

# ANÁLISE DE SENSIBILIDADE, CALIBRAÇÃO E AVALIAÇÃO DAS INCERTEZAS ASSOCIADAS ÀS PREVISÕES FEITAS POR UM MODELO MATEMÁTICO DE SIMULAÇÃO DO TRANSPORTE DE POLUENTES EM BACIAS HIDROGRÁFICAS

Vanusa Maria Feliciano Jacomino

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares - IPEN-CNEN/SP  
Caixa Postal 11049  
05422-970, São Paulo, Brasil

## RESUMO

O modelo conceitual Hydrological Simulation Program-FORTRAN (HSPF) é recomendado pela EPA para a realização de estudos que envolvem a simulação contínua do transporte de poluentes em bacias hidrográficas. O presente trabalho descreve de forma sucinta as suas principais componentes que contribuem para a geração do fluxo hidrológico em uma bacia de pequeno porte e a sua sensibilidade aos parâmetros relacionados aos processos de escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo, bem como à taxa de infiltração do solo e grau de saturação das zonas de armazenamento de água. As incertezas associadas aos valores efetivos destes parâmetros, durante a ocorrência de vários eventos de precipitação pluviométrica, são estimadas por meio da comparação das vazões líquidas observadas e simuladas. O efeito das incertezas destes parâmetros nas previsões finais feitas pelo modelo HSPF é avaliado utilizando-se o código PRISM, o qual se baseia no método de amostragem *Latin Hypercube*.

## I. INTRODUÇÃO E OBJETIVOS

Projetos de estações de tratamento de esgotos, a determinação da influência de obras hidráulicas na qualidade do meio aquático, vazamentos acidentais de resíduos tóxicos, o aumento da temperatura da água decorrente da geração de energia termoelétrica, a previsão de alterações aquáticas causadas pelo uso do solo da bacia hidrográfica contribuinte, e muitos outros exemplos de situações podem ser analisados com modelos matemáticos de simulação da qualidade da água. Tais modelos podem propiciar uma avaliação abrangente dos impactos ambientais gerados pelas atividades citadas anteriormente.

Entretanto, todos os modelos e teorias utilizados para descrever os mecanismos que ocorrem no meio ambiente são apenas uma aproximação da realidade. Estes modelos, sejam eles empíricos ou baseados em conceitos físicos, possuem parâmetros que necessitam ser calibrados para uma determinada situação em particular. Como nenhum modelo é capaz de representar a natureza de forma perfeita, pode-se esperar que sempre existirão fontes de erros que irão contribuir para as diferenças encontradas entre os valores observados e os previstos, sendo necessário portanto, um estudo para avaliação das incertezas associadas às previsões feitas por ele [1]. Essas incertezas são resultados de todos os erros envolvidos nos processos de concepção, estimativa de parâmetros, variabilidade

destes parâmetros e escolha de cenários para os quais as simulações feitas pelo modelo serão utilizadas.

O principal objetivo deste trabalho é o desenvolvimento de uma metodologia unificada, envolvendo diversas técnicas de análise, que em conjunto, permitam uma avaliação criteriosa das incertezas associadas às previsões feitas por um modelo matemático de simulação da qualidade da água. Este estudo foi feito partindo-se do princípio que cada conjunto de parâmetros, obtido após a calibração do modelo, durante a ocorrência de eventos com intervalos de recorrência diferentes, deve ser igualmente aceito como simulador do sistema em estudo. A distribuição resultante de parâmetros irá refletir não apenas as incertezas decorrentes de suas estimativas iniciais, mas também os erros nas previsões finais resultantes de sua variabilidade natural e das medidas experimentais das variáveis "observáveis".

O trabalho iniciou-se com a seleção e estudo de um modelo matemático de simulação da qualidade da água em rios e reservatórios. O modelo selecionado foi o "Hydrological Simulation Program Fortran" (HSPF) [2], o qual é recomendado pela Environmental Protection Agency (EPA) para a solução de problemas que envolvem a simulação contínua do transporte de poluentes na maioria das bacias hidrográficas. O modelo HSPF possui aproximadamente 50 parâmetros de entrada que descrevem basicamente os processos hidrológicos (incluindo

escoamento superficial, subsuperficial e subterrâneo) que irão contribuir para a geração do fluxo de água, dinâmica dos sedimentos (erosão, deposição e transporte das partículas de solo do terreno das encostas e vales e das partículas de sedimentos presentes nos canais) e transporte de contaminantes solúveis e adsorvidos. A quantidade de escoamento superficial que contribui para o aumento da vazão líquida nos rios é estimada levando-se em conta o balanço de água dentro de todo o ciclo hidrológico.

O ajuste dos parâmetros que descrevem a resposta hidrológica foi feito por meio da utilização da técnica de otimização numérica [3], sendo para isso desenvolvido o código de computador HYDRO. Neste caso, o processo de calibração iniciou-se com a estimativa dos valores dos parâmetros considerados mais sensíveis e cuja medida direta em campo não era possível. Uma vez realizada a calibração do modelo HSPF, a análise das incertezas associadas às previsões feitas pelo modelo foi feita utilizando-se o código PRISM, cujo procedimento de amostragem baseia-se no método de Monte Carlo, ou mais especificamente, no sistema de amostragem "Latin Hypercube" [4].

Toda a metodologia desenvolvida no presente trabalho, envolvendo a calibração e análise de incertezas do modelo HSPF, foi aplicada tomando-se como cenário base a bacia de White Oak Creek, localizada em Oak Ridge, Tennessee, EUA, a qual é uma bacia de pequeno porte (área igual a 16 km<sup>2</sup>). Esta escolha foi arbitrária, uma vez que os resultados obtidos poderão ser usados como referência na aplicação de modelos matemáticos que simulem os principais fenômenos que ocorrem em outras bacias hidrográficas. Optou-se pela bacia de White Oak Creek em decorrência apenas da maior disponibilidade dos dados para aplicação da metodologia aqui descrita.

## II. METODOLOGIAS PARA CALIBRAÇÃO DO MODELO HSPF

O ajuste dos parâmetros que descrevem os processos hidrológicos relacionados no modelo HSPF foi feita em três etapas, a saber:

- Estabelecimento do balanço de água em termos anuais
- Ajuste mensal da distribuição de escoamento superficial
- Ajuste da curva hidrográfica para eventos individuais

**Análise de Sensibilidade:** Nesta etapa inicial do trabalho foi feita a análise de sensibilidade daqueles parâmetros cuja estimativa confiável, por meio de medidas experimentais diretas, não era possível. As informações relativas aos demais parâmetros foram obtidas por meio do uso de mapas, dados de campo levantados em bacias hidrográficas com características semelhantes à aquela em análise e de estudos realizados previamente [5]. O índice de sensibilidade para cada variável de saída foi calculado levando-se em conta as diferenças provocadas na resposta do modelo, quando o valor de um dos parâmetros era

alterado, enquanto os valores dos demais eram mantidos constantes.

Os parâmetros que causaram o maior impacto nos resultados finais da vazão líquida no ponto de descarga da bacia foram AGWRC (coeficiente de recessão do fluxo de água subterrânea) e AGWS (conteúdo inicial de água na zona de armazenamento de água subterrânea), ambos os quais descrevem o comportamento do fluxo de água subterrânea. Os parâmetros relacionados ao grau de saturação da zona inferior de armazenamento de água (LZSN e LZS), o conteúdo de água na zona superior de armazenamento (UZSN) e à taxa de infiltração se mostraram menos sensíveis. Em geral, 50% de variação nestes parâmetros implicaram em menos do que 10% de variação na vazão líquida média anual. Para os parâmetros INTFW e IRC, as variações foram menores do que 2%.

**Otimização do Processo de Calibração (o Código HYDRO):** O ajuste dos parâmetros que controlam as vazões líquidas mensal e anual foi feito automaticamente pela técnica de otimização numérica. Neste caso, o código HSPF e as subrotinas de otimização foram combinadas para formar o código HYDRO.

O processo de otimização iniciou-se com a quantificação das diferenças entre os valores observados e os simulados. Uma função objetiva escalar FB, baseada nas discrepâncias entre estes dois valores foi estimada a cada simulação até que o valor desta grandeza fosse minimizado. A função objetiva escalar FB utilizada no presente trabalho pode ser descrita matematicamente pela relação:

$$FB = \sum_{i=1}^n |(X_{oi} - X_{si}) / X_{oi}| \quad (1)$$

sendo:

$X_{oi}$ : a vazão média observada durante o período  $i$ ;

$X_{si}$ : a vazão média simulada durante o período  $i$ ;

$n$ : intervalo de tempo considerado;

As principais subrotinas usadas para direcionar o processo de otimização são:

- **OPTOPT:** Lê os dados de entrada, os quais incluem os valores médio, máximo e mínimo dos parâmetros, o valor do incremento, bem como os valores observados da grandeza de interesse e chama a subrotina SEARCH para inicializar o processo de otimização;
- **SEARCH:** Esta é uma subrotina de otimização de funções não lineares, a qual pesquisa os mínimos locais em uma região multidimensional do espaço, bem como o mínimo global (definido como o melhor dos mínimos locais). Uma vez fornecidos os valores iniciais dos parâmetros, SEARCH irá chamar a subrotina EVAL para a determinação da função objetiva escalar FB, irá avaliar se o seu valor é suficientemente pequeno, e caso não seja, irá buscar um novo conjunto de parâmetros para que seja feita a próxima interação. SEARCH irá chamar HSPF para estimar as vazões líquidas médias

simuladas e comparar esses valores com as vazões observadas.

- **EVAL:** Avalia a função objetiva FB de acordo com a equação (1).

Como mencionado anteriormente, todo o procedimento de calibração pela técnica de otimização numérica foi feito visando a obtenção de um conjunto de parâmetros que resultasse na menor diferença entre os valores das vazões líquidas médias anuais e mensais observadas e simuladas durante o período de 1990 a 1993. Cada ano foi calibrado separadamente, resultando desta forma em quatro conjuntos independentes, cada um com nove parâmetros, cujos valores otimizados foram obtidos após 500 simulações com o código HYDRO.

A Tabela 1 apresenta os valores de controle do processo de otimização juntamente com os valores finais obtidos para cada ano. De uma maneira geral, a simulação da resposta hidrológica com os parâmetros relacionados na Tabela 1 implicou em uma diferença média entre os valores de vazão líquida simulado e observado em torno de 15%, indicando desta forma, a habilidade destes parâmetros em reproduzir os dados observados para cada ano em particular.

**TABELA 1.** Resumo dos valores de controle utilizados para a otimização dos parâmetros que descrevem a resposta hidrológica do modelo hspf, em como dos resultados obtidos para cada ano.

| Parâmetros | Intervalo |      | Valores iniciais | Valores finais dos parâmetros para cada ano de calibração |      |      |      |
|------------|-----------|------|------------------|---|------|------|------|
|            | min       | max  |                  | 1990  | 1991 | 1992 | 1993 |
| LZSN       | 102       | 381  | 292              | 152   | 152  | 214  | 152  |
| INFILT     | 1,0       | 38,1 | 7,6              | 3,4   | 1,9  | 2,5  | 8,7  |
| AGWRC      | 0,90      | 0,99 | 0,98             | 0,97  | 0,99 | 0,98 | 0,90 |
| UZSN       | 5,0       | 51   | 10               | 33  | 20   | 12   | 26   |
| INTFW      | 1,0       | 2,0  | 1,5              | 1,5   | 1,0  | 1,0  | 1,0  |
| IRC        | 0,03      | 0,60 | 0,10             | 0,05  | 0,60 | 0,10 | 0,10 |
| UZS        | 10        | 254  | 34               | 72  | 157  | 30   | 28   |
| LZS        | 25        | 264  | 102              | 134   | 250  | 219  | 244  |
| AGWS       | 25        | 152  | 94               | 118   | 97   | 89   | 25   |

Apesar dos parâmetros obtidos serem capazes de reproduzir os dados experimentais, existem diferenças significativas de um ano para outro. Entretanto, este não é um atributo coerente do modelo HSPF, já que o mesmo foi conceitualizado levando-se em conta os processos físicos que ocorrem em uma bacia hidrográfica e portanto, os parâmetros que descrevem esses na processos são baseados em conceitos físicos. Os anos analisados no presente estudo apresentam condições de precipitação pluviométrica distintas. A obtenção de uma combinação diferente de central e extrapolados para outras porções da bacia hidrográfica.

Os fatores que podem contribuir para os erros associados às simulações feitas pelo HSPF são:

1. Aplicação não adequada do modelo modelagem do sistema em estudo. Esse fator é resultante, principalmente, de uma especificação incorreta das características da bacia hidrográfica analisada.
2. Correlação entre parâmetros que apresentam limiares. O uso desses parâmetros poderá fazer com que a resposta do modelo, em um dado período de simulação, mude de forma abrupta sob diferentes condições de fluxo, ou que o comportamento do modelo seja totalmente diferente em períodos de simulação que apresentam condições hidrológicas distintas. Isto poderá implicar numa condição em que combinações diferentes de parâmetros poderão levar a resultados igualmente válidos.

Um dos objetivos do processo de calibração, seja ela automática ou manual, é obter um conjunto de parâmetros que possua uma capacidade de previsão, ou seja, que esse conjunto possa ser usado em simulações futuras e cujos resultados apresentem uma boa concordância com os valores observados. Portanto, é importante testar se cada conjunto de parâmetros, obtido para um dado ano, possui essa capacidade de previsão. Neste caso, cada combinação de parâmetros otimizados deverá ser aplicada para a simulação dos processos hidrológicos em anos diferentes daquele em que foi feita a sua calibração, processo este conhecido como validação. Dependendo do sucesso obtido, o conjunto de parâmetros poderá ser rejeitado ou aceito como simulador e previsor das grandezas observadas de interesse.

Resultados muito mais satisfatórios foram obtidos ao se examinar a habilidade de cada conjunto de parâmetros otimizados desenvolvido para um ano em particular em simular as observações de outros anos. Neste caso, foi feita a substituição de cada combinação de parâmetros em anos outros que não aquele correspondente à sua calibração. Os resultados desta aproximação são apresentados na Tabela 2, onde são mostradas as médias dos valores absolutos das diferenças percentuais mensais ( $X_{AVE}$ ), o qual foi calculado para N meses de acordo com a relação:

$$X_{AVE} = 1 / N ( \% \text{ diferença } \% \text{ mensal} ) \quad (2)$$

Na Tabela 2, os valores que se encontram na diagonal principal representam a habilidade do conjunto de parâmetros obtidos para um ano em particular, em simular os dados observados para esse ano, enquanto que os valores das diagonais externas representam a aplicabilidade desse conjunto em simular as vazões correspondentes aos demais anos. Estes resultados demonstram que o conjunto otimizado de parâmetros relativo ao ano de 1991, possui uma capacidade de previsão muito melhor que as dos demais anos. Na realidade, os resultados da calibração de alguns anos (por exemplo, 1992) mostram-se muito mais satisfatórios com os parâmetros de 1991, do que com o

conjunto de parâmetros obtido com a sua calibração individual.

**TABELA 2.** Médias dos valores absolutos das diferenças percentuais mensais dos resultados do ano Y2 usando o conjunto de parâmetros obtidos para o ano Y1.

| Y2 \ Y1       | 1990 | 1991 | 1992 | 1993 |
|---------------|------|------|------|------|
| 1990          | 15,6 | 12,4 | 17,8 | 18,7 |
| 1991          | 31,2 | 12,7 | 21,6 | 21,2 |
| 1992          | 19,6 | 7,1  | 14,6 | 9,7  |
| 1993          | 29,8 | 12,1 | 24,2 | 15,3 |
| Média         | 24,1 | 11,1 | 19,6 | 16,2 |
| Desvio Padrão | 7,6  | 2,7  | 4,2  | 5,0  |

A última etapa do processo do ajuste mensal e anual do balanço de água constituiu-se em examinar o efeito do transporte dos valores do conteúdo de água existente nas zonas de armazenamento (UZS, LZS e AGWS), encontrados ao final de um ano de simulação para o início do próximo ano. Os valores iniciais referentes a 1991 foram obtidos por otimização e a partir desses dados foi feito o ajuste para cada um dos outros anos, obtendo-se desta forma, valores simulados de condições iniciais mais realísticos. Neste caso, as diferenças percentuais médias entre os valores mensais observados e simulados foram reduzidas em até 50% em relação àquelas obtidas anteriormente. Esses resultados demonstram que o modelo é capaz de simular o processo de evapotranspiração, bem como a distribuição do conteúdo de água de precipitação pluviométrica entre as zonas de armazenamento superior, inferior e de água subterrânea de forma excelente, já que as diferenças entre os valores observados e os simulados foram da ordem de 10 %.

**Calibração dos Eventos Individuais:** A calibração da curva hidrográfica para eventos individuais foi realizada com os dados de vazão líquida média horária referentes a 9 eventos de precipitação pluviométrica. Neste caso, foi feita a calibração manual, pela técnica de tentativas e erros, ajustando-se apenas aqueles parâmetros (INTFW, IRC e UZSN), cuja variação não iria alterar os balanços de água mensal e anual de cada período em estudo. Inicialmente, foi feito o ajuste do volume total de escoamento superficial de cada evento considerado, e a seguir o ajuste da vazão de pico e do seu instante de ocorrência. Os resultados dos conjuntos de parâmetros que melhor reproduzem os dados observados para cada evento individual são mostrados na Tabela 3. Neste caso, foi verificado que um determinado conjunto de parâmetros não é capaz de reproduzir de forma satisfatória todos os eventos considerados, indicando portanto, a existência de erros associados à simulação dos

processos hidrológicos da bacia em estudo. Os principais fatores que poderiam estar contribuindo para estas discrepâncias são:

*Erro na estrutura do modelo:* Os resultados excelentes obtidos para alguns dos eventos (02/12/91 e 04/12/93) indicam que o modelo tem o potencial de simular os processos hidrológicos que ocorrem na bacia hidrográfica. Apesar deste não ser um número suficiente de dados que comprovem que a estrutura do modelo para simulação dos mecanismos de transporte do fluxo de água é adequada, outras informações demonstraram que esta não é a principal fonte erro que contribui para as diferenças observadas. Ao se analisar os resultados das simulações do volume total de escoamento superficial de todos os eventos individuais referentes a 1991 (Tabela 3) é possível verificar que aqueles obtidos entre 17 e 21/02/91 mostraram-se subestimados. Enquanto que os resultados das simulações do segundo conjunto de eventos ocorridos no mesmo ano (02 a 03/12/91), mostraram-se ora subestimados e ora superestimados. Este mesmo comportamento foi observado nas simulações realizadas durante o ano de 1992. Apesar desses dados não provarem que o modelo está representando de forma adequada a bacia hidrográfica, seria de se esperar um mesmo padrão de comportamento para todos os eventos analisados, caso o modelo não fosse capaz de simular uma ou mais componentes fundamentais do processo de geração de fluxo de água, tais como a infiltração ou evapotranspiração.

*Erros decorrentes do procedimento de calibração e dos dados de entrada:* A robustez do procedimento de calibração foi testada examinando a capacidade de um conjunto de parâmetros obtido para um determinado ano em simular a vazão líquida média diária dos demais. Este exercício demonstrou que o fato de se usar uma combinação diferente de parâmetros não altera o comportamento geral dos resultados. Todos os eventos simulados que apresentaram resultados subestimados continuaram subestimados, bem como os superestimados permaneceram superestimados independentemente dos parâmetros utilizados. Esses resultados demonstram que o procedimento de calibração é robusto o suficiente e que portanto, não poderia ser a maior fonte de erro para a explicação da discrepâncias observadas.

Partindo do princípio de que tanto a estrutura do modelo como o procedimento de calibração tenham o potencial de reproduzir uma resposta hidrológica satisfatória, os resultados obtidos sugerem que a maior fonte de erro na simulação dos processos de geração de fluxo de água que ocorrem na bacia hidrográfica em estudo seriam os dados de entrada utilizados para a calibração do modelo. Neste caso, as distribuições espacial e temporal reais destes dados não estariam sendo representadas de forma adequada ao longo de toda a bacia hidrográfica.

TABELA 3. Melhores resultados da calibração de cada evento em particular.

| Ano                                   | 1991                            |           |                                 |            | 1992                            |           |                                 | 1993                            |                                 |
|---------------------------------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|------------|---------------------------------|-----------|---------------------------------|---------------------------------|---------------------------------|
| Parâmetros                            | UZSN=18<br>INTFW=1,1<br>IRC=0,7 |           | UZSN=18<br>INTFW=1,3<br>IRC=0,7 |            | UZSN=20<br>INTFW=0,8<br>IRC=0,7 |           | UZSN=18<br>INTFW=1,9<br>IRC=0,7 | UZSN=18<br>INTFW=1,0<br>IRC=0,6 | UZSN=18<br>INTFW=1,9<br>IRC=0,7 |
| Data                                  | 17/02                           | 21/02     | 02/121                          | 03/12      | 04/01                           | 18/12     | 22/11                           | 24/03                           | 04/12                           |
| <b>Volume (m<sup>3</sup>)</b>         |                                 |           |                                 |            |                                 |           |                                 |                                 |                                 |
| Simulado                              | 1462                            | 2708      | 1506                            | 997        | 645                             | 2708      | 356                             | 1368                            | 2708                            |
| Observado                             | 2347                            | 3496      | 1500                            | 856        | 739                             | 3496      | 320                             | 1491                            | 2221                            |
| % de diferença                        | -3                              | -46       | -9                              | 17         | -13                             | -46       | 11                              | -8                              | -6                              |
| <b>Vazão de pico (m<sup>3</sup>s)</b> |                                 |           |                                 |            |                                 |           |                                 |                                 |                                 |
| Simulada                              | 79                              | 94        | 163                             | 58         | 33                              | 94        | 114                             | 114                             | 169                             |
| Observada                             | 148                             | 78        | 133                             | 64         | 40                              | 78        | 119                             | 119                             | 167                             |
| % de diferença                        | -46                             | 21        | 23                              | -10        | -23                             | 21        | -5                              | -5                              | 1                               |
| <b>Instante de ocorrência</b>         | excelente                       | excelente | excelente                       | 1 h + cedo | excelente                       | excelente | 1 h + cedo                      | excelente                       | excelente                       |

### III. ANÁLISE DE INCERTEZAS

A análise de incertezas realizada no presente estudo foi feita com a utilização de uma versão modificada do código PRISM [4], na qual foi feita implementação de técnicas computacionais que tornam possível a adaptação dos procedimentos estatísticos para aplicação a qualquer modelo matemático. O código é rodado em três fases. Na primeira fase, os valores relativos às distribuições de probabilidades associadas aos diversos parâmetros são manipuladas pelo módulo PRISM1, que gera uma matriz de valores de parâmetros a serem usados nos módulos subsequentes. Para cada parâmetro a ser avaliado devem ser fornecidas informações sobre o tipo de distribuição, valor médio, mínimo e máximo e desvio padrão. O segundo módulo consiste no próprio modelo a ser analisado, modificado para rodar em "loop" pelo número de vezes estabelecido para a simulação, utilizando como parâmetros os diferentes conjuntos gerados pelo primeiro módulo. No final, o segundo módulo gera uma matriz de resultados do modelo. O terceiro módulo, efetua então a análise estatística sobre as entradas e saídas do modelo, fornecendo as correlações entre os valores dos parâmetros e as respostas do modelo.

No presente trabalho, a avaliação das incertezas associadas às previsões relativas à vazão líquida foi feita para dois cenários diferentes (eventos com intervalo de recorrência variando de 1 a 2 anos e de 5 a 10 anos), sendo que em cada caso foram efetuadas 500 simulações de forma a se trabalhar com um erro aceitável nas estimativas estatísticas. Os dados de entrada utilizados na análise de incerteza, incluindo os valores médios, mínimo e máximo de cada parâmetro, tipo de distribuição de probabilidade e desvio padrão, são apresentados na Tabela 4.

TABELA 4. Dados de entrada utilizados na análise de incerteza.

| Parâmetros | Distribuição | Média | Desvio Padrão | Min   | Max   |
|------------|--------------|-------|---------------|-------|-------|
| LZSN       | triangular   | 165   | 35,8          | 152   | 216   |
| INFILt     | triangular   | 2,5   | 0,8           | 2,0   | 3,3   |
| AGWRC      | lognormal    | 0,99  | 0,010         | 0,966 | 0,995 |
| UZSN       | triangular   | 18,5  | 0,8           | 18,0  | 48,3  |
| INTFW      | triangular   | 1,2   | 0,50          | 0,80  | 1,9   |
| IRC        | triangular   | 0,69  | 0,038         | 0,60  | 0,80  |

Os resultados finais das incertezas associadas à estimativa da vazão líquida para o evento ocorrido em 04/12/93 (intervalo de recorrência variando de 5 a 10 anos) é mostrado na Figura 1. Como pode ser observado, a incerteza maior nas previsões feitas pelo modelo HSPF ocorre por volta da região do pico. O mesmo comportamento foi observado para o evento com intervalo de recorrência variando de 1 a 2 anos. Durante o início da ocorrência do evento, os parâmetros que mais contribuem para os erros associados à previsão da vazão líquida foram aqueles que descrevem os fluxos de água subterrânea (AGWRC) e subsuperficial (INTFW e IRC). Durante a ocorrência do pico e no período final de ocorrência do evento, os parâmetros que descrevem o grau de saturação da zona superior de armazenamento de água (LZSN) e a taxa de infiltração no solo também passam a contribuir significativamente para estas incertezas.

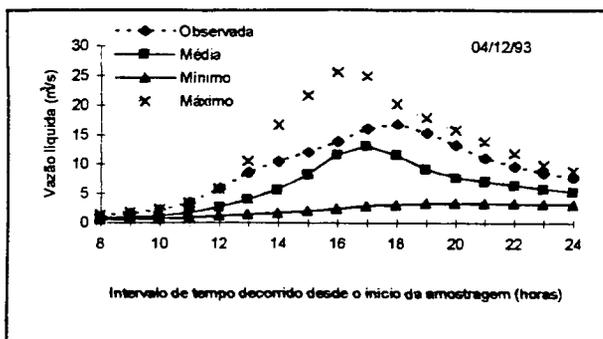


Figura 1. Incerteza associada à previsão da vazão líquida (valores mínimos e máximos correspondem a um nível de confiança de 5 e 95%, respectivamente).

#### IV. CONCLUSÕES

As principais conclusões obtidas após os estudos realizados no presente trabalho são:

- A combinação dos resultados obtidos por meio da análise de sensibilidade com aqueles encontrados após a calibração do modelo, por meio do uso da técnica de otimização numérica, permitiu o desenvolvimento de um conjunto de parâmetros capaz de prever os balanços anual e mensal de água de forma satisfatória.
- A técnica de otimização numérica, por si só, não é uma ferramenta suficiente para a obtenção de um conjunto de parâmetros considerado "ótimo". Isto pode ser explicado levando-se em conta o fato de que a função objetiva escalar pode apresentar diferentes pontos de mínimo, principalmente num espaço multidimensional de parâmetros intercorrelacionados. Neste caso, um esforço adicional deve ser feito no sentido de obter um conjunto de parâmetros com capacidade de previsão, o que pode ser feito por meio do processo de validação do modelo.
- Durante todo o processo de calibração foi observado que as condições iniciais podem adquirir uma importância extremamente exagerada, uma vez que elas não podem ser estimadas facilmente. Portanto, antes que as previsões feitas pelo modelo possam ser consideradas ou que o seu desempenho possa ser avaliado, um período de equilíbrio deverá ser atingido.
- Apesar do modelo HSPF ser um modelo geral, onde os processos são descritos a partir de conceitos físicos, o uso de um grande número de parâmetros de entrada que apresentam limiares, assim como o fato de muitos deles serem intercorrelacionados, torna impossível a obtenção de um conjunto de parâmetros capaz de simular de forma satisfatória todos os eventos individuais considerados.
- Erros consideráveis podem ser introduzidos durante o processo de análise de incertezas se a seleção do intervalo de variação dos parâmetros for feita com base em dados regionais diferentes daquele do local de estudo.

- A seleção do intervalo de variação dos parâmetros deve ser feita levando-se em conta o fato que existe a possibilidade de um dado conjunto de parâmetros representar mais realisticamente o comportamento dos processos que ocorrem no sistema em estudo. Se esta consideração não for feita, a propagação das incertezas dos parâmetros de entrada nos resultados finais, poderá levar à situações em que os valores das variáveis "observáveis" irão se mover para fora dos limites de incerteza dos valores previstos.
- A seleção da função de distribuição de probabilidades dos parâmetros não é um processo trivial. Inicialmente, deve ser feito um levantamento dos dados disponíveis e uma avaliação no sentido de verificar se estas informações são suficientes para a seleção e parametrização da função de distribuição de probabilidades.

#### REFERÊNCIAS

- [1] Beven, K. **Prophecy, reality and uncertainty in distributed hydrological modeling.** *Advances in Water Resources*, 16: 41-51, 1995.
- [2] Donigan, A. S., Imhoff, J. C., Bicknell, B. R. E Kittle, J. L. **Application guide for Hydrological Simulation Program-Fortran (HSPF).** U.S. Environmental Protection Agency, Athens, 1984.
- [3] Duan, Q., Sorooshian, S. E Gupta, K. **Effective and efficient global optimization for conceptual rainfall-runoff models.** *Water Resources Research*, 28: 1015-31, 1993.
- [4] Gardner, R.H.; Røjder, B. E Bergström, U. **PRISM: A systematic method for determining the effect of parameter uncertainties on model predictions.** *Studsvik Report NW-83/555*, Sweden, 1992.
- [5] Clapp, R. B., Watts, J.A. E Guth, M. S. **Third annual environmental restoration monitoring and assessment report for FY 1994 of the Oak Ridge National Laboratory, Oak Ridge, Tennessee.** DOE/OR/01-1290&D1, ORNL/ER-250, 1994.

#### ABSTRACT

The quasi-physically based model HSPF is briefly described and its sensitivity to the parameters of surface, subsurface and groundwater flow components and to the soil moisture content is examined for a small catchment. Uncertainty in the effective values of these parameters is assessed by comparing observed and predicted discharges for a number of storms. The effect of uncertainty in effective parameter values on predicted discharges is evaluated using the *Latin Hypercube* sampling method.