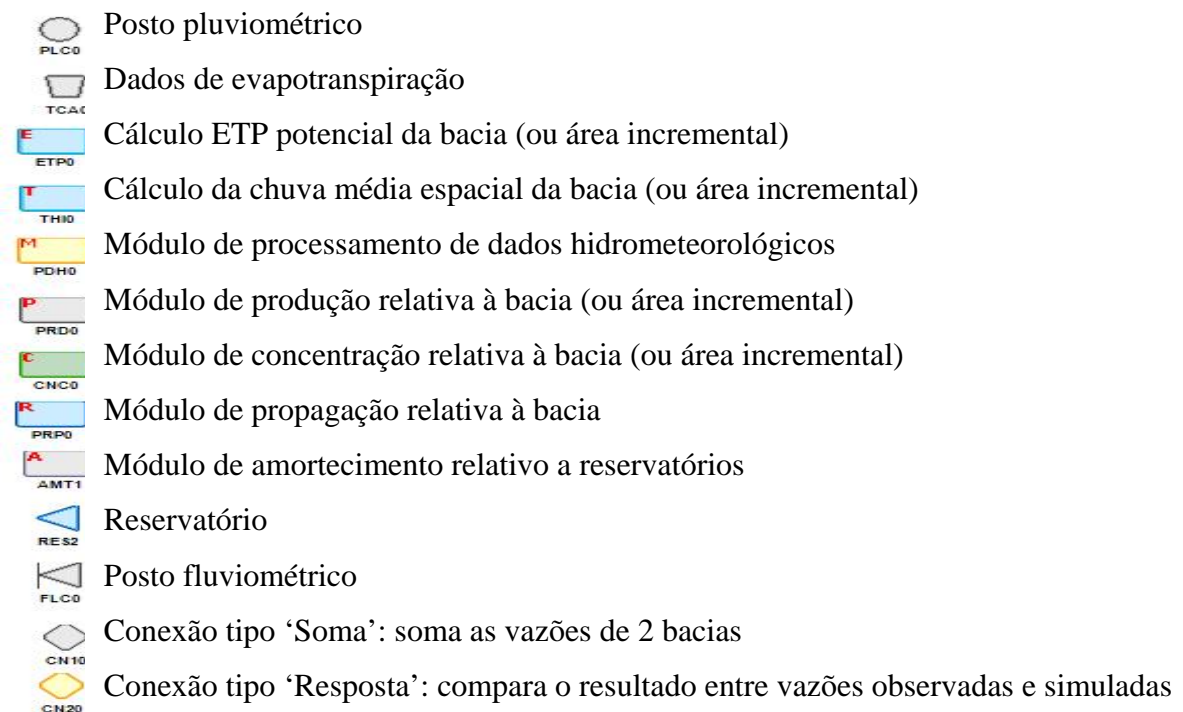


Figura 1-Elementos diagramáticos do Sistema Rio Grande

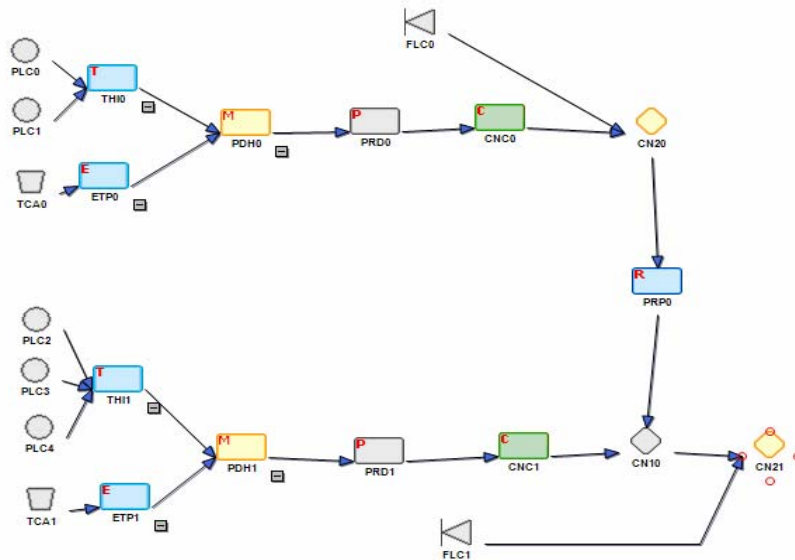


Figura 2 - *Layout* de uma bacia hidrográfica genérica

Este artigo visa apresentar uma aplicação do Sistema Rio Grande à área incremental entre a UHEs Itumbiara e São Simão. Estes resultados são preliminares e deverão ser comparados aos resultados de outros modelos, na perspectiva do uso do Sistema Rio Grande para a previsão de vazões afluentes ao reservatório da UHE São Simão. O estudo desta bacia representa um desafio formidável, pois a mesma apresenta grande heterogeneidade física, entre os diversos postos fluviométricos utilizados, com áreas de drenagem variando entre 5.000 km<sup>2</sup> a 30.000 km<sup>2</sup>, e representa a bacia hidrográfica mais complexa de todos os aproveitamentos hidroelétricos operados pela CEMIG.

A bacia da Usina Hidrelétrica São Simão faz parte da bacia do rio Paranaíba, um dos principais formadores do rio Paraná. O rio Paranaíba nasce no Estado de Minas Gerais a uma altitude de 1.140m, percorre uma extensão de 1.120 km, até sua desembocadura no rio Paraná. Sua bacia hidrográfica abrange uma área de 220.195 km<sup>2</sup>, até a confluência com o rio Grande, quando é formado o rio Paraná. A maior parte da bacia hidrográfica está localizada no Estado de Goiás e no Distrito Federal (68%) e o restante (32%) em Minas Gerais. Seu percurso está definido em três trechos distintos: Alto Paranaíba, correspondente ao trecho da nascente até o km 370; Médio Paranaíba, do km 370 até a barragem de Cachoeira Dourada, com 370 km; Baixo Paranaíba, da barragem de Cachoeira Dourada até a sua foz, com extensão de 380 km. A área de drenagem total da UHE São Simão é de 171.000km<sup>2</sup> e o trecho em estudo compreende a área de 76.000 km<sup>2</sup> entre esse aproveitamento e a Usina Hidrelétrica de Itumbiara, com uma área de drenagem de 95.000km<sup>2</sup>, no mesmo rio a montante. Os principais afluentes são os rios do Prata e Tijuco (margem esquerda), e os rios dos Bois e Meia-Ponte (margem direita). A figura 3 mostra

uma composição colorida obtida com imagens LANDSAT TM7, apresentando o reservatório da usina de São Simão e o seu entorno.

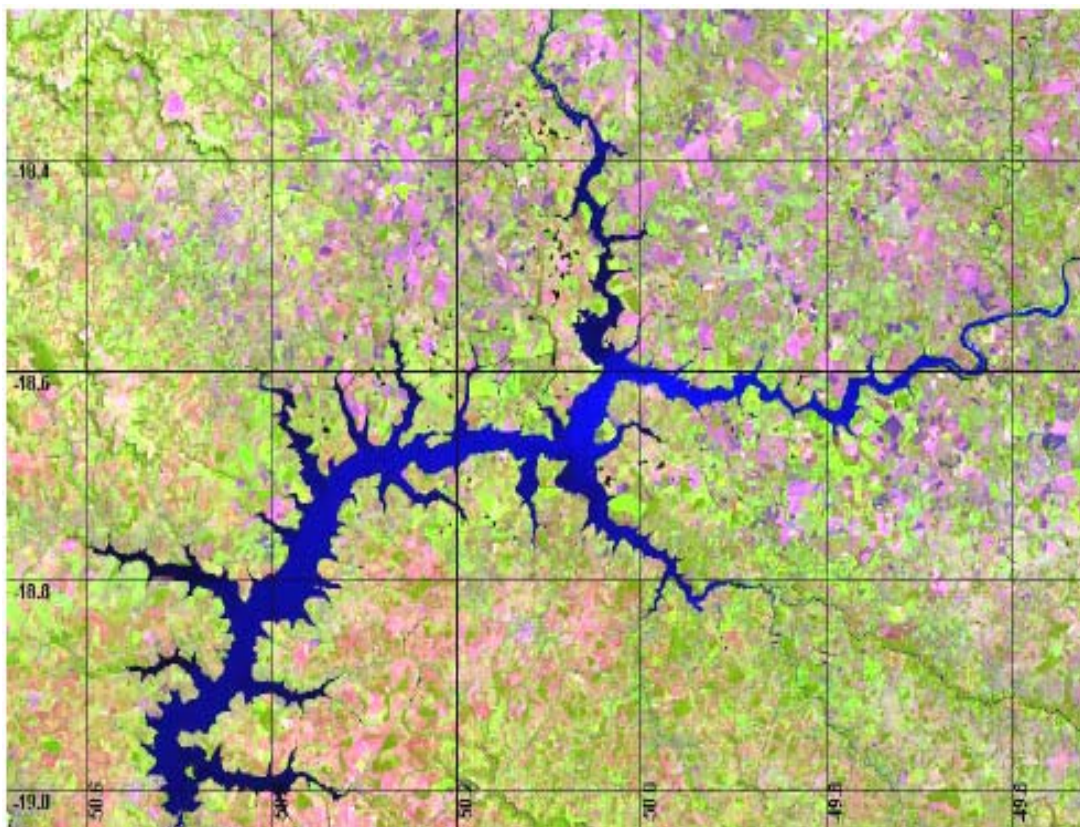


Figura 3 – Reservatório da usina hidrelétrica de São Simão

## 2- JUSTIFICATIVA

A vulnerabilidade das sociedades humanas aos desastres naturais, apesar de constatável desde eras pré-históricas, tem aumentado com o tempo. A razão principal para esse fato é certamente a crescente concentração de população e atividades humanas em áreas sujeitas a desastres naturais, a despeito da implementação concomitante de diferentes medidas mitigadoras. Entre os diversos desastres naturais, Miller (1997) aponta aqueles resultantes das ocorrências extremas de excesso e/ou escassez de água como os mais frequentes e destrutivos, tanto do ponto de vista do número de fatalidades como dos prejuízos econômicos diretos e indiretos. Em particular, as consequências danosas das inundações, além de não conhecerem restrições geográficas, têm-se tornados muito graves, apresentando uma fortíssima tendência de crescimento em anos recentes, conforme ilustrado nas Figuras 4 e 5.

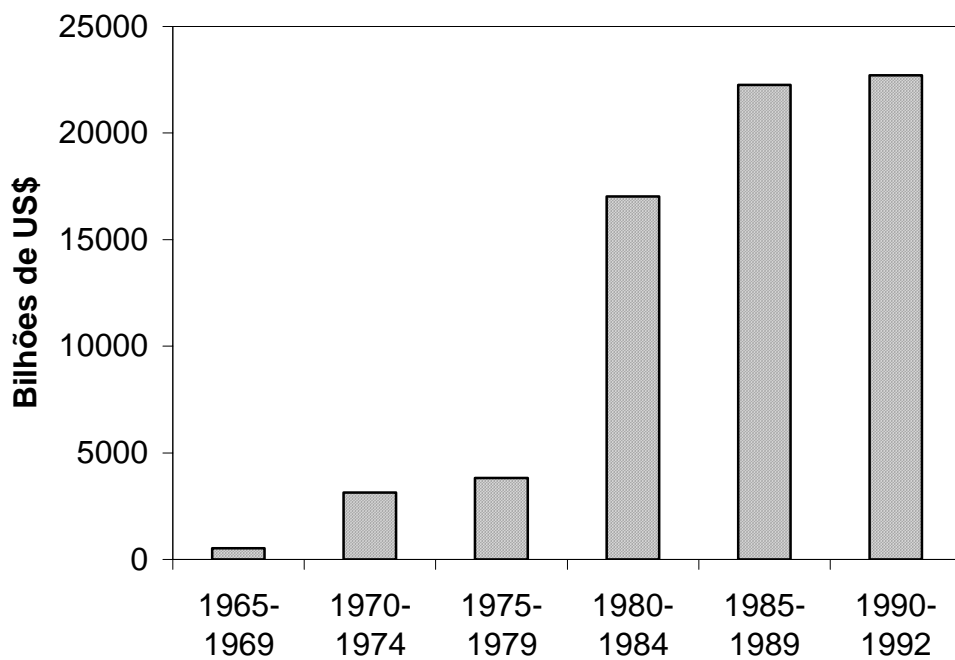


Figura 4 – Prejuízos mundiais devidos às inundações, em bilhões de US\$.  
[fonte: Todini (1997)]

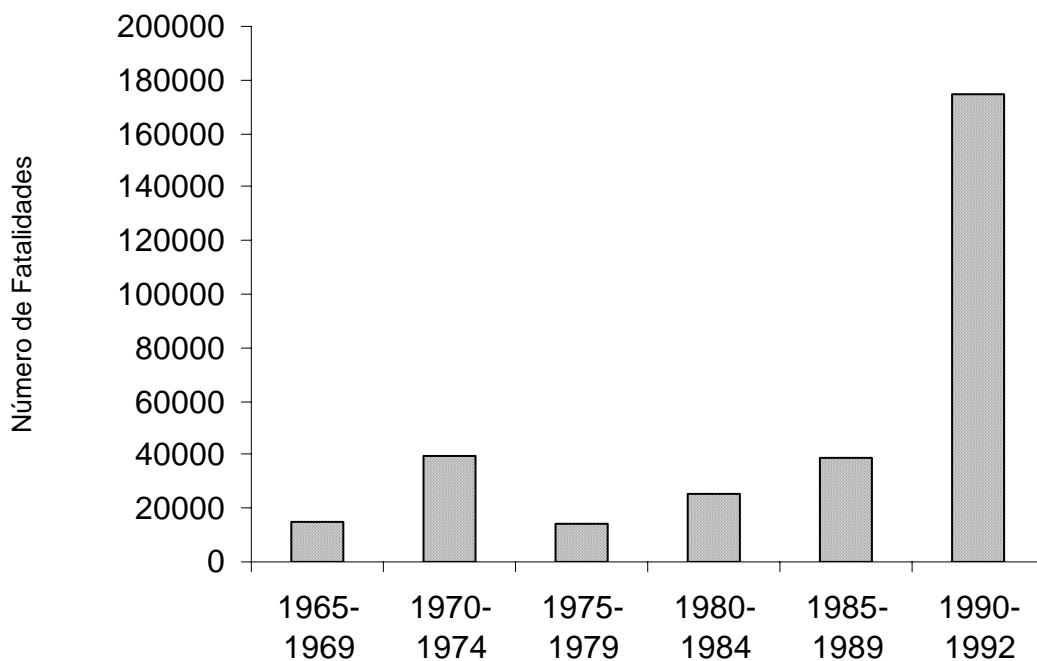


Figura 5 – Número mundial de fatalidades devidas às inundações.  
[fonte: Todini (1997)]

Ao lidar com os riscos de inundações catastróficas, tendo clara a percepção da impossibilidade óbvia do controle absoluto de enchentes raras através de estruturas hidráulicas, há muito, os hidrólogos têm-se dedicado ao desenvolvimento de técnicas e métodos de previsão hidrológica. Esta compreende os meios para prover estimativas dos estados espaços-temporais futuros das variáveis hidrológicas, geralmente em tempo atual e para uma dada área de interesse. O modelo hidrológico foi então a ferramenta que a ciência desenvolveu para melhor entender e representar os processos de transformação chuva-vazão em uma bacia hidrográfica e prever condições futuras a partir de previsões meteorológicas. A simulação hidrológica é limitada pela heterogeneidade física da bacia e dos processos envolvidos, o que tem propiciado o desenvolvimento de um grande número de modelos que se diferenciam em função dos dados utilizados, discretização e dos objetivos a serem alcançados.

Rodda & Rodda (2000) sugerem que as primeiras experiências de previsão hidrológica tenham sido a antecipação da notícia da chegada das cheias no baixo curso do Rio Nilo e, muito mais tarde, no século 13, as tentativas de controle dos níveis dos rios holandeses a partir de observações pontuais de montante. Os mesmos autores prosseguem, afirmando que o primeiro sistema de previsão de cheias devidamente documentado é o do Rio Tees, no nordeste da Inglaterra, cujas cheias eram antecipadas em seis a oito horas na localidade ribeirinha de Yarm, com base nas observações do reverendo local. Entretanto, foi somente em 1845, a partir da instalação da primeira rede pluviométrica na bacia do Rio Saone, que foi possível exercitar a previsão de suas cheias na localidade francesa de Lyon, com 4 dias de antecedência. Por volta de 1854, as redes flúvio-pluviométricas já se estendiam por toda a França, fato que permitia prever as cheias do Rio Sena em Paris, com 3 dias de antecedência.

Embora a motivação original dos prognósticos hidrológicos tenha sido a mitigação das grandes enchentes, eles podem ser empregados também para finalidades estritamente econômicas. De fato, um sistema eficaz de previsão hidrológica, além de poder evitar fatalidades e prejuízos diretos, proporciona meios valiosos para a operação e controle de estruturas de aproveitamento de recursos hídricos, tais como vias de navegação fluvial, usinas hidrelétricas, perímetros de irrigação e sistemas de abastecimento de água. Entretanto, para ser eficaz, um sistema de previsão hidrológica necessita possuir dois atributos fundamentais: precisão e antecedência. Esses atributos dependem de uma série de fatores, sendo os principais a disponibilidade de dados hidrológicos e meteorológicos, a velocidade com que estes dados são recebidos e tratados no centro de previsão, a eficácia do método de previsão empregado e o tempo necessário para a disseminação da informação e a conseqüente tomada de decisão.



Uma vez desenvolvida a estrutura do modelo hidrológico e calibrados os seus parâmetros, ele pode ser empregado no planejamento, projeto e controle de estruturas de aproveitamento de recursos hídricos, bem como na análise de cenários diversos de alterações do sistema físico. Especificamente no que concerne à atividade de controle, os modelos determinísticos de simulação hidrológica têm sido utilizados com muito sucesso na chamada operação em tempo atual de sistemas de recursos hídricos. Nesse modo, os modelos são capazes de ajudar a definir decisões operativas em um dado local, levando em conta não somente os estados correntes do sistema, mas também as previsões de seus estados futuros. Os modelos de operação em tempo atual podem ser eficazmente empregados, por exemplo, no controle do nível de armazenamento de um reservatório diante da antecipação de um evento hidrometeorológico extremo de curta duração. Da mesma forma, podem ser usados em base contínua para gerenciar sistemas complexos com um grau maior de antecipação. Em ambas as situações, eles devem ter seus estados correntes continuamente atualizados e incorporar um conjunto de prováveis cenários hidrometeorológicos de extensão compatível com a previsão de curto ou de longo prazo. Assim, a partir dos estados correntes do sistema e da simulação de afluências previstas em futuro próximo ou distante, podem-se estabelecer regras operativas, respectivamente em tempo atual ou futuro, visando atender às metas correspondentes de volumes de armazenamento e restrições de defluências.

A principal característica dos modelos fisicamente fundamentados encontra-se no objetivo de atribuir um realismo físico à representação do fenômeno. Eles buscam descrever os mecanismos internos do sistema natural por meio de formulações baseadas em leis da mecânica clássica (princípios de conservação da massa, da energia e da quantidade de movimento), da termodinâmica, da química (equilíbrio químico, cinética química) ou biológicas (leis de comportamento e de crescimento). Quando a modelagem restringe-se à resolução da equação do balanço hídrico na bacia hidrográfica, os modelos fisicamente fundamentados baseiam-se na parametrização das equações fundamentais de Navier-Stokes, resultando no emprego das equações de Saint-Venant para o escoamento turbulento não-permanente a superfície livre, de Darcy para o escoamento em meios saturados e de Richards para o escoamento em meios não saturados.

O setor elétrico vem utilizando o volume de espera desde a década de 70 de maneira a minimizar os efeitos de uma enchente. A previsão de vazão de curto prazo é essencial para operar uma usina hidrelétrica e controlar inundações em zonas ribeirinhas. Trechos a jusante de usinas hidrelétrica muitas vezes estão sujeitos a inundações naturais, e os reservatórios podem ser utilizados para minimizar o efeito destas inundações através de um volume de espera. O volume

de espera é dimensionado através de séries estatísticas do passado e depende muito de processos hidroclimáticos sazonais. Como, em cada ano a sazonalidade nem sempre obedece ao histórico é necessária uma operação que permita otimizar este volume, diminuindo o risco sem perda de energia gerada.

A previsão de vazão em tempo real ou curto prazo torna-se então uma ferramenta que permite uma gestão mais adequada deste volume e a redução dos riscos associados. A previsão pode ser realizada a partir de informações no rio a montante, com base na precipitação registrada em rede telemétrica, mas está limitada a antecedência entre a ocorrência da precipitação e a chegada da vazão nos locais de interesse. Esta pode ser curta para a gestão de volumes e controle de inundações.

### **3- MATERIAL E MÉTODOS**

#### **3.1- O Sistema Rio Grande**

A formulação teórica do modelo Rio Grande é descrita por Naghettini et al. (2002). O balanço de umidade do solo do modelo Rio Grande é baseado inteiramente na conceituação do modelo Xinanjiang, inicialmente descrito por Zhao et al. (1980), cuja estrutura também é usada, em quase sua totalidade, pelo modelo ARNO (Todini, 1996) e, em menor grau, pelo modelo NWSFRS do National Weather Service norte-americano. A função de transferência (concentração) utiliza o modelo do hidrograma unitário de Clark, seguindo a formulação original do Hydrologic Engineering Center do U.S. Army Corps of Engineers (HEC 1, 1981) e a propagação é feita pelo modelo de Muskingun-Cunge.

Embora a calibração manual dos parâmetros do elemento de produção do Sistema Rio Grande continue sendo de grande valor, seja para refinar calibrações anteriores, seja como instrução para novos usuários, é forçoso reconhecer que ela requer um grande esforço operacional. Tal constatação decorre, principalmente, do fato do Sistema Rio Grande ter, como núcleo, um complexo modelo de transformação chuva-vazão, com 13 parâmetros, passíveis de calibração em bacias de alguns milhares de quilômetros quadrados, compostas por múltiplas sub-bacias e pontos de controle, cada qual com suas respectivas amostras de observações plúvio-flúvio-evaporimétricas. Esse fato, comum a diversos modelos de simulação hidrológica, é a principal razão para o emprego de algoritmos de otimização para automatizar, ou facilitar, o processo de calibração de parâmetros.

Os primeiros algoritmos de calibração de parâmetros de modelos de simulação hidrológica fizeram uso de técnicas de otimização local, a partir de um conjunto de valores

iniciais. Alguns exemplos dessas técnicas são os algoritmos do tipo quase-Newton, com base em derivadas, ou aqueles do tipo Nelder-Mead, com base em otimizações Simplex. O principal problema desses algoritmos é que, de modo geral, as soluções encontradas referiam-se a um ponto ótimo local, ao invés de um ótimo global. Dada a inerente complexidade dos modelos conceituais de simulação hidrológica, os estudos posteriores concentraram-se em algoritmos de pesquisa global, entre os quais se destacam os métodos “Simulated Annealing” (Thyer et al., 1999), “Algoritmo Genético” (Wang, 1997) e “SCE-Shuffled Complex Evolution” (Duan et al., 1992). As comparações entre esses métodos, aplicados a diversos estudos de casos, demonstraram que, em pelo menos um caso, o algoritmo SCE teve desempenho superior em relação aos demais (Tolson, 2005). Ressalva-se, entretanto, que essas comparações tiveram como base um número ilimitado de execuções do modelo de simulação, cada qual com um certo conjunto (ou sub-conjunto) de parâmetros.

Apesar da superioridade relativa do método SCE, é um fato que a otimização de um conjunto típico de 10 ou mais parâmetros de um modelo conceitual de simulação hidrológica pode resultar em horas e horas de cálculo computacional. Tal fato representou um grande obstáculo à incorporação do algoritmo SCE ao Sistema Rio Grande, tendo em vista os preceitos construtivos de generalidade e simplicidade operacional. Tolson, (2005), entretanto, apresentou uma interessante alternativa à exagerada demanda de esforço computacional do método SCE. Essa alternativa é o algoritmo DDS, acrônimo dos termos em inglês *Dynamically Dimensioned Search*, cuja proposta é o objeto principal da tese de doutorado de B. A. Tolson, defendida em maio de 2005, no Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da universidade norte-americana de Cornell. O algoritmo DDS foi incorporado como método único de calibração automática dos parâmetros do elemento funcional de produção do Sistema Rio Grande e será objeto de breve descrição nos parágrafos que se seguem.

O algoritmo DDS é um método novo, mas extremamente simples, de busca heurística global de um conjunto único de soluções satisfatórias ou otimizadas, em contraposição a soluções “ótimas”, ao longo de um número finito de avaliações de uma certa função-objetivo. O algoritmo é concebido de modo a escalonar o número máximo de avaliações da função-objetivo, previamente fixado pelo usuário, tal que não haja nenhum outro critério de finalização da pesquisa. Em palavras simples, o algoritmo DDS faz uma pesquisa “global” no início do processo de otimização, tornando-se menos global e mais local, quando o número de iterações aproxima-se do número máximo de avaliações da função-objetivo. O ajuste de busca global para local, dá-se pela redução dinâmica e probabilística do número de dimensões nas vizinhanças da melhor iteração até então encontrada. As soluções candidatas são selecionadas depois de haverem sido

provocadas perturbações controladas dos, até então, melhores valores dos parâmetros (variáveis de decisão), por meio de uma distribuição normal de média zero e desvio-padrão previamente arbitrado pelo usuário. De acordo com a lógica do algoritmo DDS, demonstra-se que a solução corrente, ou a melhor solução já encontrada, jamais será atualizada por outra de qualidade inferior.

O ajuste dinâmico do número de dimensões na vizinhança  $\{N\}$  distingue o algoritmo DDS de outros métodos, tornando-o muito eficiente na busca do conjunto de soluções satisfatórias (ou otimizadas) para as variáveis de decisão. A probabilidade de inclusão de variáveis de decisão na vizinhança decresce à medida que o número de avaliações da função-objetivo tende para o máximo prescrito pelo usuário. No esquema DDS, o parâmetro  $r$  é o único a ser fixado a priori. Esse parâmetro define o desvio-padrão do tamanho da perturbação a ser provocada, como uma fração da amplitude de cada variável de decisão. Tolson (2005) recomenda o valor *default* de  $r=0,2$  por resultar em uma região amostral que praticamente abrange a totalidade da amplitude das variáveis de decisão, capacitando o algoritmo a escapar facilmente de zonas no entorno de mínimos locais.

O número máximo de avaliações da função-objetivo é um dado de entrada para o algoritmo DDS e depende, basicamente, do tempo de cálculo da função-objetivo e dos recursos computacionais disponíveis. Deve-se notar, entretanto, que o algoritmo DDS escalona a estratégia de busca de global, nas primeiras iterações, a local, nas iterações finais, independentemente se  $m=100$  ou  $10.000$ . Tal fato otimiza a performance do algoritmo DDS, para um dado valor de  $m$ , o que proporciona ao usuário uma certa idéia de algum valor de  $m$  que seja adequado ao tempo disponível para a otimização. O leitor interessado em detalhes sobre o algoritmo DDS deve remeter-se a Tolson (2005).

É preciso deixar claro, entretanto, que o algoritmo DDS não foi concebido para convergir precisamente para o máximo global. De fato, ele foi concebido para convergir para a região do máximo global, na melhor hipótese, ou para um máximo local satisfatório, na pior hipótese. No contexto do Sistema Rio Grande, as soluções fornecidas pelo algoritmo DDS devem ser verificadas e, se necessário, recomenda-se proceder ao seu refinamento por meio da re-calibração manual de alguns parâmetros do elemento funcional de produção.

### **3.2 – Dados Utilizados**

Os dados hidrológicos e meteorológicos necessários para o desenvolvimento do estudo, particularmente para a aplicação do modelo hidrológico, incluem dados de vazão, precipitação, temperatura do ar, umidade relativa do ar, velocidade do vento, pressão atmosférica e radiação solar. Estes dados foram fornecidos dos bancos de dados da Agência Nacional de Águas – ANA,

da Companhia Energética de Minas Gerais – CEMIG e do Operador Nacional do Sistema - ONS. O período corresponde aos anos de 1980 a 2001. Estes 22 anos de registros serão divididos em um período de calibração (1991 a 2001) e um período de verificação (1980 a 1990). As séries de precipitação da área de estudo totalizam dados de 26 postos de medição, incluindo telemétricas e convencionais. Os dados de vazão incluem dados de vazão observada em postos fluviométricos, dados de vazão defluente de aproveitamentos hidrelétricos e dados de vazões naturais nos aproveitamentos hidrelétricos. As séries de vazão observada correspondem a dados medidos diretamente nos postos fluviométricos e, em alguns casos, apresentam a influência da operação dos reservatórios, já as séries de vazões naturais correspondem a dados que não são medidos diretamente, mas são calculados a partir dos dados observados e das informações sobre a operação de reservatórios e sobre as retiradas de água para usos consuntivos. As séries de vazão natural correspondem aos dados de vazão que seriam observados nos locais dos barramentos, se não existissem os aproveitamentos hidrelétricos e os usos consuntivos.

#### 4- RESULTADOS

Foram utilizados os anos de 1991 a 2001 para calibração e os anos de 1980 a 1990 para a verificação. A relação dos postos fluviométricos utilizados encontra-se na tabela 1 e a sua localização na figura 6. A figura 7 demonstra o *layout* utilizado pelo Sistema Rio Grande para representar a bacia em estudo. A figura 8 mostra as vazões observadas e simuladas no período de calibração e a figura 9 no período de validação. A figura 10 ilustra os hidrogramas observado e simulado para a maior enchente do período de verificação.

Código	Nome do Posto	Rio	Área de drenagem (km <sup>2</sup> )
60680000	Ponte Meia ponte	Rio Meia ponte	11483
60680004	Ponte GO-206	Rio Meia ponte	12256
60715000	Fazenda Boa Vista	Rio dos Bois	4569
60750000	Fazenda Nova do Turvo	Rio Turvo	2436
60790000	Ponte do Rio Verdão	Rio Verde	8651
60805100	Abaixo da Barra do Rio Verde	Rio dos Bois	30491
60845000	Ituiutaba	Rio Tijuco	6383
60855000	Ponte do Prata	Rio da Prata	5266

Tabela 1 – Postos fluviométricos utilizados

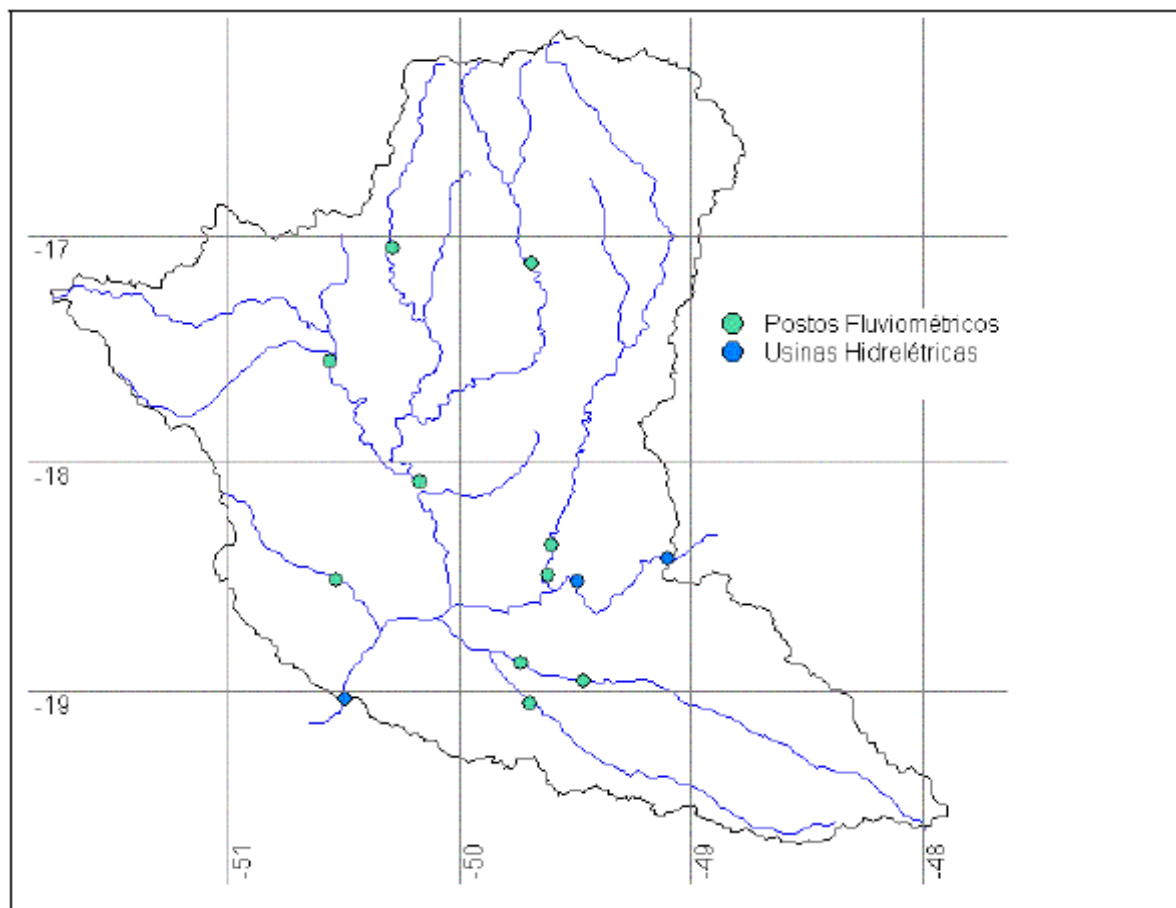


Figura 6 – Localização dos postos fluviométricos

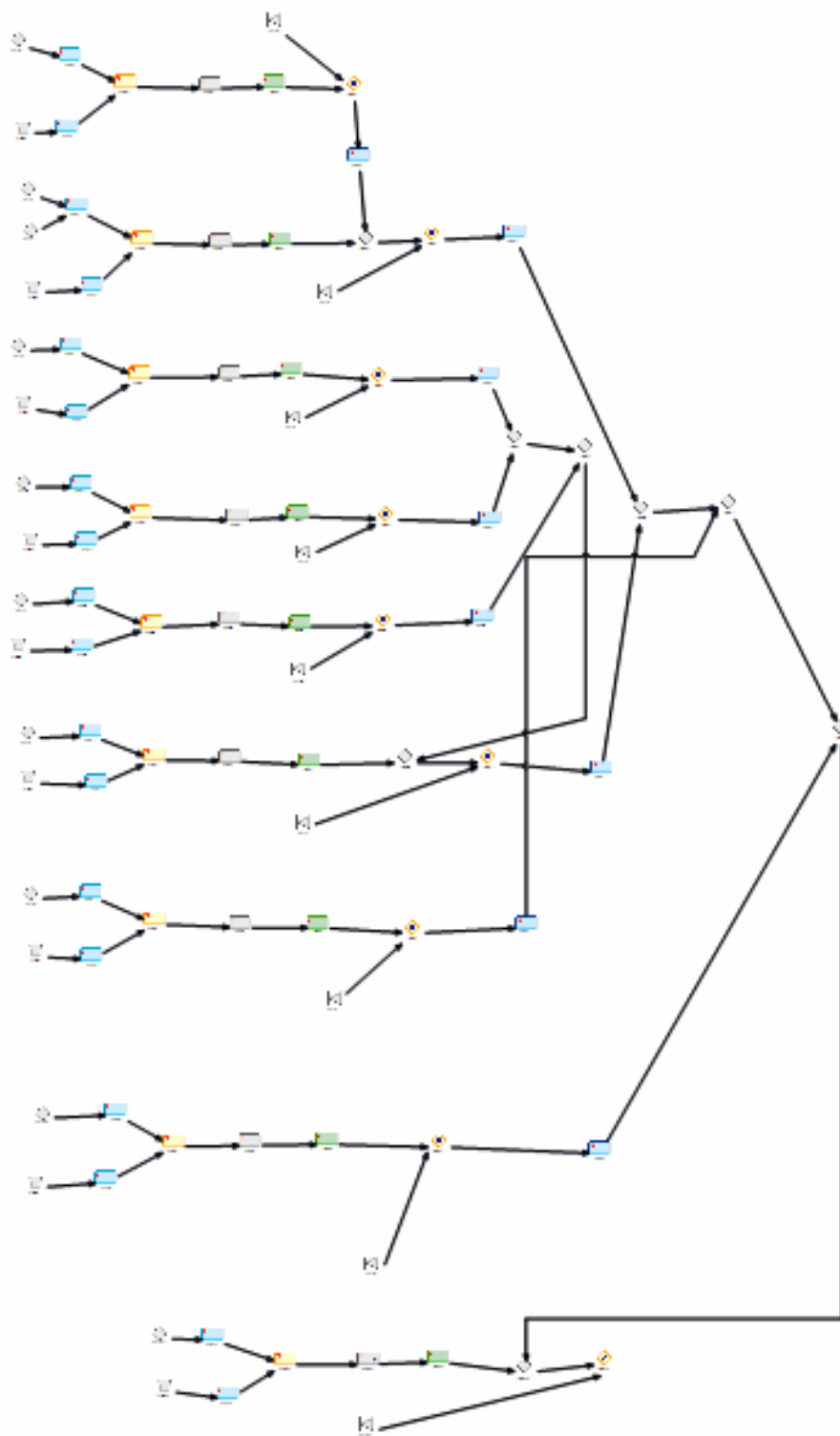


Figura 7 – Layout da bacia incremental entre UHEs Itumbiara e São Simão

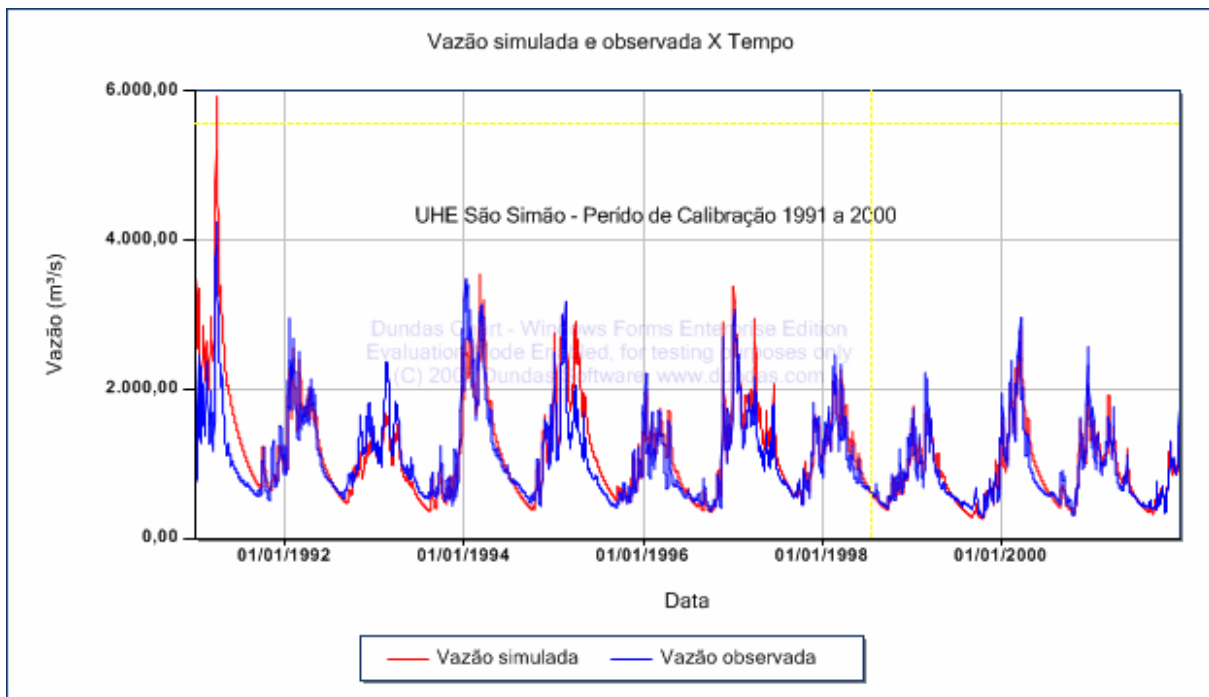


Figura 8 – Vazões observadas x Vazões Simuladas – período calibração

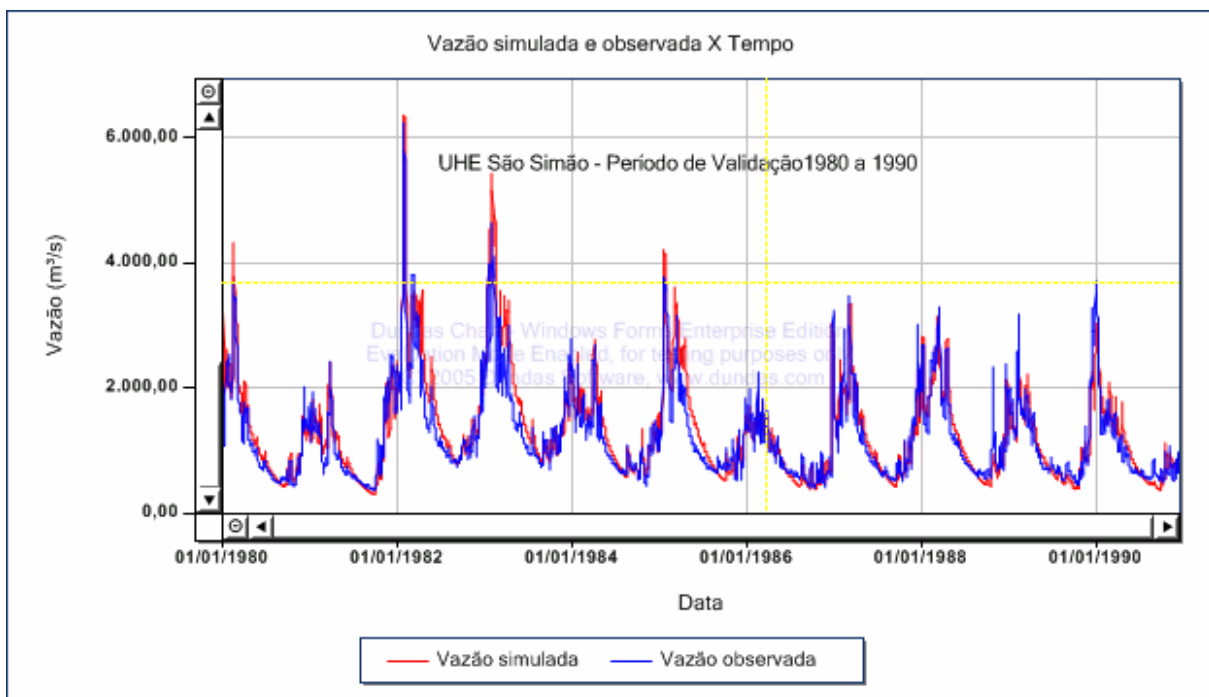


Figura 9 – Vazões observadas x Vazões Simuladas – período validação



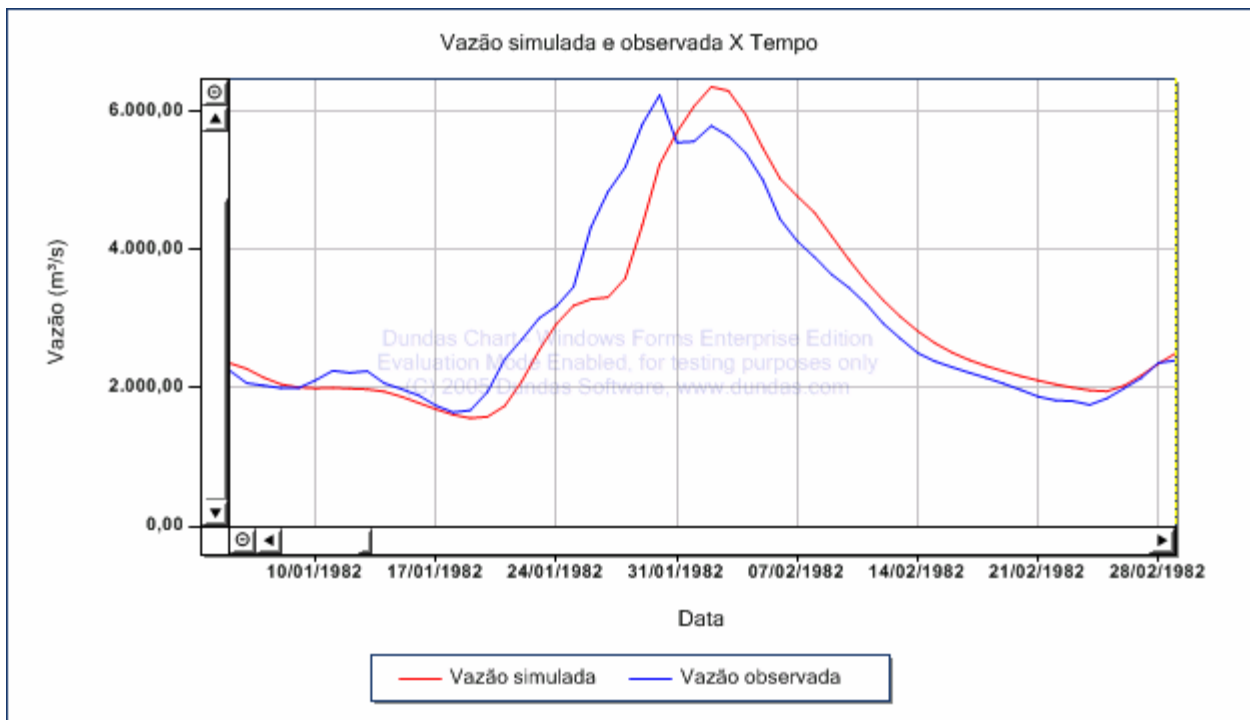


Figura 10 - Hidrogramas observado e simulado para a maior enchente do período de verificação.

As figuras 11 e 12 ilustram a dispersão entre vazões observadas e simuladas.

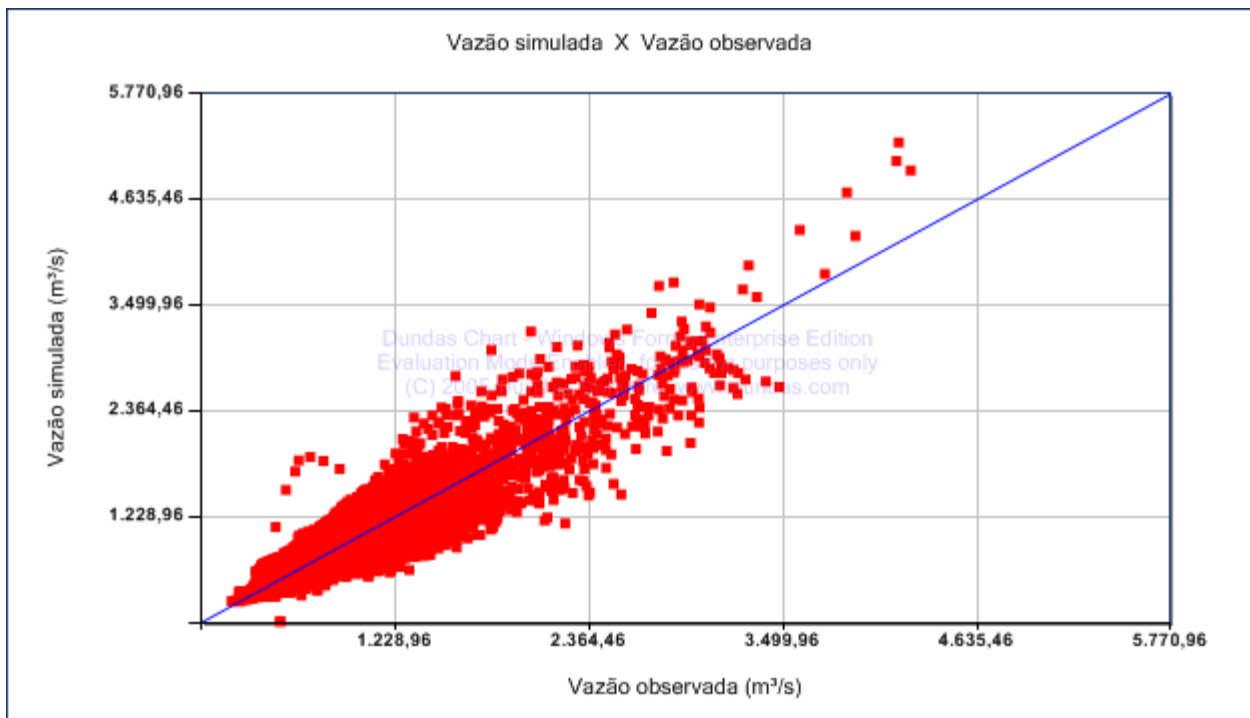


Figura 11 – Dispersão entre vazões observadas e simuladas – Período calibração

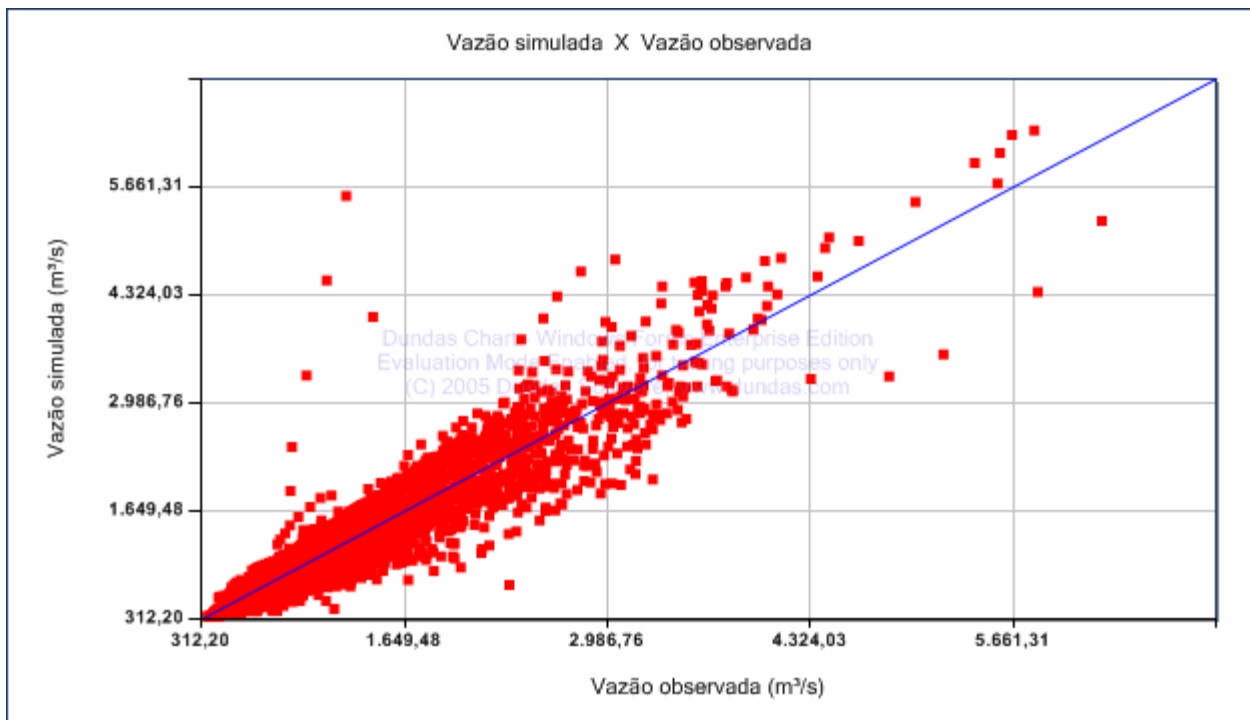


Figura 12 – Dispersão entre vazões observadas e simuladas – Período verificação

#### 4.1 – Testes de desempenho

Foram considerados quatro índices para medir o desempenho do modelo Rio Grande:

MAD – Média dos valores absolutos dos desvios. Traduz o quanto às previsões de vazões se desviam (em m<sup>3</sup>/s) em relação aos valores observados, ou seja, em relação ao seu objetivo (acertar a previsão). A tendência é que esse valor seja mais elevado para locais com maiores vazões e seja menor para locais com menores vazões.

$$MAD = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N |QP_i - QO_i| \quad (1)$$

MAPE – Média dos valores Absolutos Percentuais dos Erros (%). Traduz o quanto às previsões se desviam em valor percentual relativo aos valores observados. Este valor deverá ser muito elevado para locais com vazões pequenas, pois qualquer desvio poderá significar muito e deverá ser menor para locais com vazões maiores, pois, mesmo com grandes variações, estas significarão pouco em relação ao total a ser previsto.

$$MAPE = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N \frac{|QP_i - QO_i|}{QO_i} \quad (2)$$

NASH – Coeficiente de Nash. Traduz a eficiência de realizar previsões mais acertadas nas cheias, ou seja, quando o aproveitamento encontra-se com vazões bastante elevadas. Quanto maior a eficiência, maior o valor do índice, que é limitado em 1.

$$NASH = R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1..N} (QP_i - QO_i)^2}{\sum_{i=1..N} (QO_i - \overline{QO})^2} \quad (3)$$

NASH-LOG – Coeficiente de Nash aplicado aos logaritmos. Traduz a eficiência de realizar previsões na escassez, ou seja, quando o aproveitamento encontra-se com vazões extremamente baixas. Quanto maior a eficiência, maior o valor do índice, que é limitado em 1.

$$NASHLOG = 1 - \frac{\sum_{i=1..N} (\log(QP_i) - \log(QO_i))^2}{\sum_{i=1..N} (\log(QO_i) - \overline{\log(QO)})^2} \quad (4)$$

Os índices de desempenho foram calculados para diferentes intervalos de tempo para o período de calibração (1980 a 1990). Como é necessário um período de aquecimento do modelo, descartou-se o primeiro ano no cálculo dos índices. A tabela 2 apresenta os resultados obtidos.

PERÍODO	MAD	MAPE (%)	NASH	NASHLOG
1981 a 1990	89,1	7,10	0,858	0,859
Estação seca 1981 a 1990	157	15,7	0,774	0,802
Estação úmida 1981 a 1990	235	15,7	0,844	0,837
Ano mais seco - 1981	63,0	8,30	0,920	0,932
Ano mais úmido -1981/1982	304	17,1	0,894	0,793

Tabela 2 – Índices de desempenho

## 4.2 – Conclusão

Os resultados obtidos pelo Sistema Rio Grande foram considerados excelentes. O modelo apresentou um comportamento homogêneo para diferentes períodos e condições hidrológicas. A MAPE foi de apenas 7,1% para todo o período. Levando-se em conta que no cálculo da vazão estimada através de uma curva-chave um erro de 5 % é considerado baixo, o modelo apresentou um erro compatível com a estimativa da vazão através da curva-chave. O gráfico de dispersões, apresentado nas figuras 11 e 12, demonstra o resultado coerente apresentado pelo Sistema Rio Grande, não havendo tendências ou desvios nas vazões simuladas.

Outro ponto de destaque foi o coeficiente de Nash, que apresentou um resultado médio de 0,858, sendo que a diferença entre os picos dos hidrogramas observados e simulados para o maior evento de cheia do período foi de apenas 2,8%. Este resultado é de fundamental importância pois demonstra a capacidade do Sistema Rio Grande em auxiliar na tomada de decisões operativas durante um evento de cheia, minimizando perdas humanas e materiais.

Pensando nas necessidades do setor elétrico, especialmente na CEMIG, onde são realizadas previsões de vazões afluentes para um grande número de usinas hidrelétricas, o Sistema Rio Grande tem-se destacado pela operacionalidade, robustez e confiabilidade.

## 5 - REFERÊNCIAS E BIBLIOGRÁFICAS

HEC – Hydrologic Engineering Center. HEC-1 Flood Hydrograph Package - Reference Manual. U. S. Army Corps of Engineers, Davis, 1981.

Miller J. B., 1997. Floods: people at risk, strategies for prevention. United Nations Department of Humanitarian Affairs, DHA/97/107, pp. 93.

Naghetini, M. C., Nascimento, N. O., Thimotti, T., Lima, A. A. & Silva, F. E. O. Relatório Técnico Parcial 2 - Modelo Rio Grande de Simulação Hidrológica para Previsão de Vazões de Curto Prazo: Formulação Teórica, Departamento de Engenharia Hidráulica e Recursos Hídricos da UFMG, Belo Horizonte, 2002.

Rodda J. C. & H. J. E. Rodda, 2000. Hydrological forecasting, in Dealing with Natural Disasters, IAHS Publication, p. 75-99.

Todini E., 1997. The role of rainfall measurements and forecasts in real-time flood forecasting and management. <http://www.unesco.org/uy/phi/libros/radar/art13.html>.

Thyer, M., Kuczera, G., Bates, B. C. Probabilistic optimization for conceptual rainfall-runoff models: a comparison of the shuffled complex evolution and simulated annealing algorithms. Water Resources Research 35(3), p. 767-773, 1999.

Tolson, B. A. Automatic Calibration, Management and Uncertainty Analysis: Phosphorus Transport in the Cannonsville Watershed. Tese de Doutorado, Faculty of the Graduate School of Cornell University, Ithaca, EUA, 2005.

Wang, Q. J. Using genetic algorithms to optimize model parameters. Environmental Modelling & Software 12(1), p. 27-34, 1997.

Zhao, R. J., Y. L. Zhuang, L. R. Fang, X. R. Liu & Q.S. Zhang, 1980. The Xinanjiang Model, Hydrological Forecasting Proceedings, Oxford Symposium, IAHS 129, pp. 351-356.