

## Modelagem e Simulação no Âmbito da Hidrologia

Vassiliki Terezinha Galvão Boulomytis, Divisão de Sensoriamento Remoto - Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais – INPE, Prof. Msc. IFSP – Campus Caraguatatuba, likitgb@dsr.inpe.br

### RESUMO

A modelagem hidrológica pode ser considerada como um conjunto de ferramentas destinadas ao cálculo e à representação de dados que possibilita a previsão de eventos, a realização de projetos, o gerenciamento dos recursos hídricos, além de outros tipos de aplicação. No entanto, devido à variabilidade na ocorrência dos processos hidrológicos, escassez e dificuldade na obtenção de dados levantados em campo, os modelos conceituais vêm sendo combinados com os físicos e empíricos, utilizando-se de novas técnicas, entre elas, o sensoriamento remoto e o geoprocessamento para a coleta, processamento, análise e geração de resultados. Neste trabalho será apresentada a base conceitual e a importância do conhecimento do tipo de ferramenta que se deseja utilizar para a implementação ou uso de um modelo hidrológico, para que deste modo seja possível verificar a possibilidade do mesmo ser de fato desenvolvido.

**Palavras-Chave:** Modelo hidrológico; ferramentas e aplicações; disponibilidade de dados.

### Modeling and Simulating Regarding the Aspect of Hydrology

### ABSTRACT

Hydrological modeling might be considered as a set of tools applied for calculating and representing the data that make possible the event preview, design implantation, water management, beside other kinds of application. However, due to the variability of hydrological processes occurrence, lack and difficulties of obtaining data *in situ*, conceptual models have been combined with physical and empirical ones, by the use of new techniques, among other, remote sensing and geoprocessing for the collection, processing, analysis and generation of results. In this paper it will be presented the conceptual basis and the importance of knowing the kind of tool to be used for the use or implantation of a hydrological model, so that it becomes possible to verify whether it is possible to be developed.

**Key Words:** Hydrological model; tools and applications; available data.

### CONCEITOS BÁSICOS

O modelo pode ser entendido como a representação de um fenômeno real ou imaginário, através de um meio. Os meios matemáticos e computacionais vêm sendo muito empregados devido à possibilidade de serem utilizados para o estudo do comportamento de sistemas complexos no processo de modelagem.

As propriedades de um modelo matemático são expressas através de equações matemáticas e de suas relações. Em um modelo computacional, os modelos matemáticos são manifestados através de um modelo lógico, em que ocorre a utilização do sistema binário e da lógica de Boole.

Na modelagem são estabelecidas hipóteses sobre o comportamento de um sistema a fim de possibilitar o entendimento de suas propriedades e a previsão das suas relações a estímulos,

através de simulações. A simulação computacional é a ferramenta que possibilita a realização de um modelo da situação real a fim de verificar as hipóteses para a ocorrência de diferentes e futuros eventos. (EVORA; GIORGETTI, 1997).

O fenômeno é um evento ou processo físico capaz de alterar o estado do sistema. No modelo são utilizados parâmetros e variáveis, que são valores passivos de variação ao longo do tempo e do espaço. Os parâmetros caracterizam o sistema, enquanto que as variáveis descrevem quantitativamente o fenômeno (TUCCI, 2005).

O processo da simulação é constituído pelas fases de estimativa (ou ajuste), verificação e previsão. Os parâmetros são determinados durante a estimativa, e na verificação é feita a validação do ajuste implementado. Na etapa de previsão ocorre a simulação com os parâmetros devidamente ajustados para a quantificação da resposta com diferentes entradas (TUCCI, 2005).

Tucci (2005) afirma que a disponibilidade de dados históricos, as medições de amostras e a determinação das características físicas do sistema contribuem para a estimativa dos parâmetros, que pode ser feita de acordo com os seguintes métodos: estimativa sem dados históricos, ajuste por tentativas, ajuste por otimização e amostragem. A estimativa sem dados históricos é baseada nas características do sistema, quando não há dados disponíveis sobre as suas variáveis. O ajuste por tentativas é o processo em que há variáveis de entrada e saída, e através das tentativas são obtidos os parâmetros com maior representatividade dos valores observados. No ajuste por otimização, são utilizados os métodos matemáticos para a otimização da função, com a diferença entre os valores observados e os calculados pelo modelo, enquanto que, na estimativa por amostragem, os parâmetros são obtidos através de medições específicas no sistema.

A qualidade dos resultados obtidos depende da discretização do sistema, das condições de contorno e da não-tendenciosidade dos parâmetros estimados e verificados. Para isso, na etapa da verificação, os dados de saída são utilizados para avaliar a adequação do sistema modelado. Deste modo, a análise dos resultados deve ser minuciosa, pois se a validação do modelo não é coerente, os resultados serão interpretados de modo equivocado (EVORA; GIORGETTI, 1997; TUCCI, 2005).

## CLASSIFICAÇÃO GERAL

O desenvolvimento de um modelo depende da análise das propriedades que definem o comportamento do fenômeno a ser estudado. De acordo as classificações abordadas por Trivelato (2003) e Rennó (2004), um modelo pode ser: linear ou não-linear; concentrado ou distribuído; invariante (ou estacionário) ou variante (ou não-estacionário) no tempo; estático ou dinâmico; empírico, conceitual ou físico; determinístico ou não-determinístico; e, contínuo ou amostrado no tempo.

No sistema linear há uma relação causal entre os dados de entrada e os de saída, no qual as medidas das relações lineares através de coeficientes de correlação são suficientes. No entanto, quando as relações são não-lineares é importante escolher as variáveis que façam tal consideração para a definição dos estados associados a fim de que haja eficiência no resultado do modelo (LUNA et al., 2006).

O modelo pode ser considerado concentrado (ou pontual) se as variáveis do sistema são homogêneas na escala espacial. Neste modelo, as variáveis de entrada e saída são representativas em toda a área de estudo e grandes áreas possuem um comportamento homogêneo. No caso de modelos distribuídos, é considerada a topologia de um ponto em relação aos seus vizinhos e a sua área de entorno passa a ser representada de forma

homogênea. Deste modo, passa a existir a distribuição de pequenas áreas com comportamentos homogêneos, tomando-se por base a consideração de uma ou mais variáveis, isoladamente para cada região (PEREIRA, 2009).

Os sistemas em que ocorrem, ou não, modificações das características estatísticas ao longo do tempo são definidas como invariantes (ou estacionários) ou variantes (ou não-estacionário), respectivamente (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

No modelo estático, o resultado é acionado pelo tempo e gerado diretamente a partir dos dados de entrada, e no dinâmico, o modelo é acionado por eventos, a partir de uma ou mais iterações (TRIVELATO, 2003; RENNÓ, 2004).

Nos casos em que as variáveis podem ser obtidas a partir de observações com condições específicas às estimadas para o estudo, o modelo é classificado como empírico. No entanto, quando os modelos se baseiam em processos, eles podem ser conceituais ou físicos. Para a representação do sistema, os modelos conceituais utilizam equações empíricas com base nas leis da física, e os modelos físicos, equações diferenciais, com parâmetros que podem ser obtidos a partir de medidas reais (RENNÓ, 2004).

Nos processos determinísticos, as variações espaço-temporais podem ser explicadas através de relações funcionais ou experimentais unívocas de um número limitado de variáveis. Todavia, em modelos não-determinísticos, não há relações funcionais e unívocas entre as variáveis, devido à existência de componentes aleatórios que prevalecem sobre as realidades explicáveis (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Os modelos não-determinísticos podem ser probabilísticos ou estocásticos. Nos modelos probabilísticos, as variáveis possuem um comportamento puramente aleatório, sem seqüência temporal ou espacial de

variação. Por outro lado, nos modelos estocásticos, além da componente aleatória, há uma componente que permite contemplar a seqüência temporal ou espacial de suas variáveis (QUINTELA; PORTELA, 2002).

Por fim, o sistema também pode ser classificado como contínuo para os casos em que ocorrem mudanças das variáveis ao longo do tempo continuamente, e como amostrado, quando as mudanças são de modo intermitente.

## MODELAGEM HIDROLÓGICA

Na hidrologia são estudados os fenômenos que determinam a distribuição espaço-temporal da água no planeta. Os fenômenos hidrológicos variam a sua quantidade e qualidade em função do tempo, do espaço e da escala de estudo, de forma regular e irregular.

Os modelos hidrológicos se tornaram ferramentas muito utilizadas para o entendimento de como os impactos ambientais interferem no comportamento de cada componente do ciclo da água, principalmente em decorrência das mudanças de uso e cobertura da terra.

Segundo Rennó (2004), o modelo hidrológico é a simplificação da realidade através da representação matemática e/ou computacional do fluxo da água e seus constituintes sobre alguma parte da superfície e/ou sub-superfície terrestre.

Há diversos critérios que regem a classificação para os modelos hidrológicos entre os quais estão as indicadas por Singh (1995) e Tucci (2005): descrição do processo, escala espaço-temporal, tipo de uso da terra e aplicação do modelo.

No que se refere à descrição do processo, os modelos podem ser concentrados ou distribuídos, e determinísticos ou não determinísticos. Os modelos concentrados não consideram a variabilidade espacial, os dados de entrada, as condições de vizinhança dos

processos, ou as características geométricas da bacia. Alguns de seus processos são descritos pelo uso de equações diferenciais baseadas em leis de hidráulica simplificadas ou pelo uso de equações algébricas empíricas.

Conforme o descrito por Naghettini e Pinto (2007), nos modelos hidrológicos os processos estudados são, em sua maioria, estocásticos, pois possuem componentes aleatórias que superam as resultantes de fenômenos regulares. Neste caso, as relações de causa-efeito não podem ser explicadas ou determinadas sem uma limitação técnica para o seu conhecimento. Certamente o grau de aleatoriedade será reduzido devido ao contínuo desenvolvimento tecnológico e científico, mas os processos hidrológicos jamais serão puramente determinísticos. Assim, torna-se cada vez mais importante a utilização de abordagens mistas, determinísticas e estocásticas ou probabilísticas.

A escala temporal depende do que se pretende estudar no modelo. Quando é baseada em tempo contínuo, a entrada de dados ocorre diária, mensal ou anualmente, em função da capacidade computacional de carregamento do modelo. Se os dados de entrada são adquiridos em pequenos períodos, o modelo é de intervalos curtos, que ocorrem a cada hora ou até menos tempo. O modelo também pode ser baseado na ocorrência de eventos isolados, que representam fenômenos menos frequentes (SINGH, 1995).

Em relação à escala espacial, a variação depende do porte da bacia a ser estudada. Para Singh (1995) a bacia é pequena quando possuir uma área de extensão menor que  $100\text{km}^2$ , média para uma área entre  $100\text{km}^2$  e  $1000\text{km}^2$ , e grande para uma área maior que  $1000\text{km}^2$ . Entretanto, para o autor essa classificação é arbitrária e varia em função da disponibilidade de dados e da homogeneidade da área de estudo, que é definida estatisticamente através da verificação do comportamento de suas variáveis e parâmetros. Se

as características do sistema não mudam, a bacia pode ser considerada pequena, e havendo pequena característica de heterogeneidade em uma grande área, pode vir a ser classificada como média. As grandes bacias tendem a ser menos sensíveis a chuvas intensas de curta-duração e a influências do uso e cobertura da terra na área de entorno. No entanto, as bacias de pequeno porte possuem maior influência do tipo de uso da terra, do escoamento superficial das áreas de contribuição e das chuvas intensas de curta-duração. O importante é considerar que, ocorre influência do tipo de uso e cobertura da terra em qualquer que seja a bacia, e que, mesmo havendo homogeneidade no comportamento de uma variável, pode haver heterogeneidade no de outra, fazendo com que raramente uma bacia possa ser considerada como de pequeno porte em relação a este conceito. De acordo com Klemes (1983), a combinação entre os fatores empíricos e os conhecimentos tecnológicos disponíveis contribui para a determinação da escala de utilização do modelo.

Para Singh (1995) a classificação da bacia pode variar em função do tipo de uso da terra e pode ser relacionada à hidrologia urbana, agrícola, de florestas, de desertos, montanhosa, pantanosa, litorânea e mista. Entretanto, para Tucci (2005) essa classificação é decorrente do tipo de atividade e da área em que será aplicado o modelo. Isso se deve ao fato da estrutura do modelo estar em concordância com o tipo de uso da terra na bacia estudada, pelo fato da condutividade hidráulica e do tipo de solo serem algumas das características mais importantes na modelagem hidrológica (RENNÓ, 2004).

## APLICAÇÕES

Os modelos hidrológicos podem ser empregados para o gerenciamento dos recursos hídricos. Tucci (2005) afirma que é importante utilizar as metodologias que quanti-

fiquem os processos adequadamente de modo a subsidiar a tomada de decisões. Deste modo, o tipo de gerenciamento empregado pode ser referente a modelos de: comportamento, otimização e planejamento. Nos modelos de comportamento ocorrem as simulações para diferentes características de entrada, sujeitas a mudanças no decorrer dos processos. Nos modelos de otimização procuram-se as melhores alternativas para o dimensionamento ou para o projeto de sistemas, e nos de planejamento, são feitas simulações a fim de buscar alternativas para possíveis ocorrências do sistema como um todo, englobando também soluções para questões no ambiente sócio-econômico e ambiental. Assim, os modelos de comportamento e otimização podem ser utilizados para a implantação de modelos de planejamento.

Para Singh (1995) as finalidades de uso dos modelos hidrológicos são de planejamento e gerenciamento, nos quais são utilizados modelos de previsão a fim de propiciar respostas estratégicas para a análise das estratégias gerenciais do sistema.

### **CALIBRAÇÃO, ANÁLISE DE SENSIBILIDADE E VALIDAÇÃO DO MODELO**

Após e durante o desenvolvimento do modelo torna-se necessária a calibração, verificação e análise da sensibilidade dos dados obtidos. De acordo com Singh (1995), a calibração consiste na estimação de um parâmetro ótimo ou de referência sujeito a um critério específico de erro. Os dados disponíveis são divididos em duas partes, sendo uma para a calibração e outra para a validação. Diversas técnicas podem ser utilizadas para a estimativa dos parâmetros e por isso, a análise de erro dos resultados de calibração deve ser realizada.

Segundo Sorooshian e Gupta (1995), no processo de calibração existem dois tipos de processos, o da especificação e o da es-

timização. Na especificação são analisadas as propriedades e o tipo de comportamento dos processos para, inicialmente, especificar os valores mínimos e máximos possíveis para o parâmetro do modelo. Em seguida os valores são ajustados para a calibração do modelo por métodos automáticos ou manuais.

Peters et al. (1996) relatam que há diversos fatores podem influenciar na precisão e na confiabilidade dos resultados, como: complexidade e variabilidade dos sistemas físicos e processos hidrológicos; método de análise utilizado; deduções sobre o que ocorrerá no futuro e sobre as condições em que se encontrarão os sistemas físicos; tamanho e qualidade das amostras utilizadas para representar os sistemas físicos e os processos hidrológicos; erros de processamento e interpretação dos dados; limitações dos procedimentos analíticos do modelo; e, por fim, erros na aplicação e interpretação dos resultados obtidos a partir dos procedimentos analíticos. Deste modo, indagações relacionadas a cada um desses itens devem ser feitas para avaliar a magnitude dos prováveis erros gerados nos resultados, para em seguida ser feita a sua validação.

A sensibilidade pode ser definida como a taxa de variação de um elemento em relação a outro. O elemento pode ser uma variável, um coeficiente ou um critério usado para mensurar a confiabilidade do modelo. Através da sensibilidade pode-se mensurar tanto o efeito de um elemento sobre o outro quanto a sua importância em relação a algum critério utilizado na modelagem (PETERS et al., 1996). A análise de sensibilidade é uma ferramenta importante para a verificação da confiabilidade que se pode ter em um modelo (SINGH, 1995; PETERS et al., 1996). Collischonn (2001) afirma em seu estudo que para a validação de um modelo hidrológico é importante realizar a análise de sensibilidade e que, conhecendo-se a influência dos parâmetros nos resultados

auxilia no processo de calibração do modelo para as suas próximas aplicações. Portanto, através da validação e da análise de sensibilidade é que se pode verificar a qualidade final alcançada pelo modelo.

## CONCLUSÕES GERAIS

Pode-se concluir que para o desenvolvimento de modelos hidrológicos é importante que primeiramente seja analisada a disponibilidade de dados existentes, o tipo de aplicação do modelo, as técnicas e ferramentas que viabilizam a modelagem e resultados esperados.

Atualmente vêm sendo introduzidas as técnicas de sensoriamento remoto e geoprocessamento, visto que, apesar das imprecisões que muitas vezes estão embutidas nas estimativas das variáveis, o procedimento tem se tornado cada vez mais viável e eficiente quando comparado com alguns tipos de medições *in loco*. Além disso, vários métodos conceituais são de difícil resolução matemática e compreensão analítica, dificultando a sua utilização e obtendo dados de difícil interpretação.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- COLLISCHONN, W. **Simulação hidrológica de grandes bacias**. 2001. 270p. Tese (Doutorado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Instituto de Pesquisas Hidráulicas.
- EVORA, J. E. M.; GIORGETTI, M. F. Simulação de processos de engenharia sanitária e Ambiental utilizando o programa SAAM for windows. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 19, 1997, Fóz do Iguaçu. **Anais...** Fóz do Iguaçu: ABES, 1997. p. 1949-1958.
- KLEMES, V. Conceptualization and scale in hydrology. **Journal of Hydrology**, v.65, n.01, p.01-23, 1983.
- LUNA, I.; BALLINI, R. SOARES, S. Técnica de identificação de modelos lineares e Não-lineares de séries temporais. **Revista Controle & Automação**, v.17, n.03, p.245-256, 2006.
- NAGHETTINI, M; PINTO, E. J. de A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CPRM – Serviço Geológico do Brasil, 2007, 552p..
- PEREIRA, L. M. **Modelagem hidrológica dinâmica distribuída para estimativa do escoamento Superficial em uma micro-bacia urbana**. 2009. 158 p. (INPE- 15679-TDI/1453). Dissertação (Mestrado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.
- PETERS, J. C.; ANDERSON, S.; ATCHISON, P.; FORD, D.; HON, K.; McCUEN, R. H. Hydrologic Study Formulation and Assessment. In: HEGGEN, R.J.; **Hydrology handbook**. New York: ASCE, 1996, Cap. 11, p.721-763.
- QUINTELA, A. de C.; PORTELA, M. M. A modelação hidrológica em Portugal nos últimos 25 anos do século XX, nas perspectivas determinística, probabilística e estocástica. **Revista Brasileira de Recursos Hídricos**. v.07, n.04, p. 51-64, 2002.
- RENNÓ, C. D. **Construção de um sistema de análise e simulação hidrológica: aplicação a bacias hidrográficas**. 2003. 158 p. (INPE-10437-TDI/925). Tese (Doutorado em Sensoriamento Remoto) – Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais.

SOROOSHIAN, S.; GUPTA, V. K. Model calibration. In: SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications.,1995, p.23-68.

SINGH, V. P. **Computer models of watershed hydrology**. Highlands Ranch: Water Resources Publications.,1995. 1130p..

TRIVELATO, G. da C. **Técnicas de modelagem e simulação de sistemas dinâmicos**. São José dos Campos: Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, 2003. 19p. (Nota Técnica, INPE-9665-NTC/358).

TUCCI, C.E.M. **Modelos hidrológicos**. 2ª ed. Porto Alegre: UFRGS, 2005. 678p..