

MODCEL – MODELO INTEGRADO PARA GERENCIAMENTO DE BACIAS HIDROGRÁFICAS

Flávio C. B. Mascarenhas¹; Marcelo G. Miguez¹ & Luiz P. C. Magalhães²

RESUMO --- A avaliação do comportamento de uma bacia hidrográfica é uma questão complexa, constituindo uma importante ferramenta para o gerenciamento dos recursos hídricos. O objetivo deste artigo é apresentar as bases teóricas do MODCEL, um programa integrado para simulação de bacias composto por três diferentes modelos que realizam simulações hidrodinâmica, hidrológica e de qualidade da água, bem como permite representar a captação de água por usuários, o lançamento de efluentes e a operação de estruturas hidráulicas. O principal módulo do MODCEL é baseado em um modelo hidrodinâmico de células. Este modelo hidrodinâmico representa a bacia por uma rede de células para gerar uma rede de fluxo em “loop” e simular padrões de escoamentos. O modelo hidrológico executa a simulação chuva-vazão e funciona como um modelo concentrado em cada célula do domínio modelado, apesar de poder ser variável de uma célula para outra. O modelo de qualidade da água é baseado em uma abordagem Lagrangeana, e pode ser aplicado ao transporte de partículas que representem substâncias conservativas ou não-conservativas. O programa desenvolvido pode ser utilizado em diferentes aplicações, tais como transformações chuva-vazão e propagação de cheias, dentre outras. Adicionalmente, é apresentado um estudo de caso aplicado à Bacia do Rio Paraíba do Sul.

ABSTRACT --- The assessment of catchments' behavior is a complex issue and constitutes a valuable tool for water resources management. The aim of this paper is to present the theoretical basis of MODCEL, an integrated program for river basin simulation composed by three different models that perform hydrodynamic, hydrologic and water quality simulation, also allowing representation of water users' withdrawal, wastewater discharge and operation of hydraulic structures. The main engine of MODCEL is based on a hydrodynamic cell model. This hydrodynamic model represents the basin through a cell network in order to produce a looped discharge net to simulate flow patterns. The hydrologic model performs rainfall-runoff simulation and works as a lumped model in each cell of the domain region, although it can be variable from cell to cell. The water quality model is based on a Lagrangean approach and applies for the transport of particles that represent conservative or non-conservative substances. The developed program can be used in many different applications, such as rainfall-runoff simulation, flood routing, among others. Finally, it is presented a case study applied to the Paraíba do Sul river basin.

Palavras-chave: modelo matemático, simulação, gerenciamento de bacias.

1) Professores da Escola Politécnica da UFRJ e da COPPE, RJ, Prog. Eng. Civil, Caixa Postal 68506, 21945-970. e-mail: flavio@hidro.ufrj.br.

2) Doutorando do Programa de Engenharia Civil da COPPE-UFRJ, e-mail: lpcanedo@hidro.ufrj.br.

1 - INTRODUÇÃO

O gerenciamento de recursos hídricos depende fundamentalmente de uma adequada avaliação da quantidade e da qualidade da água em diferentes locais ao longo da bacia hidrográfica. Nesse contexto, uma das abordagens possíveis de serem empregadas na solução deste problema compreende a utilização de modelos matemáticos como ferramentas de simulação do comportamento da bacia.

O MODCEL é essencialmente um programa computacional, elaborado em linguagem “Delphi” e dispondo de interfaces amigáveis e simples para os usuários de modelos, desenvolvido com a finalidade de permitir simulações de diversos processos que interferem com a quantidade e a qualidade de água na bacia. Ele é composto basicamente por três módulos responsáveis respectivamente pelas simulações hidrodinâmica, hidrológica e de qualidade de água. O MODCEL pode ser empregado em uma ampla gama de estudos da engenharia de recursos hídricos, variando de acordo com os objetivos da aplicação, bem como das escalas espacial e temporal. Ele é tanto aplicável para simulação de enchentes em pequenas bacias urbanas, bem como simulações hidrológicas e hidrodinâmicas de longo termo em grandes e complexas bacias hidrográficas.

A versão original do modelo hidrodinâmico foi composta basicamente pelo modelo desenvolvido por Mascarenhas & Miguez (2002), utilizando o conceito original de células de escoamento (Zanobetti et al, 1970). Embora tal conceituação não seja recente, as idéias básicas originais são extremamente simples, coerentes com os diversos padrões hidrodinâmicos e bem adequáveis a um eficiente processo de solução numérica do sistema de equações resultante, pelo método da varredura dupla. O objetivo principal do modelo original era a modelação de cheias em grandes áreas inundáveis, aplicado ao Delta do Rio Mekong. Devido à Guerra do Vietnam, os estudos foram interrompidos, mas evidentemente as idéias básicas permanecem atuais e perfeitamente aplicáveis, com algumas adaptações, a vários tipos de problemas hídricos. Dessa forma, ao longo do tempo, inúmeras novas características foram incorporadas ao modelo original, aumentando sua capacidade de representação hidráulica, e agora também hidrológica, permitindo assim o desenvolvimento de novas aplicações. Este artigo, portanto apresenta a evolução das características do MODCEL, principalmente quanto à modelação hidrológica e a simulação de grandes bacias hidrográficas. Nesse contexto, alguns aspectos relativos às aplicações a enchentes urbanas e outros de talhes do MODCEL não serão apresentados, porém podem ser vistos em detalhe em Mascarenhas & Miguez (2002) e Mascarenhas et al (2005).

2 – CARACTERÍSTICAS BÁSICAS DO MODCEL

A hipótese básica deste modelo consiste no fato de que uma bacia pode ser modelada através de uma série de compartimentos homogêneos que se comunicam entre si, denominados células de escoamento. Uma dada célula pode comunicar-se com células vizinhas através de ligações (links), em um arranjo espacial tal que seja capaz de representar tanto a topografia bem como a representação hidráulica da bacia hidrográfica. Na verdade, os elementos básicos considerados no MODCEL são células e ligações. Cada célula possui um centro de escoamento, não necessariamente localizado no centro geométrico da região representada pela célula, o qual é tomado como referência para a representação topográfica. Em uma célula, o perfil da superfície livre e o volume armazenado são diretamente relacionados com a profundidade de água no seu centro. Nesse contexto, a lei de conservação da massa é aplicada a cada célula. As células são arranjadas em grupos de forma topológica, tal que células de um dado grupo só podem comunicar-se com células do mesmo grupo, do grupo posterior ou do grupo anterior, o que permite a solução do sistema de equações resultante, a cada passo de tempo, pelo método da varredura dupla. Note-se que as células representam subáreas e são responsáveis por processos de armazenamento, enquanto que as ligações são responsáveis pelos fluxos entre as células. Uma extensa lista de ligações encontra-se disponível para permitir a representação de diversos padrões de escoamento. Portanto, a capacidade deste programa na simulação de bacias hidrográficas de diferentes características é alcançada através da variedade de tipos de células e de ligações.

Uma característica marcante do MODCEL é a integração dos módulos hidrodinâmico, hidrológico e de qualidade de água. Isto é feito através da troca de saídas e de parâmetros entre os módulos. O modelo hidrológico é o primeiro a ser rodado e calcula séries de vazões geradas no interior da célula a serem aplicadas no centro de célula. Na seqüência, o módulo hidrodinâmico pode determinar vazões e velocidades nas diversas ligações entre as células. Finalmente, o módulo de qualidade de água utiliza as saídas do módulo hidrodinâmico (armazenamento de água nas células; campos de velocidades e hidrogramas nas ligações) e seus próprios parâmetros para calcular as concentrações ao longo do tempo de qualquer substância de interesse no centro das células. O módulo de usuário de água define características relacionadas à captação e lançamento de efluentes, bem como operação de estruturas hidráulicas, tais como usinas hidrelétricas ou estruturas de transposição. A figura 1 ilustra de forma simplificada as interações entre os modelos ou módulos que constituem o MODCEL.

O conjunto de tipos de células disponível no MODCEL para aplicações a grandes bacias hidrográficas é listado a seguir:

- células de rio ou canal – este tipo de célula é usado para modelar o escoamento de drenagem, onde a seção transversal é admitida como retangular, simples ou composta.
- células regulares de superfície – similares às anteriores, porém com forma prismática.
- células de reservatório – utilizadas para simular o armazenamento de água em um lago ou reservatório temporário, que apresenta uma curva elevação x área superficial.

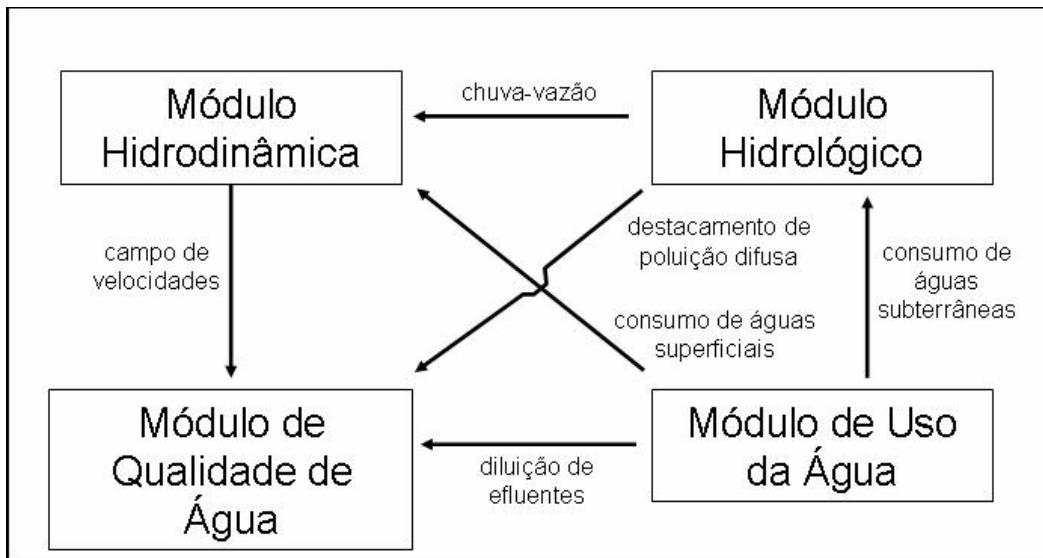


Figura 1 – Representação simplificada das interações entre os módulos do MODCEL.

3 – MODELO HIDRODINÂMICO

O modelo hidrodinâmico utiliza a lei de conservação da massa e relações hidrodinâmicas caracterizando o principal módulo do MODCEL. A variação do nível d'água em uma célula i , em um intervalo de tempo t , é dada pela equação da continuidade aplicada à célula:

$$A_{S_i} \frac{dZ_i}{dt} = P_i + \sum_k Q_{i,k} \quad (1)$$

Onde, $Q_{i,k}$ é a vazão entre as células vizinhas i e k ; Z_i é a elevação do nível d'água no centro da célula i ; A_{S_i} é a área superficial molhada da célula i ; P_i é a vazão devido à chuva sobre a célula i e t é a variável independente temporal.

O escoamento entre células pode ser calculado através de leis hidráulicas unidimensionais conhecidas, como a equação dinâmica de Saint-Venant, na sua forma completa ou simplificada sem os termos de inércia, a equação de vertedores livres ou afogados, dentre outras. A vazão entre duas células adjacentes é suposta ser uma função dos níveis d'água em seus centros, em qualquer instante de tempo.

Ligações típicas de escoamento disponíveis no MODCEL para aplicações a grandes bacias hidrográficas são listadas a seguir:

- ligação tipo rio – este tipo de ligação está relacionado com o escoamento em rios e canais, e corresponde ao escoamento à superfície livre representado pela equação dinâmica de Saint-Venant.
- ligação tipo planície – este tipo de ligação representa a equação dinâmica de Saint-Venant sem os termos de inércia, e é frequentemente usada para representar o escoamento sobre planícies de inundação e escoamento superficial no terreno.
- ligação de vertedor de soleira espessa – esta ligação representa o escoamento sobre vertedores de soleira espessa e é usada, principalmente, para representar o escoamento entre um rio e sua planície de inundação.
- ligação reservatório – esta ligação combina um orifício, como a vazão de saída de um reservatório, com um vertedor, que pode ou não entrar em carga, dependendo da operação do reservatório.

4 – MODELO HIDROLÓGICO

A modelação chuva-vazão era anteriormente representada no MODCEL através do uso do método do coeficiente de escoamento (runoff). Assim, para um dado intervalo de tempo, a chuva efetiva em qualquer célula podia ser obtida multiplicando-se seu coeficiente de escoamento pela lâmina precipitada naquele período. Posteriormente, um segundo modelo hidrológico foi desenvolvido. Nessa segunda abordagem, foi considerada a aplicação de um reservatório para levar em conta perdas por abstração inicial, bem como foi introduzido o uso do método do índice Phi para representar a infiltração potencial. Estes dois modelos eram do tipo baseados em eventos e focavam apenas na determinação do escoamento em pequenas bacias. Para permitir a aplicação em grandes bacias hidrográficas foi necessário desenvolver um novo modelo hidrológico com diferentes características.

O novo modelo hidrológico desenvolvido para o MODCEL pode ser classificado como determinístico, concentrado por célula, conceitual, contínuo no tempo, atuando como um modelo chuva-vazão aplicado a cada célula da região modelada. A chuva e os parâmetros de simulação podem variar de uma célula para outra. Duas características principais deste modelo hidrológico são sua simplicidade e seu pequeno número de parâmetros, o que favorece sua robustez. Perrin et al (2001) argumentam que, na maior parte das aplicações, modelos simples podem atingir um nível de desempenho tão alto quanto aqueles com elevado número de parâmetros. Para cada passo de tempo, os cálculos relativos às rotinas do modelo hidrológico são realizados em primeiro lugar, para então

proceder-se à propagação por meio das rotinas hidrodinâmicas. Os seguintes processos são representados neste modelo hidrológico: precipitação; perdas iniciais por abstração; escoamento superficial; infiltração; escoamento sub-superficial; percolação; escoamento de base; evapotranspiração e evaporação de superfícies líquidas. A figura 2 ilustra simplificadamente o esquema geral deste modelo hidrológico.

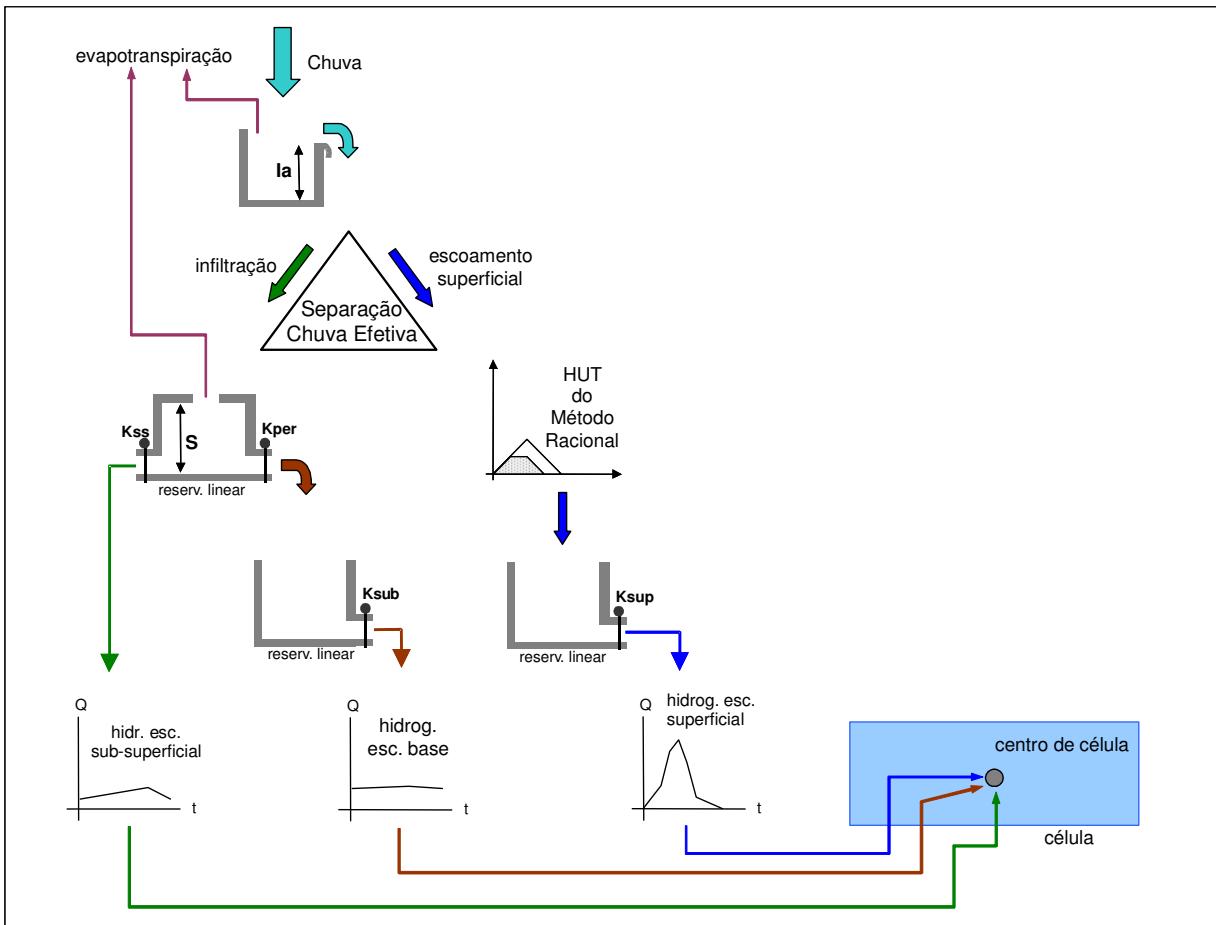


Figura 2 – Esquema simplificado de funcionamento do modelo hidrológico.

4.1 – Precipitação

A chuva é a entrada básica para a simulação neste modelo hidrológico e é aplicada a cada célula. Ela é representada por um arquivo contendo uma seqüência de precipitações ao longo do tempo. Assim, chuvas medidas ou previstas precisam ser adaptadas à malha temporal numérica. A definição da chuva para cada célula deve ser feita previamente à simulação e pode ser avaliada, por exemplo, através da análise da distribuição espacial dos postos pluviométricos disponíveis e seus dados.

4.2 – Chuva Efetiva

Uma adaptação do Método do U.S. Soil Conservation Service (SCS) usando o parâmetro CN (Curve Number) é utilizado na estimativa da lâmina de escoamento superficial a partir da chuva

aplicada a cada célula. Este método considera o escoamento superficial direto cumulativo como uma função da precipitação acumulada, da cobertura do solo, do tipo de solo e da umidade antecedente (SCS, 1986). Ponce & Hawkins (1996) discutem as vantagens e desvantagens desse método.

O método original SCS é baseado em eventos. A abordagem do MODCEL adaptou este modelo para permitir a simulação contínua no tempo. As mudanças consistem em retornar o escoamento superficial direto cumulativo e a precipitação cumulativa para o valor zero depois de um período de um período sem chuva. O parâmetro de simulação deste processo é o valor de CN, variável de célula para célula.

4.3 – Perdas por Abstração

A interceptação nas copas das árvores e armazenamentos em depressões é representada de forma combinada em um reservatório de abstração. A capacidade deste reservatório pode ser prescrita pelo usuário do modelo como uma certa profundidade de abstração ou mesmo estimada através de métodos tais como o SCS. A chuva é primeiramente aplicada a este reservatório. Enquanto ele não estiver cheio, uma certa quantidade de precipitação pode ser armazenada. Uma variável de estado controla o armazenamento neste reservatório ao longo do tempo.

4.4 – Simulação do Escoamento Superficial

Uma vez que o excesso de precipitação é calculado para cada intervalo de tempo, o passo seguinte é a determinação do hidrograma do escoamento superficial direto, o qual é aplicado ao centro da célula. A simulação do escoamento superficial é feita através de uma combinação de dois métodos: hidrograma unitário do método racional (HUMR) e aplicação de um reservatório linear. O HUMR é um método simples e comum utilizado para a simulação do escoamento superficial em pequenas bacias. Uma das principais vantagens desse método é que sua resposta não varia de acordo com a malha de tempo adotada. O hidrograma relativo a um passo de tempo, inferior ao tempo de concentração da área, assume a forma trapezoidal como mostrado na figura 3. A desvantagem deste método é que ele frequentemente superestima as vazões, especialmente quando a área da bacia (no caso a área da célula) aumenta. Para contornar esse efeito indesejável, a resposta obtida pelo HUMR é então propagada através de um reservatório linear, com o objetivo de se amortecer as vazões obtidas no HUMR, neutralizando a deficiência deste método. Os parâmetros de simulação utilizados nesses processos são o tempo de concentração da célula (desde seu contorno de montante até seu centro) e a constante de recessão do reservatório linear associado aos processos superficiais.

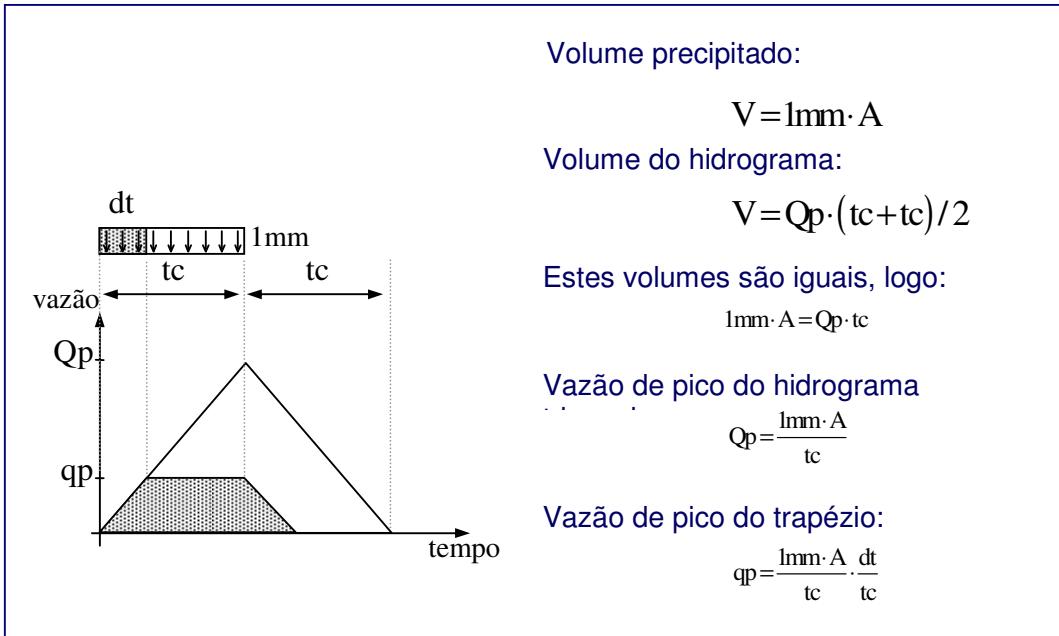


Figura 3 – Ilustração do Hidrograma Unitário do Método Racional.

4.5 – Percolação e Escoamento Sub-superficial

A lâmina de infiltração ao longo de um passo de tempo define uma vazão de infiltração. Esta taxa é a principal entrada aplicada ao reservatório sub-superficial, que representa a camada mais superficial de solo. A capacidade máxima desse reservatório é calculada através do parâmetro “S” do método do SCS. Duas saídas desse reservatório são consideradas, uma das quais representa o fluxo de percolação para uma camada mais profunda de solo, enquanto a outra é responsável pelas taxas de escoamento sub-superficial. Ambos os fluxos são modelados como saídas de reservatório linear. A taxa de evapotranspiração é outra saída que é removida deste reservatório. Assim, a equação de conservação da massa aplicada a esse reservatório pode ser escrita como:

$$I_{\text{inf}} - O_{\text{int}} - O_{\text{perc}} - E_{\text{subsurface}} = \frac{dS_{ss}}{dt} \quad (2)$$

Onde I_{inf} é a vazão de infiltração; O_{int} é a saída do escoamento sub-superficial; O_{perc} é a saída de percolação; $E_{\text{subsurface}}$ é a taxa de evaporação aplicada ao reservatório sub-superficial; e S_{ss} é uma variável de estado de armazenamento.

Desenvolvendo-se a equação anterior em diferenças finitas, vem:

$$S^{t+1} = \frac{2 \cdot \Delta t \cdot K_{\text{perc}} \cdot K_{\text{int}}}{2 \cdot K_{\text{perc}} \cdot K_{\text{int}} + \Delta t \cdot (K_{\text{perc}} + K_{\text{int}})} \cdot \left[\left(\frac{1}{\Delta t} - \frac{1}{2 \cdot K_{\text{perc}}} - \frac{1}{2 \cdot K_{\text{int}}} \right) \cdot S^t + I_{\text{inf}} - E_{\text{subsurface}} \right] \quad (3)$$

Onde S^{t+1} é o armazenamento no tempo $t+1$; S^t é o armazenamento no tempo t ; Δt é o passo de tempo; K_{perc} é a constante de recessão do reservatório linear referente à percolação; K_{int} é a

constante de recessão do reservatório linear referente ao escoamento sub-superficial; $\overline{I_{inf}}$ é a taxa média de infiltração entre os tempos t e $t+1$; e $\overline{E_{subsurface}}$ é a taxa de evaporação média entre os tempos t e $t+1$.

4.6 – Escoamento de Base

O escoamento de base é também modelado como a saída de um reservatório linear. Neste caso, o reservatório representa o armazenamento de água subterrânea e a taxa de percolação é considerada como sua entrada básica. O parâmetro de simulação relacionado a esse processo é a constante de recessão do reservatório linear do escoamento de base.

4.7 – Evapotranspiração

A evapotranspiração potencial é representada como um vetor com variação mensal. De modo a determinar as taxas reais de evapotranspiração, o seguinte procedimento é adotado. A água armazenada no reservatório de abstração é a fonte primária de evapotranspiração. A água no reservatório sub-superficial é sua fonte secundária. Se a fonte primária não é capaz de preencher a taxa de evapotranspiração potencial, a água armazenada no reservatório de abstração é removida e uma fração da profundidade adicional de evaporação é subtraída da fonte secundária. A fração é igual à porcentagem de enchimento do reservatório sub-superficial.

4.8 – Evaporação de Superfícies Líquidas

A taxa de evaporação de superfícies líquidas é representada como um registro variável mensalmente e se aplica apenas para células de rio e de reservatório. Em um dado passo de tempo, o fluxo de evaporação é determinado multiplicando-se a área superficial pela taxa.

5 – O MODELO DE QUALIDADE DE ÁGUA

Um modelo de qualidade de água compatível com a estrutura do MODCEL foi desenvolvido e encontra-se atualmente em fase final de testes. Uma abordagem Lagrangeana foi utilizada para modelar o transporte de substâncias. Dessa forma, partículas são usadas para representar uma quantidade finita de massa da substância de interesse. As partículas são armazenadas nas células e podem mover-se entre as células através das ligações. Em um dado passo de tempo, uma partícula sofre um transporte advectivo que pode ser determinado, a grosso modo, pela multiplicação do comprimento do intervalo de tempo pela velocidade instantânea calculada pelo modelo hidrodinâmico para a ligação através da qual a partícula está se movendo. Evidentemente, o processo pode não ser tão simples na realidade, mas tal aproximação tem se mostrado razoável. O transporte relacionado à dispersão/difusão é determinado como um componente randômico,

coerente com a natureza probabilística da difusividade de partículas. O modelo é capaz de representar substâncias conservativas e não-conservativas, apesar de por enquanto admitir apenas aquelas com decaimento cinético de primeira ordem. A razão pra tal fato é que na maioria das aplicações a grandes bacias hidrográficas, o poluente mais significativo é a demanda bioquímica de oxigênio (DBO), cujo decaimento pode ser satisfatoriamente modelado através daquele tipo de relação cinética (Thomann & Mueller, 1987; Streeter & Phelps, 1925). Maiores detalhes sobre este modelo, bem como resultados reais serão fornecidos em trabalhos futuros, após os períodos de testes e dos casos de aplicação.

6 – USUÁRIOS DE ÁGUA E OPERAÇÃO DE ESTRUTURAS HIDRÁULICAS

Outras novas implementações realizadas no MODCEL dizem respeito à representação de usuários na bacia hidrográfica e a operação de estruturas hidráulicas. Estas implementações foram desenvolvidas e introduzidas para aumentar a capacidade de representação do MODCEL e torná-lo mais adequado aos estudos de gerenciamento de recursos hídricos da bacia hidrográfica, ou seja, permitir lidar com as questões atuais relativas à outorga pelos usuários da bacia, por exemplo.

6.1 – Representação de Usuários de Água

O perfil dos usuários de água de uma bacia hidrográfica varia bastante segundo diversos aspectos. Nesse contexto, é muito difícil ou mesmo impossível a obtenção de um esquema generalizado para a representação dos usuários. Uma metodologia que pode ser aplicada para a representação dos efeitos típicos locais sobre a quantidade e a qualidade da água pelos usuários da bacia hidrográfica foi desenvolvida para o MODCEL.

Usuários de água na bacia podem ser representados pelas suas vazões de captação e de lançamento de efluentes e a concentração dos poluentes lançados. O número de poluentes pode ser tão diverso quanto o requerido para cada aplicação. Os usuários de água existentes na bacia e suas características são considerados como uma propriedade da célula e, portanto, a captação e o lançamento de efluentes são supostos de ocorrer no centro da célula. A diferença entre vazões captadas e lançadas é igual à vazão efetivamente consumida pelo usuário. Para qualquer poluente ou substância, a diferença entre a carga captada (vazão de captação multiplicada pela concentração do poluente no trecho de rio - célula) e a carga efluente (vazão de efluente multiplicada pela concentração de poluente no efluente) é responsável pelo balanço de carga, que pode configurar uma fonte ou um sumidouro.

Esta metodologia é adequada para uma representação típica de usuário industrial, porém não tão boa para a modelação de um usuário agricultor, por exemplo. Desenvolvimentos futuros pretendidos para a representação de usuários na bacia no MODCEL consistem na criação de

diferentes tipos de usuários na bacia (com diferentes esquemas de modelação), na possibilidade de captação de água subterrânea (que será direcionada para o modelo hidrológico e removida do reservatório subterrâneo) e a introdução da variação de captação e lançamento sazonal. Esta última característica permitirá estudos de modelos de outorga sazonais. A figura 4 ilustra a representação de usuários de água em uma bacia hidrográfica no MODCEL.

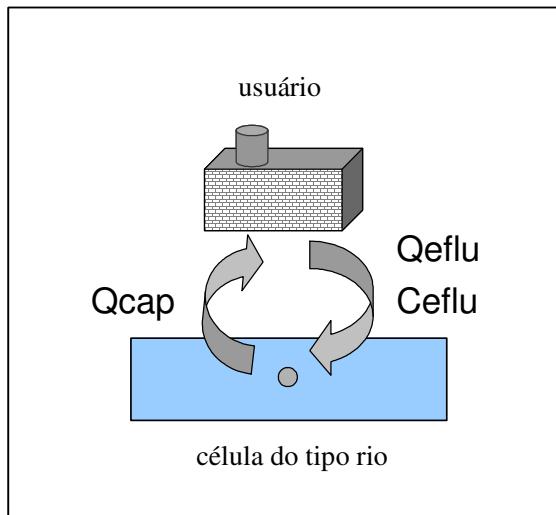


Figura 4 – Representação de usuários no MODCEL.

6.2 – Estruturas de Transposição

Estruturas de transposição são representadas como vazões transpostas constantes entre duas células, uma das quais cede água e a outra recebe a vazão correspondente. Pretende-se desenvolver situações de vazões de transposição sazonais em versões futuras do MODCEL.

7 – ESTUDO DE CASO

O estudo de caso deste artigo refere-se à Bacia do Rio Paraíba do Sul, localizada na região Sudeste do Brasil, uma das mais importantes regiões do país em termos econômicos. A bacia tem área de drenagem de 55.500 km² e seu curso d'água principal apresenta uma extensão aproximada de 1.150 km. Esta bacia hidrográfica constitui-se em um complexo sistema hídrico uma vez que nela existem quatro usinas hidrelétricas de grande porte (e várias outras de menor capacidade instalada), uma estrutura de transposição de grandes dimensões que provê abastecimento de água para a região metropolitana da cidade do Rio de Janeiro (cerca de 160 m³/s de vazão transposta) e centenas de usuários de água. A figura 5 mostra a localização do rio principal e apresenta uma vista em planta da bacia.

A divisão em células da área em estudo considerou o uso de grandes células para representar sub-bacias e reservatórios bem como células menores para a modelação de trechos de rios. Cinco

diferentes sub-bacias (com áreas de drenagem variando desde aproximadamente 200 km² a 2000 km²) com réguas fluviométricas localizadas próximo às suas saídas foram utilizadas na calibração do modelo hidrológico. Essas calibrações consideraram registros de um ano. A figura 6 mostra em detalhe a região modelada em destaque, e na figura 7 pode ser vista a divisão em células.

Bacia do Rio Paraíba do Sul

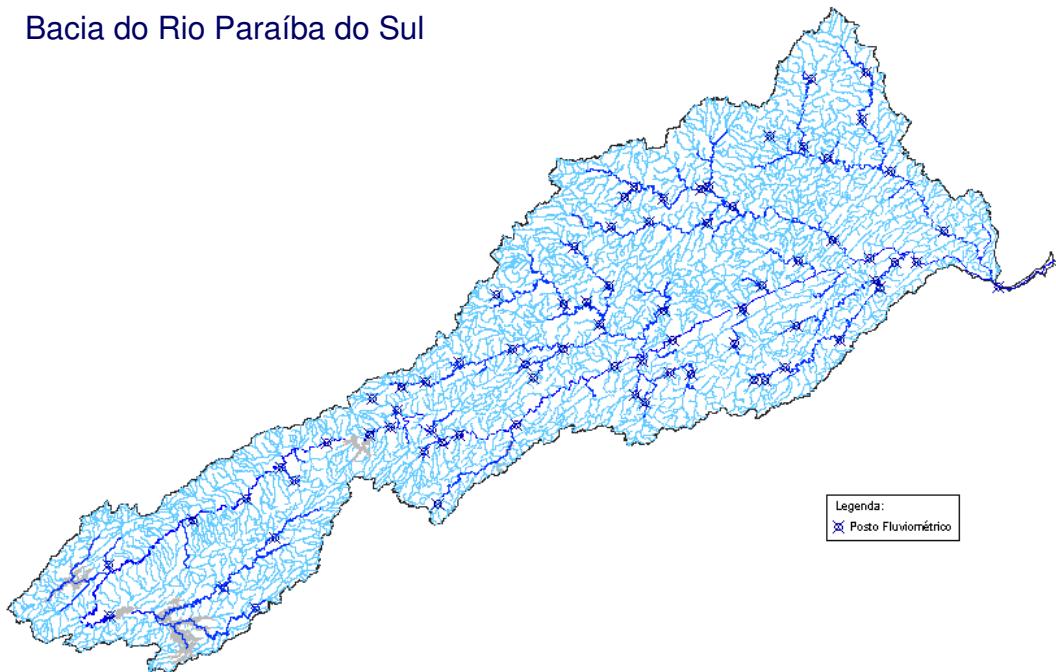


Figura 5 – Vista em planta da Bacia do Rio Paraíba do Sul.

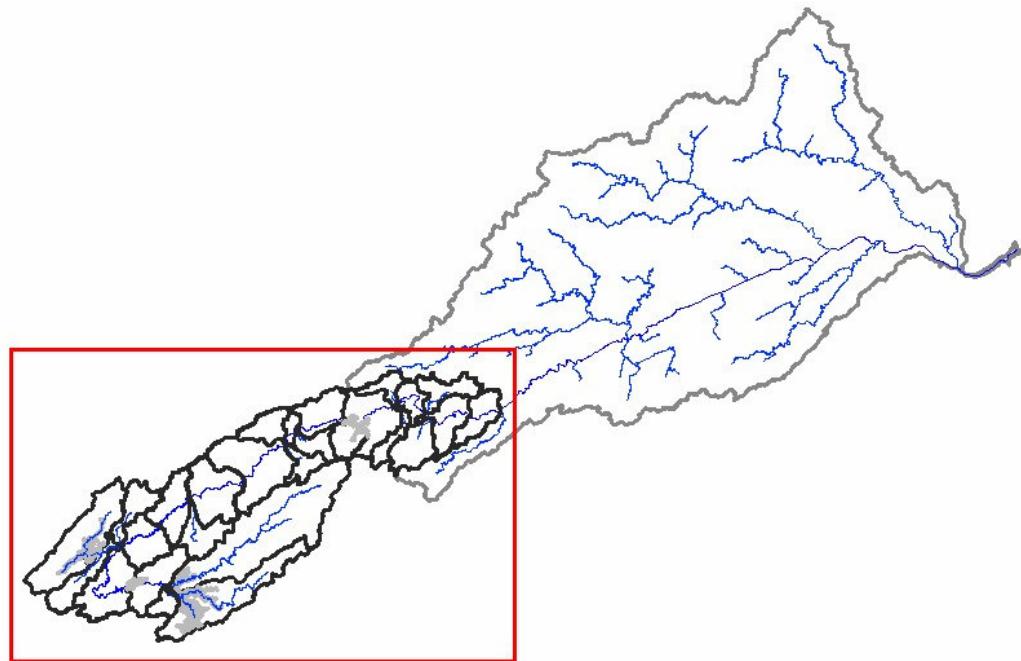


Figura 6 – Destaque da modelação de um trecho da bacia.

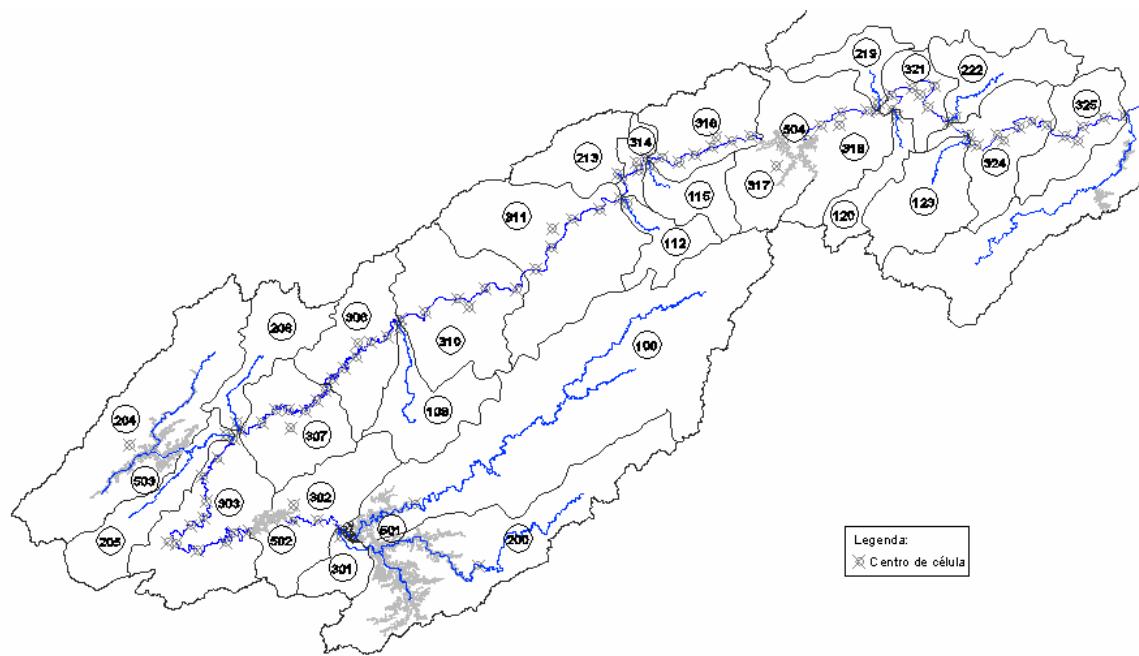


Figura 7 – Divisão em células dos trechos alto e médio da Bacia.

A seguir, nas figuras 8 a 12 mostram-se resultados de calibração, validação e simulações efetuados pelo modelo para a bacia em estudo.

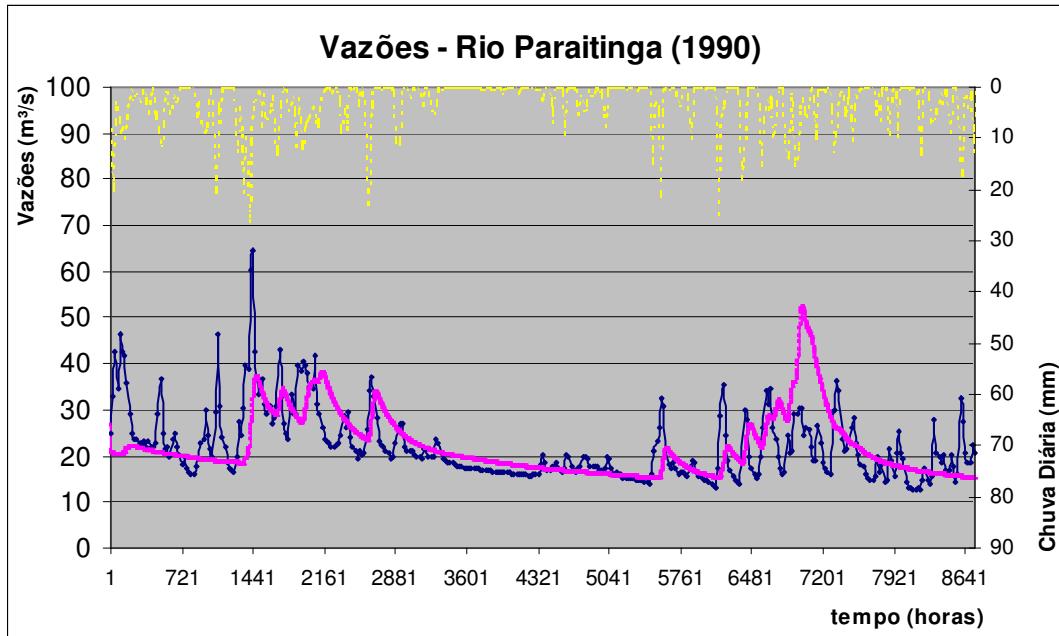


Figura 8 – Resultados da Calibração do Modelo para a Sub-Bacia do Rio Paraitinga.

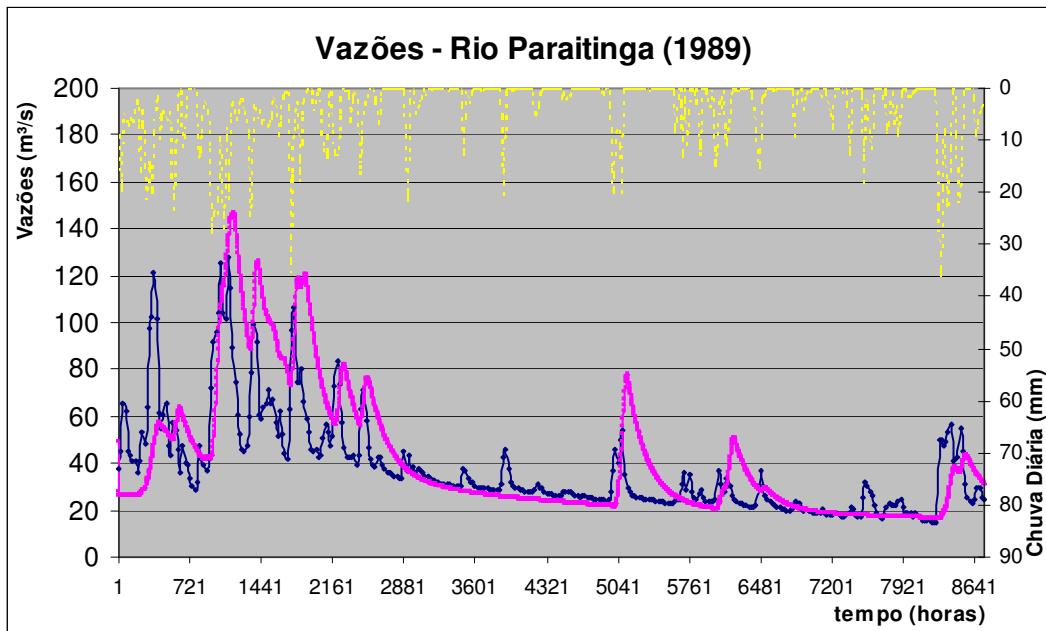


Figura 9 – Resultados de Validação para a Sub-Bacia do Rio Paraitinga.

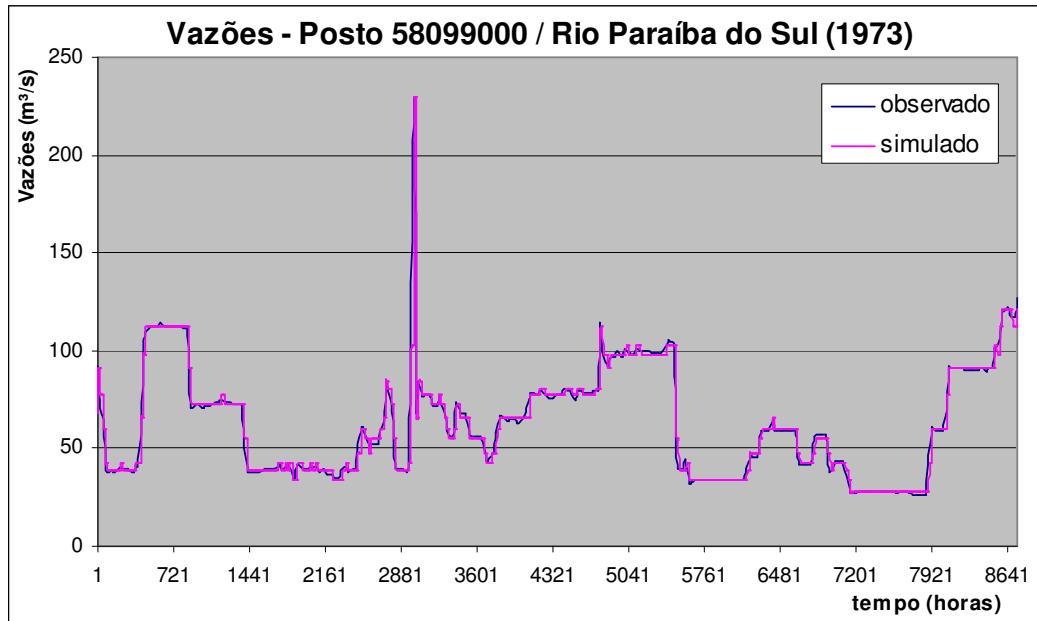


Figura 10 – Simulação para o Rio Paraíba do Sul a Jusante da UHE de Santa Branca.

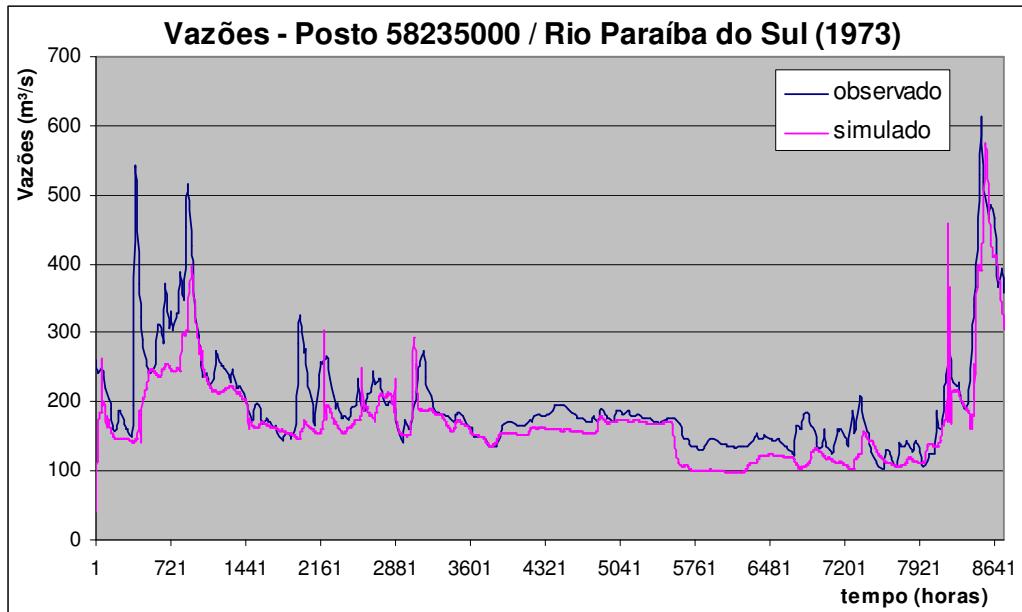


Figura 11 – Simulação do Rio Paraíba do Sul a Montante da UHE de Funil.

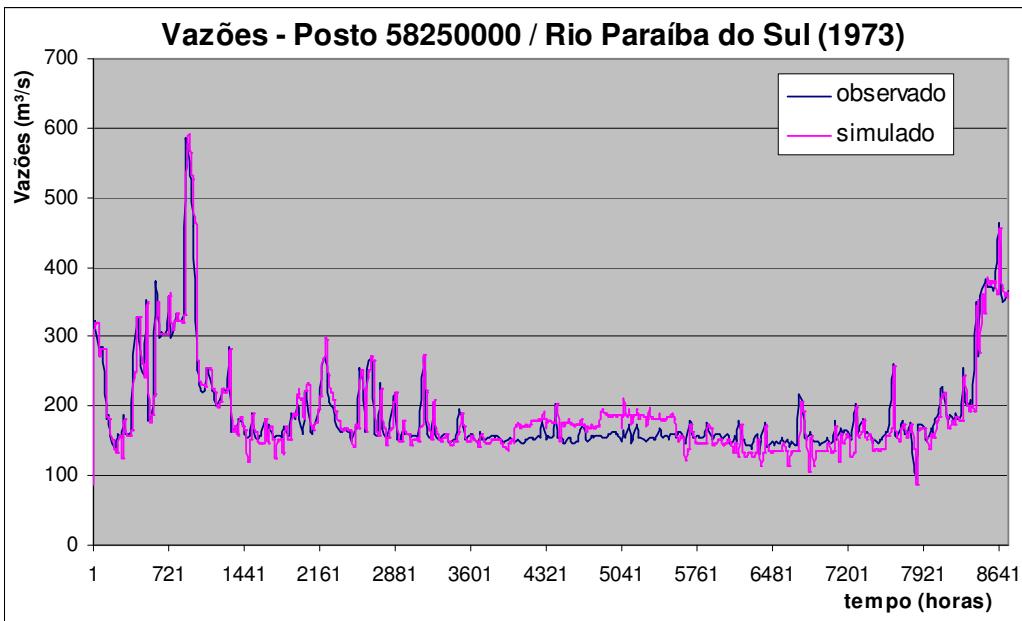


Figura 12 – Simulação do Rio Paraíba do Sul a Jusante da UHE de Funil

8 – CONCLUSÕES

Este artigo apresentou o MODCEL como uma versátil ferramenta de simulação matemática aplicável a bacias hidrográficas com áreas e características bastante variáveis. Os resultados alcançados mostraram a capacidade potencial do MODCEL para a representação matemática do comportamento de complexos sistemas hídricos. Uma das características marcantes dessa ferramenta é a integração, em um único programa, de modelos com diferentes propósitos que

realizam simulações hidrodinâmica, hidrológica e de qualidade da água. Futuramente, será possível continuar melhorando sua capacidade para representar outros aspectos de bacias hidrográficas, desenvolvendo-se novos tipos de estruturas individuais de modelos, bem como novos tipos de células e ligações.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao Fundo Setorial de Recursos Hídricos CT-HIDRO GRH 01/2004, à FINEP – Financiadora de Estudos e Projetos e ao CNPq, pelo Convênio que possibilitou avanços significativos na linha de pesquisa de que trata o presente trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- MASCARENHAS, F. C. B., MIGUEZ, M. G., (2002). *“Urban Flood Control through a Mathematical Flow Cell Model”*. Water International, Vol 27 (2), pp 208-218.
- MASCARENHAS, F. C. B., TODA, K., MIGUEZ, M. G., INOUE, K., (2005). *“Flood Risk Simulation”*, WIT Press, London and Boston, 468 p.
- PERRIN, C., MICHEL, C., ANDRÉASSIAN, V., (2001). *“Does a Large Number of Parameters Enhance Model Performance? Comparative Assessment of Common Catchment Model Structures on 429 Catchments”*. Journal of Hydrology, Vol 242, pp 275-301.
- PONCE, V. M., HAWKINS, R. H., (1996). *“Runoff curve number: Has it reached maturity?”* Journal of Hydrological Engineering, ASCE, 1(1), pp 11-19.
- SCS., (1986). *“Urban Hydrology for Small Watersheds”*, Technical Release 55, USDA, Springfield, VA.
- STREETER, H. W., PHELPS, E. B., (1925). *“A Study of the Pollution and Natural Purification of the Ohio River”*. Public Health Bulletin, 146, Washington, USA.
- THOMANN, R. V., MUELLER, J. A., (1987). *“Principles of Surface Water Quality Modeling and Control”*. Harper International Edition, New York, USA.
- ZANOBETTI, D., LORGERÉ, H., PREISSMANN, A., CUNGE, J. A., (1970). *“Mekong Delta Mathematical Program Construction”*. Journal of the Waterways and Harbours Division, ASCE, Vol 96, (2), pp 181-199.