

Modelagem hidrodinâmica do canal do rio Paraná, trecho Porto São José - Porto 18. Parte II: Calibragem do modelo

Astrid Meira Martoni* e Roberto Cruz Lessa

Departamento de Engenharia Civil, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá-Paraná, Brazil. *Author for correspondence.

RESUMO. Neste artigo, apresenta-se a modelagem hidrodinâmica do trecho de canal entre Porto São José e Porto 18. Esta etapa compreendeu os trabalhos de obtenção de dados históricos, levantamentos de campo de níveis e vazões, obtenção dos parâmetros do modelo e análise da distribuição das vazões através dos canais principais. Para as seções internas da discretização foram feitas leituras de níveis nas seções e medidas de descarga usando o medidor ADCP, o que tornou possível estimar os coeficientes de rugosidade. O modelo calibrado constitui um instrumento eficiente para simular dados de níveis e vazões neste trecho do rio.

Palavras-chave: modelagem hidrodinâmica, coeficientes de resistência em canais naturais, rio Paraná.

ABSTRACT. Paraná river channel hydrodynamic modelling for the Porto São José - Porto 18 stretch. Part II: model calibration. In this paper hydrodynamic modelling of the channel for the river stretch from Porto São José to Porto 18 is presented. This step involved historical data gathering, level and flowrate field survey, model parameters attainment and flowrate distribution analysis for the main channels. Stages readings and measurement of discharge using ADCP meter were performed at the inner sections of the discretization, making it possible to estimate roughness coefficients. The calibrated model thus obtained is an efficient tool in order to simulate stages and flowrate data within this part of the river.

Key words: hydrodynamic modelling, strength coefficients for natural channels, Paraná river.

Para estabelecer o perfil do sistema do rio Paraná, no trecho Porto São José - Porto 18, é preciso um acompanhamento contínuo das variáveis mais importantes que descrevem de imediato o seu comportamento, como o nível e a vazão.

As medidas de vazão nunca são muito precisas e é impossível obtê-las continuamente com os métodos convencionais durante a cheia. Entretanto, os registros de níveis podem ser avaliados continuamente e com certa confiança ao longo do rio. As relações que poderiam ser estabelecidas entre nível e vazão, através das curvas-chave, são para condições de escoamento permanente, condição esta não encontrada freqüentemente nos rios, tornando seu uso pouco confiável (Cunge, 1975). Pelo fato de a teoria do escoamento em canais abertos ser bem conhecida e confirmada há muito tempo, a modelagem em rios é bastante aplicada (Cunge, 1975), e vem eliminar estas dificuldades.

Portanto, a modelagem matemática hidrodinâmica deste trecho do rio Paraná permitirá,

através de simulações, a geração de informações aos segmentos de pesquisa que relacionam suas variáveis ao nível hidrométrico e vazões, em relação ao espaço e ao tempo.

O modelo adotado para representar o sistema em estudo é o módulo hidrodinâmico do *modelo hidrológico-hidrodinâmico IPH IV*, desenvolvido no Instituto de Pesquisas Hidráulicas - IPH, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Brasil.

O programa de cálculo deste módulo é construído com as equações de Saint Venant, que, em 1871, estabeleceu suas hipóteses para desenvolver as equações do escoamento não-permanente gradualmente variado. Estas equações formam um sistema de equações diferenciais parciais quase linear, contendo alguns coeficientes experimentais, representados pelas equações da continuidade ou conservação da massa (Equação 1) e a equação dinâmica ou da conservação do *momentum*, sem considerar o efeito dinâmico da contribuição lateral (Equação 2). Apesar das simplificações, elas

são tratadas como completas e não podem ser resolvidas por métodos analíticos, tendo-se que usar esquemas numéricos, como o das diferenças finitas com esquema implícito de Preissmann (Cunge, 1975; Chaudhry, 1993; Tucci, 1986; Tucci, 1987).

$$\frac{\partial Q}{\partial x} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_l \quad 1$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{Q^2}{A} \right) + gA \frac{\partial y}{\partial x} = gA(S_0 - S_f), \quad 2$$

onde: Q = vazão; x = distância ao longo do canal; A = área da seção transversal; t = tempo; q_l = contribuição lateral por unidade de largura; y = profundidade; S_0 = declividade de fundo; S_f = declividade da linha de energia devida à resistência; g = aceleração da gravidade.

Os esquemas implícitos são apresentados com formulação linear ou não-linear, e são classificados segundo a malha numérica e a ponderação das variáveis θ , no cálculo dos termos das equações e são incondicionalmente estáveis (condição de Courant, $Cr = (\Delta t / \Delta x)C$). O controle dos esquemas implícitos ocorre na acuracidade da solução, pois deve-se escolher intervalo de tempo de cálculo que não provoque erro numérico na solução. Além disso, deve-se ter em conta o número de seções por comprimento de onda para que os referidos erros numéricos não sejam importantes (Tucci, 1987).

O esquema implícito de Preissmann é incondicionalmente estável quando o fator de ponderação θ é maior que 0,5; ou seja, significa que não há restrição no tamanho de Δx e Δt para estabilidade. Entretanto, para a precisão, Courant deverá ser igual a 1,0 (Chaudhry, 1993).

Para analisar a precisão, Tucci (1986) apresenta um estudo sobre o erro no amortecimento e na defasagem da onda numérica e da onda verdadeira, representados por dois fatores R1 (relação entre o amortecimento numérico e o amortecimento analítico) e R2 (relação entre a velocidade numérica e a velocidade analítica).

Esses fatores R_1 e R_2 , plotados para $\theta = 0,5$ e $\theta = 1$ e diferentes valores de $(L/\Delta x)$ e Cr , permitem obter uma estimativa da ordem de grandeza para a discretização em relação ao espaço Δx e ao tempo, Δt (Tucci, 1987).

Sendo: $C = \sqrt{gh}$ - celeridade; g - constante gravitacional; h - maior profundidade média do escoamento; $L = T\sqrt{gh}$ - comprimento da onda; T - período da onda; Δx - espaçamento entre as seções

usado pelo modelo; Δt - intervalo de tempo usado pelo modelo.

A calibração do modelo é feita através dos principais parâmetros que descrevem o meio físico do rio Paraná (resultantes do primeiro artigo), das medidas e dos registros históricos de nível e/ou vazão nas seções de interesse.

O principal parâmetro de ajuste do modelo é o coeficiente de rugosidade, que nesta área de estudo é desconhecido, por quase não se conhecer a geomorfologia do canal. Os valores deste coeficiente foram estimados experimentalmente pelo emprego da equação de Manning para canais (Equação 3), conhecendo-se os parâmetros geométricos e hidráulicos do canal (área, raio hidráulico; a vazão e as perdas de energia do escoamento, confinado ao leito (Tucci, 1980; Chow, 1982; French, 1987; Cunge, 1975).

$$S_f = \frac{Q|Q|n^2}{R^{4/3}A^2}, \quad 3$$

onde: S_f = declividade da linha de energia devida à fricção; Q = vazão; n = coeficiente que depende da rugosidade das paredes; R = raio hidráulico; A = área da seção transversal

Estimando-se previamente o coeficiente de resistência, o processo de ajuste deste parâmetro ao modelo é mais rápido.

O modelo pode ser aplicado mesmo em trecho de rio sujeito a remanso, ou com alterações no leito. As possibilidades de uso do IPH IV para ajuste, verificação e alternativas de planejamento ou projeto (Tucci, 1987).

Materiais e métodos

Após a definição do problema, dos objetivos a serem alcançados e finalidades quanto ao uso do modelo, deve-se delimitar o trecho de rio onde o mesmo será aplicado. Para isso, escolheu-se a seção de contorno de montante em Porto São José, pelo fato de possuir um limnógrafo com uma série histórica de 30 anos e uma curva-chave bem estável. Como seção de contorno de jusante escolheu-se Porto 18, em virtude de possuir uma seção única, sem ilhas. Pelo fato de não se ter dados sobre as características físicas da planície de inundação, bem como pela impossibilidade de executar tal levantamento, a modelação restringiu-se apenas aos canais de escoamento do rio Paraná.

O sistema deve ser simulado por uma série de pontos computacionais, que representem as seções transversais correspondentes ao trecho de espaçamento Δx . Estas seções foram selecionadas de forma a representar todas as características

topográficas e hidráulicas do trecho (Cunge, 1975). Uma correta representação, sugerida por Cunge *et al.* (1980), deve-se dar em dois níveis de discretização: topológica e hidráulica.

Discretização topológica do sistema rio Paraná na área de estudo. A Figura 1 apresenta a discretização do sistema a ser modelado. As seções transversais foram posicionadas com base nas observações de campo e informações de mapas da região, de tal forma a serem representativas do escoamento. O espaçamento máximo entre as seções foi determinado para garantir o número de Courant igual a 2. Com essa discretização, o sistema ficou constituído por 52 seções, 42 trechos e 6 confluências.

As seções foram numeradas de forma crescente, de montante para jusante, procurando minimizar o armazenamento e cálculos, como mostra a Tabela 1 e Figura 1, e nas confluências, procurou-se minimizar a diferença entre o número das seções nas mesmas. Cada confluência foi esquematizada de acordo a satisfazer a equação da continuidade e da conservação da energia (Tucci, 1980, Cunge, 1975).

Dentre as 52 seções transversais, vinte e seis são as seções estratégicas, materializadas através da instalação dos marcos referenciais, consideradas reais. As outras seções da discretização, que não possuem marcos referenciais, são seções fictícias de mesma geometria das seções com batimetria, que foram locadas de forma a manter a representação da largura nos trechos (Figura 1). As seções reais com

batimetria e as fictícias correspondentes são apresentadas na Tabela 1.

A discretização do sistema apresenta 8 seções transversais compostas, onde uma ou mais ilhas são cortadas pela linha da seção.

Na calibração do modelo matemático para o rio St. Lawrence, no Canadá, usou-se um esquema implícito construído com e sem o fluxo dividido pela maior ilha. No esquema sem bifurcação, as seções de um lado da ilha foram ligadas às seções do outro lado para formar um único fluxo. No esquema com bifurcação, equações das confluências tomam parte no modelo como condição de contorno interna, no qual o fluxo divide-se e torna a se reunir. Os resultados obtidos da calibração a montante e a jusante da ilha foram praticamente iguais para os dois esquemas (Cunge, 1975).

Com base nessa consideração, as seções 19(M20T), 25(M12T), 35(M13T), 37(M07T), 38(M17T), 40(M06T) no canal direito, e 13(M29T), 16(M26T) no canal esquerdo, são as seções separadas por ilhas, que foram consideradas como únicas, apresentadas no primeiro artigo. A seção de um lado da ilha foi ligada à seção do outro lado da ilha para formar uma seção única, eliminando bifurcações.

Discretização hidráulica. As seções transversais, representativas dos trechos, foram definidas de forma a representar tanto quanto possível todas as características topográficas e hidráulicas de cada trecho.

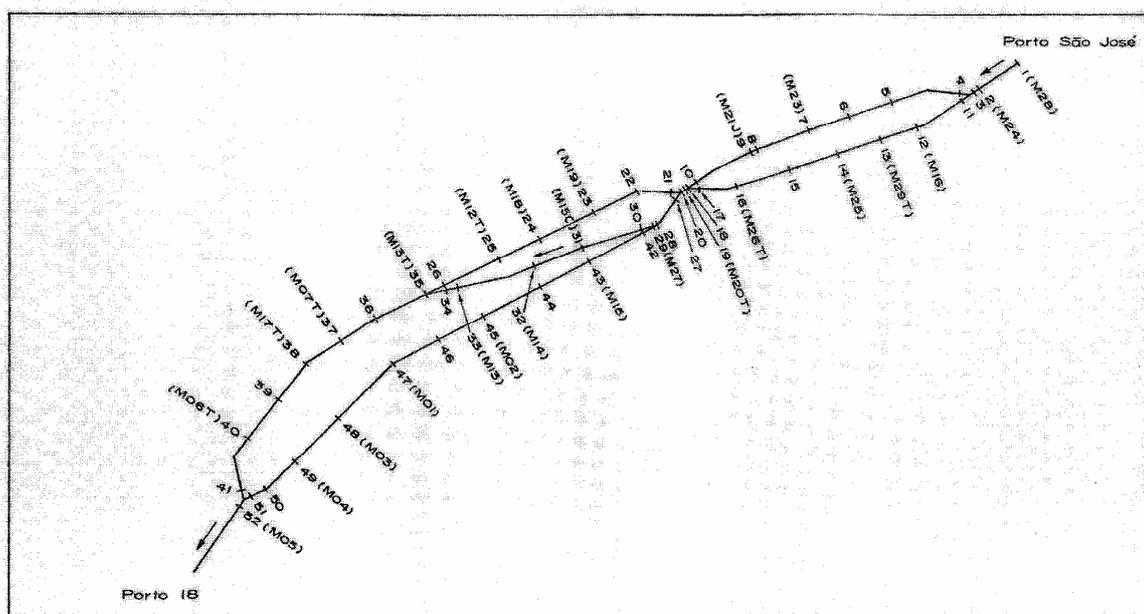


Figura 1. Seções do Rio Paraná, usadas no modelo matemático

Tabela 1. Seções reais com batimetria e as fictícias correspondentes

Seções com marcos referenciais e batimetria conhecida	Numeração das seções para uso do modelo	Seções fictícias correspondentes de mesmas características físicas
Canal principal		
M28 - Porto São José	01	-
M24 - Porto São Pedro	02	03
Canal direito superior		
M23 - Buracão	07	04, 05 e 06
M21M - Montante do Baía	08	-
M21J - Jusante do Baía	09	-
M20M - montante da Xirica	10	-
Canal esquerdo superior		
M16 - Pousada	12	11
M29 T- Base Nupélia	13	-
M25 - Mela	14	15
M26T - Fazenda Porto Rico	16	17
Canal principal		
M20T - Xirica	19	18 e 20
Canal direito inferior		
M20J - jusante da Xirica	21	22
M19 - Fazenda Paraná	23	-
M18 - Fazenda Entre Rios	24	-
M12T - Dió	25	26
Canal esquerdo inferior		
M27 - Cortado	29	27 e 28
Canal do Gaúcho		
M15C - Entrada do C. do Gaúcho	31	30
M14 - Rancho Alegre	32	-
M13 - Saída do C. do Gaúcho	33	34
Canal direito inferior		
M13T - jusante do C. do Gaúcho	35	36
M07T - Boca do Iputã	37	-
M17T - Ilha dos Porcos	38	39
M06T - Ilha Barbado	40	41
Canal esquerdo inferior		
M15 - Canal entupido	43	42 e 44
M02 - Fazenda Belo	45	46
M01 - Três Morrinhos	47	-
M03 - Ilha Latanjeira	48	-
M04 - Ilha da Onça	49	50 e 51
Canal principal		
M05E - Porto 18	52	-

Com os dados do levantamento batimétrico, resultaram os valores de *área*, *largura* e *raio hidráulico* em função da profundidade (para variação de 3 cm), os quais foram armazenados em arquivo de dados. Os resultados apresentados desta forma aumentam o tempo de cálculo e o armazenamento dos dados durante a execução do programa do modelo, todavia, apresentam resultados mais confiáveis para a discretização usada na seção transversal (Tucci, 1980).

Estimativa do coeficiente de rugosidade de Manning. O coeficiente de resistência de Manning foi estimado a partir das medidas de vazão e dos níveis d'água nas seções de montante e jusante de cada trecho. Os lugares estudados representavam as condições de escoamento dentro do leito, sem transbordamento e canal uniforme na seção de medida.

No período de 03 a 08/03/97, foram realizadas 84 medidas de vazão na maioria das seções, utilizando o

medidor ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) em parceria com a COPEL (Companhia Paranaense de Energia).

O uso desta técnica dispensa o auxílio de equipe de terra para posicionamento da embarcação, com a vantagem de medir a corrente com o barco em movimento, e tempo de levantamento significativamente reduzido. Posteriormente, os dados foram processados com o *software Transect*. Simultaneamente, fizeram-se leituras de níveis que foram avaliadas nestas seções para determinar a declividade da superfície da água e da linha de energia.

Com as vazões e níveis conhecidos, puderam-se estimar os valores de rugosidade na maioria dos trechos empregando-se a equação de Manning (Equação 3) para canais, considerando escoamento uniforme.

Calibração do modelo IPH IV. Para a calibração do modelo, utilizaram-se os dados do posto hidrométrico de Porto São José e os dados obtidos em levantamentos de campo ao longo do canal e em Porto 18. Realizou-se uma campanha de levantamento de dados de níveis e vazões que durou quatorze dias - 03 a 16/03/1997 - abrangendo a maioria das seções. As medidas de vazão foram realizadas com o medidor ADCP e com o molinete. As leituras de níveis foram feitas paralelamente às campanhas de medidas de vazão, percorrendo, uma vez ao dia, nos dois canais do rio, na sequência jusante - montante - jusante, levando em média 4 horas para o percurso e anotação dos níveis. As vazões e níveis medidos foram utilizados no processo de calibração do modelo.

Condições de contorno. Os dados da condição de contorno de montante (Porto São José) foram fornecidos pela Divisão de Operação Hidráulica da CESP.

Estes dados são apresentados através de uma tabela de calibragem, referentes aos períodos 10/1963 a 04/1997, relacionando níveis e descargas desde 2300,00 m³/s e cota 10 cm até 41700,00 m³/s e cota 950 cm em relação ao zero da régua (CESP, 1997). Utilizou-se o hidrograma de vazões como condição de contorno de montante

Um hidrograma de níveis representa a condição de contorno de jusante, seção 52(M05E), em Porto 18. Para verificação suplementar foram usadas as vazões medidas com o ADCP, no período de 03 a 08/03/1997, e com o molinete fluviométrico, de 10 a 16/03/1997. Com o ADCP, puderam-se realizar vários levantamentos em um dia, enquanto que com

o molinete, foi possível apenas uma medida diária de vazão, usando a técnica do barco ancorado. Para o levantamento com esta técnica, necessita-se de uma equipe no barco e um operador em terra. No barco, para as medidas de velocidade, foram usados um molinete preso a um lastro de 50 kg, conjunto de prismas e demais acessórios; em terra, um distanciômetro eletrônico para o posicionamento do barco; e rádios para comunicação. Para o cálculo da vazão na seção, empregou-se o *método de integração do diagrama de velocidades* (Fill, 1987).

Os dados de vazões e níveis, nas seções do contorno externo, foram interpolados para o intervalo de tempo de 12 horas, para ajustar os dados de entrada com os de saída no sistema.

Condições iniciais. As condições iniciais para as variáveis dentro da região delimitada pelos contornos, que necessitam ser especificadas para a solução numérica no tempo inicial, foram estimadas a partir dos valores de níveis e vazões conhecidos em Porto São José e Porto 18.

Mantendo vazão e nível constantes, em Porto São José e em Porto 18, respectivamente, foram feitas simulações para se estimar os valores de vazões e níveis nas seções intermediárias. Após alguns intervalos de tempo, os valores nos trechos convergiram para uma solução de escoamento permanente que pôde ser usada como condição inicial.

Ajuste dos parâmetros. Os parâmetros do modelo usados no ajuste dos níveis e vazões e na divisão do escoamento nas confluências são a área, o raio hidráulico, o coeficiente de rugosidade n e o coeficiente α de perdas nas confluências.

O parâmetro α foi mantido igual a 1 nas confluências, apesar desse parâmetro ter efeito direto na divisão do escoamento.

Durante a calibração, o coeficiente de rugosidade tem grande efeito no nível da seção. Para um rio com confluência, e mesmo hidrograma de montante, quando n aumenta, o nível aumenta para a mesma vazão. Quando n aumenta na seção da confluência e no trecho respectivo, menos escoamento passa pelo trecho, e em vez de aumentar o nível, este pode diminuir (Tucci, 1980).

O ajuste consistiu de um procedimento de tentativas e erros para determinar os coeficientes de rugosidade de Manning, a fim de reproduzir os níveis observados nas seções intermediárias, registrados durante os 14 dias nas 20 seções com réguas. Os trechos intermediários sem réguas não puderam ser ajustados, pois não existiam dados observados.

Para verificação suplementar do ajuste, foram usados os registros de vazão, que variaram em número de 1 a 3 na maioria das seções, obtidos com o ADCP, cuja precisão é melhor que o método tradicional.

Foram feitas várias tentativas computacionais envolvendo a variação dos coeficientes de rugosidade dos pontos computacionais, tal que se obtivesse coincidência dos níveis d'água computados com os observados e reprodução aproximada das vazões observadas. O processo para calibração dos coeficientes foi feito de jusante para montante, e simultaneamente nos dois canais do rio, verificando os níveis e divisão do escoamento, até chegar na seção de montante.

Verificação do ajuste dos parâmetros ao modelo IPH IV. Para verificação dos parâmetros ajustados, foram mantidas as mesmas condições usadas para a calibração: as seções de contorno externas, a discretização do sistema, os dados da geometria das seções, parâmetros e intervalo de tempo de cálculo.

Para as seções internas, foi possível obter dados de níveis apenas nas seções 09(M21J), 13(M29T) e 47(M01) e não houve possibilidade de se medir vazões em qualquer uma delas.

Para a verificação do modelo IPH IV usou-se o final de uma recessão de cheia. Os registros de níveis e descargas conhecidas na seção de montante, Porto São José, foram fornecidos pela CESP. Para a seção de jusante, os dados de níveis e vazões foram obtidos numa campanha que durou nove dias, de 22 a 30/01/95.

A técnica para o levantamento dos dados de vazão foi a tradicional, com o molinete para as medidas de corrente e distanciômetro eletrônico para o posicionamento do barco. Não foi possível realizar medidas nos dias 26 e 28, devido a um temporal e problemas com equipamento.

Para ajustar os hidrogramas de Porto S. José e de Porto 18 para o mesmo tempo, interpolaram-se os dados para o intervalo de tempo de 12 horas. Pela interpolação, as falhas foram preenchidas, e os dados foram utilizados como condições de contorno de montante e de jusante para verificação do modelo IPH IV. As condições iniciais foram estabelecidas usando-se do mesmo procedimento para a calibração.

Resultados e discussões

Configuração do sistema e dados disponíveis. Os pontos computacionais que representam o sistema físico rio Paraná são as seções do esquema da Figura 1, que comunicam-se hidraulicamente através de trechos e confluências formadas pelas ilhas.

O número de pontos computacionais, em número de 60 por comprimento de onda, foi estimado para simular uma onda com período de 12 horas, com a maior profundidade média do escoamento de 4,70 metros e considerando Courant igual a 2. Isto representou uma precisão de 98% na relação entre o amortecimento numérico e amortecimento analítico e entre a velocidade numérica e velocidade analítica, para um fator de ponderação θ igual a 1.

Portanto, o espaçamento entre as seções e o intervalo de tempo de cálculo foram estimados, respectivamente, 4936 metros e 1440 segundos. De acordo com testes realizados, Δx não deve ultrapassar 5.000 metros para que a solução numérica não apresente erros de grande magnitude no amortecimento e na velocidade.

Assim, a distância Δx entre as seções nos trechos variaram entre 300 e 4.550 metros, resultando 52 seções, 42 trechos e 6 confluências para representar o sistema no modelo numérico. Destas 52 seções, em apenas 26 foram determinados os parâmetros do rio, representados pela área, largura, raio hidráulico em função da profundidade.

As rugosidades médias estimadas *a priori* nos principais trechos do rio Paraná são apenas uma estimativa para dar início ao processo de calibração, durante o qual as rugosidades serão ajustadas.

Normalmente, o coeficiente de rugosidade necessita ser obtido para cada seção, e em alguns casos, para cada nível da seção, uma vez que apresenta grande efeito no nível da seção (Tucci, 1980).

Para o rio Paraná, no trecho de estudo e para as condições em que foram feitas as simulações, isto é, escoamento dentro da calha do rio, seções largas e regime fluvial, o valor de n não varia muito com a profundidade, podendo fazer o ajuste por trechos.

Calibração do modelo IPH IV. O período usado para o ajuste do modelo foi de 12 horas de 02/03/97 a 12 horas de 16/03/97. Os registros de níveis e vazões correspondem ao final da curva de recessão, depois da passagem de uma onda de cheia em Porto São José (que inundou toda a planície e cotas mais baixas da margem esquerda), quando o escoamento já estava confinado ao canal

As vazões obtidas durante o período de 03-08/03/97, com o uso do ADCP, foram usadas como verificação suplementar durante a calibração. Os registros foram feitos em intervalos de 24 horas em Porto 18, e nas outras seções a preocupação era obter os dados entre seções consecutivas para estimar a rugosidade.

A obtenção das vazões com o ADCP apresentou vantagens em relação às técnicas tradicionais, principalmente em relação à precisão e duração das medidas. Nas seções com larguras de 1.200 a 2.200 metros, o levantamento não excedeu 30 minutos, enquanto que, com a técnica do barco ancorado, o mesmo trabalho consome a média de 5 a 8 horas.

Na seção de Porto São José foram realizadas apenas três medições de vazão com o ADCP no dia 02/03/97, podendo-se confirmar a curva de calibragem emitida pela CESP.

As condições iniciais para todas as seções foram calculadas assumindo uma condição inicial arbitrária para os níveis e vazões nas seções internas, e executando o programa, mantendo constante os valores nos limites e igual ao primeiro intervalo de tempo.

Para as vazões, repartiu-se o fluxo entre os canais direito e esquerdo nas proporções estimadas nas medidas de vazão de março de 1997, o que permitiu uma convergência mais rápida logo nos primeiros intervalos de tempo.

Ajuste dos parâmetros. O modelo representa uma extensão de 56,50 km no canal direito do rio e de 53,40 km no canal esquerdo, contendo 52 pontos computacionais, incluindo o canal do Gaúcho, que liga os dois canais.

As variações no fluxo do rio devem-se principalmente à operação das barragens a montante de Porto São José e às chuvas nas cabeceiras. Variações mais localizadas no nível, provavelmente, devem-se aos pequenos tributários ou às águas do escoamento superficial dos terrenos diretamente para o rio, que não chega a 5% da vazão total, pelo menos para o período usado para calibração.

Após a cheia de fevereiro de 1997, durante a campanha de medidas de vazões com o ADCP, fizeram-se medições na desembocadura do rio Baía e na foz do canal Ipuitã, que liga o rio Ivinheima ao rio Paraná, e constatou-se que estas descargas não chegam a 2% da vazão total do rio Paraná, e menos de 5% em relação à vazão do canal direito. Em função desses dados, portanto, não foi considerada a contribuição lateral devida a estes tributários.

No canal esquerdo, o rio Patrão é o tributário mais significativo, cuja foz não é percebida, assim como da maioria dos córregos.

A principal divisão do escoamento ocorre entre as seções 03, 04 e 11. Através de um balanço global no sistema, verifica-se que 75% da vazão de Porto São José é dirigida para o canal da margem esquerda do lado do Estado do Paraná, e 25% para o canal da margem direita do lado do Estado do Mato Grosso

do Sul. Estas vazões voltam a encontrar-se na seção 19(M20), onde 20% da vazão do canal esquerdo passa para o canal direito, aumentando desta forma o fluxo do lado do Mato Grosso do Sul. No canal do Gaúcho, 5% da vazão do canal esquerdo passa novamente para o canal direito do rio, equilibrando desta forma as vazões entre os dois canais, até encontrarem-se novamente em Porto 18.

Foram feitas várias tentativas computacionais, envolvendo a variação dos coeficientes de rugosidade dos pontos computacionais. Para as confluências, adotou-se o mesmo critério usado por Tucci (1980) no Delta do Jacuí, no Rio Grande do Sul: aumentando a rugosidade, o nível aumenta para a mesma vazão; aumentando a rugosidade na seção da confluência e no trecho respectivo, o escoamento diminui no trecho, e, ao contrário de aumentar o nível, este pode diminuir.

Através do processo de tentativas e erros, os valores de *n* foram ajustados para o período de 14 dias, até obter-se a melhor aproximação entre os níveis d'água computados com os observados e reprodução aproximada das vazões observadas nas seções que possuíam registros de vazões e/ou níveis.

Os resultados do ajuste entre os valores calculados e os observados para níveis e vazões em todas as seções são apresentados nas Figuras 2 a 8. A diferença média entre os níveis computados e os observados foi 1,95 cm, sendo que a máxima foi 6,00 cm e a mínima 1,00 cm. Esse resultado mostra um bom ajuste do modelo ao fenômeno simulado.

Na seção 48(M03) o ajuste não foi tão bom como nas demais. Entretanto, essa diferença média na seção foi de 6,5 cm e a máxima de 11,3 cm, indicando que, para obter-se o ajuste, os valores de níveis observados deveriam ser, em média, 6,5 cm menores. Como o primeiro lance da régua foi arrancado e a leitura de níveis foi feita em relação à segunda régua, pode ter ocorrido problemas no nivelamento, o que não foi possível verificar.

Na seção 13(M29T), devido um córrego 200 metros a jusante da régua, algumas leituras da régua foram duvidosas, tendo que se tomar precauções nas medidas.

As vazões registradas durante o mesmo período foram verificadas quanto à continuidade de volume em Porto 18. Comparando os hidrogramas de Porto S. José e Porto 18, Figuras 6 e 8, observa-se um aumento das vazões em Porto 18, a partir do dia 11/03. Esta diferença, determinada pela integração das hidrógrafas, representa em média 7% a mais da vazão em Porto São José.

Há registro de aumento dos níveis no dia 9, somente nas seções 48(M03) e 49(M04), logo a

montante de Porto 18, voltando a diminuir no dia 11. No dia 10 não foi feito registro de níveis ou vazões. Não se tem informações sobre contribuição de águas subterrâneas ou algum rio a montante da seção 48(M03), a não ser um pequeno córrego sem identificação, e a foz do rio Patrão, 7 km a montante desta seção e 2 km a montante da seção 47(M01). Logo, este aumento pode ser oriundo deste pequeno córrego, ou do próprio rio Patrão, com atraso. Este aumento na passagem da onda a 40 km de Porto São José foi computado como contribuição lateral a montante da seção 48(M03), para a calibração do modelo.

Em Porto São José, a variação do nível no período estudado de 14 dias não foi grande, sendo a máxima igual a 63 cm. No canal direito, essa variação média foi de 42 cm, no canal esquerdo 51 cm, e no canal do Gaúcho, 62 cm.

Apesar dos poucos dados de vazões observadas, pode-se determinar o erro das vazões calculadas em relação a essas. No canal direito, a diferença nas vazões esteve na ordem de 4,5% abaixo dos valores registrados, entre as seções 09(M21J), jusante do rio Baía, e 25(M12), montante do canal do Gaúcho. No canal esquerdo, a diferença esteve na ordem de 3,0% acima das vazões observadas, mas somente no trecho superior. Nos trechos inferiores os valores quase se ajustam.

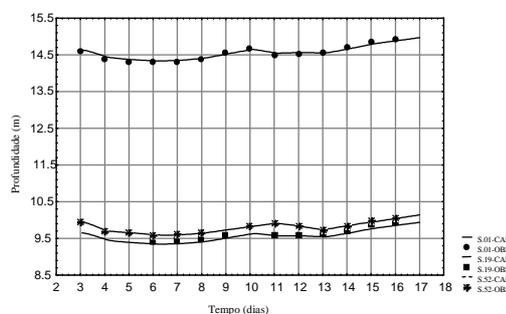


Figura 2. Profundidades medidas e computadas nas três seções do canal principal

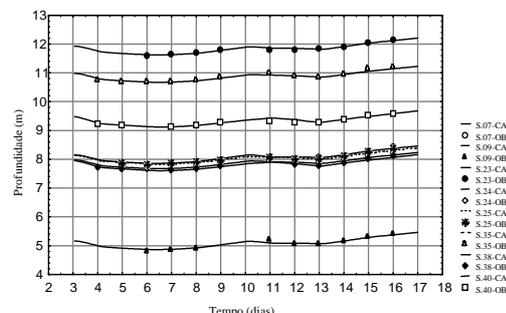


Figura 3. Profundidades medidas e computadas nas seções do canal direito: trechos superior e inferior

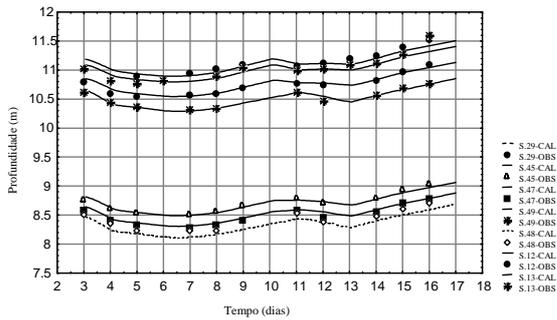


Figura 4. Profundidades medidas e computadas nas seções do canal esquerdo: trechos superior e inferior

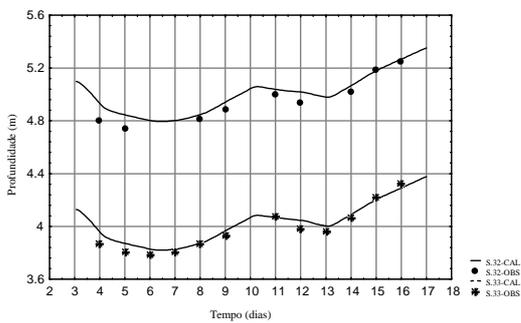


Figura 5. Profundidades medidas e computadas nas seções do canal do Gaúcho

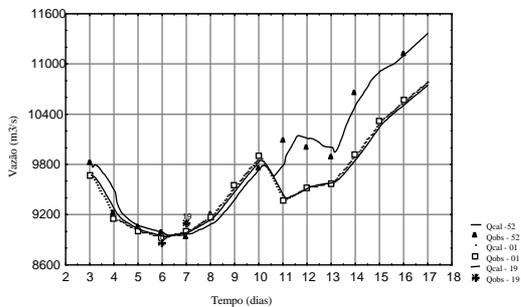


Figura 6. Descargas medidas e computadas nas três seções do canal principal

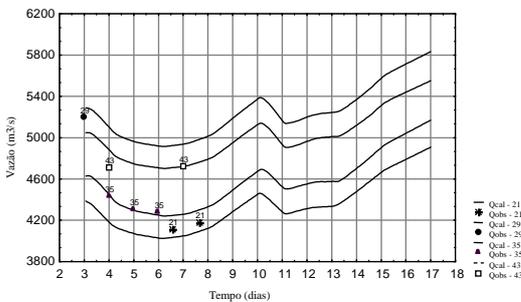


Figura 7. Descargas medidas e computadas nas seções nos canais direito e esquerdo, logo após a terceira confluência, e depois da ligação com o canal do Gaúcho

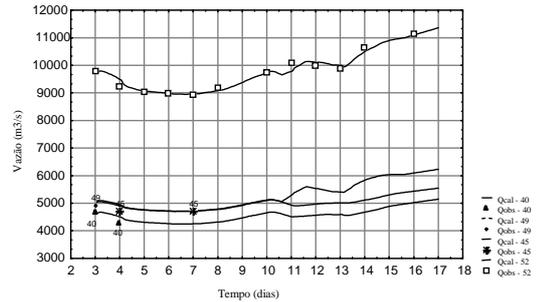


Figura 8. Descargas medidas e computadas na saída da última confluência. Na seção 49(M04), verifica-se o aumento da descarga pela contribuição lateral propagando para a seção 52(M05)

Verificação do ajuste dos parâmetros do modelo IPH IV

Depois do ajuste dos parâmetros, usando um período de 14 dias, é necessário verificar se estes parâmetros ajustados podem ser usados para outros períodos de simulação.

O período disponível é de 9 dias, de 22/01/95 a 30/01/95, no final de uma recessão de cheia, quando a variação de nível foi de 1,15 metros.

Foi possível obter dados de níveis e vazões somente na seção de contorno de jusante, em Porto 18, durante campanha realizada neste período. Para as seções internas, obteve-se apenas dados de níveis nas seções 09(M21J), 13(M29T) e 47(M01). Não foi possível o registro de níveis em todas as réguas e menos ainda de vazões em qualquer uma destas seções internas.

A técnica usada para as medidas de vazão em Porto 18 foi com o molinete para as medidas de corrente e distanciômetro eletrônico para o posicionamento do barco. Não foi possível realizar medidas nos dias 26 e 28, devido um temporal e problemas com equipamento.

Os dados de Porto São José, fornecidos pela CESP, e de Porto-18, foram interpolados para cada 12 horas. Pela interpolação, as falhas de Porto 18 foram preenchidas, os tempos dos dados ajustados e utilizados como condições de contorno de montante e de jusante, para verificação do modelo IPH IV.

As vazões registradas em Porto São José durante o período foram verificadas quanto à continuidade de volume em Porto 18. Comparando os hidrogramas de Porto S. José e Porto 18 (Figura 9), a diferença determinada pela integração das hidrógrafas representa, em média, 0,34% a mais da vazão em Porto São José, o que não é significativo.

A discretização, dados da geometria das seções, parâmetros e intervalo de tempo de cálculo foram os mesmos usados na calibração.

Na verificação, a maior diferença de nível foi de 12,9 cm na seção 09(M21J). Esta seção foi a que apresentou maior desvio dos dados calculados com os computados, com um valor médio de 9 cm. Nesta seção 09(M21J), somente duas leituras foram aproveitadas e, ainda assim, foram duvidosas, porque o morador local retirou a régua do lugar.

Nas outras seções, a diferença média variou de 1,1 a 8,6 cm.

Como o levantamento dos dados de 1995 foi confiado aos moradores locais, os registros de algumas seções foram duvidosos. Em pelo menos três seções, não se pôde aproveitar os dados, porque ou não foi anotada a data, ou o registro era muito confuso.

Os resultados das seções com registros de níveis são apresentados na Figura 10. A solução obtida com o modelo matemático IPH IV mostra um bom ajuste dos parâmetros com os valores registrados no rio Paraná entre Porto São José e Porto 18, para os propósitos a que se destinam estes resultados.

Com os valores de rugosidade ajustados, fez-se comparação com os obtidos experimentalmente (Tabela 2). Nos trechos de canal principal das seções 01(M28) e 19(M20T), as diferenças foram grandes. Na seção 52(M05) não houve alteração na rugosidade.

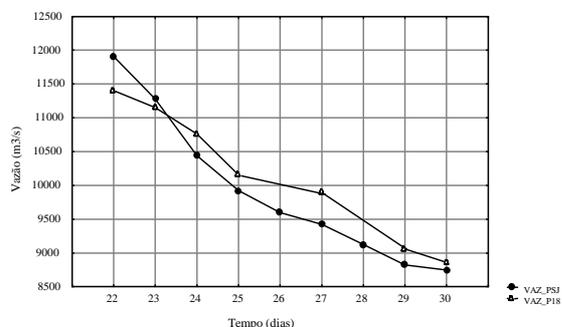


Figura 9. Hidrogramas das seções de contorno: Porto São José e Porto 18 (22-30/01/95)

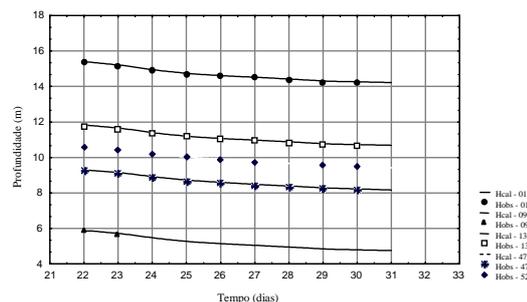


Figura 10. Valores de níveis calculados e observados nas seções 01(M28), 09(M21J), 13(M29T), 47(M01) e 52(M05E)

No canal direito, 50% das seções mantiveram a rugosidade calculada, a maioria do trecho inferior. As restantes tiveram diferença entre 0,002 e 0,017 com o valor do ajuste.

No canal esquerdo, manteve-se o mesmo percentual e a variação foi de 0,001 a 0,013. Todas as seções do trecho inferior não alteraram a rugosidade. As seções que apresentaram maior diferença foram as do canal principal 01(M28), 02(M24) e 19(M20T); nas seções das confluências, a montante e jusante da seção 19; nas seções 23(M19) e 24(M18); e no canal do Gaúcho. Este erro era esperado, pois procurou-se estimar o valor de *n*, considerando trechos uniformes, o que para a maioria dessas seções não ocorria.

Em termos médios, por trecho, o canal direito inferior e o esquerdo inferior mantiveram a mesma rugosidade média.

Resultados finais

A primeira dificuldade para a calibração de modelos hidrodinâmicos é a aquisição dos dados básicos, e a segunda está relacionada à obtenção dos dados que validem o modelo, tais como: o coeficiente de resistência do canal e os registros de níveis e vazões.

Tabela 2. Comparação entre os valores médios estimados para rugosidade obtida experimentalmente e a ajustada pela calibração do modelo

Trechos	Seções	Rugosidade média experimental	Rugosidade média ajustada	Velocidade média (m/s)	Vazão média (m³/s)
Trecho do canal principal	1 - 3	0.0243	0.0120	0.988	9154
Trecho de canal principal	18 - 20	0.0310	0.0500	0.779	8977
Trecho de canal principal	52	0.0270	0.0270	0.731	9200
Canal direito					
Trecho superior do canal direito	4-10	0.0185	0.0230	0.650	2037
Trecho inferior do canal direito	21-41	0.0249	0.0249	0.747	4196
Canal esquerdo					
Trecho superior do canal esquerdo	11-17	0.0263	0.0190	0.914	7227
Trecho inferior do canal esquerdo	27-51	0.0285	0.0285	0.750	4868
Canal do Gaúcho	31-33	0.0245	0.0290	0.421	220

O emprego do ADCP permitiu realizar medidas de vazões nas seções de discretização do modelo rio Paraná, o que seria impossível empregando o método convencional.

Os resultados obtidos na calibração comparados com os registros obtidos com o ADCP, mostraram um bom ajuste do modelo ao fenômeno considerado, em que o erro máximo para as vazões foi de 4,5% e 5,4 cm para o nível. Não foi considerada a contribuição lateral devido aos tributários mais significativos, por representar menos que 2% da vazão total do rio.

Os coeficientes de rugosidade para os trechos de canal, estimados empregando-se a equação de Manning, foram utilizados inicialmente na calibração do modelo matemático que simula o escoamento no rio, sendo, então, ajustados pelo próprio modelo. Comparando os valores do coeficiente de resistência observados e os ajustados pelo modelo, tanto no canal direito como no esquerdo, 50% das seções mantiveram a rugosidade calculada, a maioria do trecho inferior, que em termos médios, por trecho, mantiveram a mesma rugosidade média.

A distribuição do fluxo através do sistema ocorre com a principal divisão do escoamento na primeira confluência, no qual 75% da vazão de Porto São José é dirigida para o canal esquerdo (lado do Estado do Paraná), e 25% para o canal direito (do lado do Estado do Mato Grosso do Sul). Estas vazões voltam a se encontrar na segunda confluência, onde 20% da vazão do canal esquerdo passa para o canal direito, aumentando desta forma o fluxo do lado do Mato Grosso do Sul. No canal do Gaúcho, 5% da vazão do canal esquerdo passa novamente para o canal direito do rio, equilibrando desta forma as vazões entre os dois canais, até se encontrarem novamente em Porto 18.

Reconhecimento

Este trabalho foi desenvolvido com o auxílio financeiro do PADCT/CIAMB e com o apoio do Curso de Pós-graduação *Ecologia de Ambientes*

Aquáticos Continentais - PEA, através da alocação nos recursos físicos e humanos; do IPH - *Instituto de Pesquisas Hidráulicas - da Universidade Federal do Rio Grande do Sul*, com o Modelo Hidrológico-hidrodinâmico IPH IV e orientação no seu uso; da *Companhia Elétrica São Paulo - CESP*, pelo fornecimento dos dados históricos fluviométricos; e da *Companhia Paranaense de Energia - COPEL*, com o empréstimo do ADCP e pessoal técnico.

Referências bibliográficas

- Cesp. *Boletim de dados de vazão e cotas do rio Paraná - P. S. José*. São Paulo: Cesp. Divisão de Operação Hidráulica / Setor de Dados Hidrológicos, 1997.
- Chaudhry, M. Hanif. *Open-channel flow*. New Jersey: Prentice Hall, 1993.
- Chow, V.T. *Hidraulica de los canales abiertos*, México: Editorial Diana, 1982.
- Cunge, J.A. Applied mathematical modeling of open channel flow. In: Mahmood, K.; Yevjevich, V. (eds). *Unstead flow in open channels*. Fort Collins: Water Resources Publications, 1975. v.1.
- Cunge, J.A.; Holly Jr., F.M.; Verwey, A. *Practical aspects of computational river hydraulics*. Boston: Pitman Advanced Publishing Program, 1980.
- Fill, H.D. Informações hidrológicas. In: Barth, F.T. *et al. Modelos para gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel; ABRH, 1987. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).
- French, R.H. *Open-channel hydraulics*. New York: McGraw-Hill Book, 1987.
- Tucci, C.E.M. *Hidrodinâmica de rios e canais*. São Paulo. Departamento de Águas e Energia Elétrica: USP. Escola Politécnica. 202p. 1980. (Comunicação técnica; n.9).
- Tucci, C.E.M. Modelos matemáticos em hidrologia e hidráulica. *Rev. Brasil. Engenh.*, 2(2/3):2-113, 1986.
- Tucci, E.M. Modelos determinísticos. In: Barth, F.T. *et al. Modelos para Gerenciamento de recursos hídricos*. São Paulo: Nobel; ABRH, 1987. (Coleção ABRH de Recursos Hídricos).

Received on November 22, 1999.

Accepted on November 30, 1999.