

# planejamento da qualidade da água de uma rede de rios por modelo matemático: Delta do Jacuí

\* Carlos E. M. Tucci

## INTRODUÇÃO

O comportamento dos rios poluídos é complexo, análise superficial do problema pode levar a uma solução com muitas incertezas. O modelo matemático é utilizado para permitir uma análise mais precisa deste tipo de problema. O modelo permite estudar as diferentes alternativas do planejamento da qualidade da água do rio: regulamentar a concentração dos poluentes dos despejos lançados no curso d'água, analisar o efeito de diluição de um reservatório, cálculo dos trechos de concentração crítica, efeito da maré ou represamento e dos despejos na qualidade do rio, etc.

Quando o modelo é utilizado como ferramenta para previsão, em termos de planejamento, este modelo deve reproduzir os processos naturais dentro de uma precisão aceitável. A precisão obtida é função dos dados disponíveis e da formulação do modelo. A incerteza no registro, processamento dos dados e a quantidade dos dados disponíveis pode provocar resultados não confiáveis.

Tucci (1980) apresenta uma revisão e aplicabilidade dos modelos existentes. Gransrud et al (1976) apresenta uma avaliação de 14 modelos de qualidade de água, discutindo a capacidade, limitação, custo e a disponibilidade dos modelos com vistas a aplicação em planejamento.

Neste trabalho foi utilizado um modelo que simula OD e DBO numa rede de rios sujeito a escoamento não-permanente. A rede de rios em estudo é o Delta do Jacuí, sujeito a altos níveis de poluição devido a qualidade da água proveniente de seus formadores.

A seguir é descrito de forma sumária as principais partes que compõem o modelo. Na aplicação é descrito o Delta do Jacuí e formuladas algumas opções para análise do problema, visando de momento, mostrar a aplicabilidade deste tipo de metodologia.

## METODOLOGIA

Modelos baseados em escoamento permanente têm sido apresentados na literatura, como QUAL-1, desenvolvido pelo Texas Water Development Board (1971), DOSAG entre outros. Esses modelos são úteis quando esta condição de escoamento pode ser assumida num rio. Esta condição de escoamento permanente não pode ser assumida, para uma solução aceitável, em estuários onde o escoamento

muda continuamente, em rios sujeitos a poluição devido a cheias urbanas ou quando ocorre erosão nos depósitos bentônicos.

Tucci (1978) apresentou o modelo aqui utilizado capaz de simular sistemas sujeitos a escoamento não-permanente. O modelo é composto de duas partes: hidráulica e de transporte de massa. As duas equações

hidráulicas são resolvidas onde vazão e área são determinados para que a equação de transporte de poluente possa ser resolvida.

As equações para escoamento gradualmente variado são a equação da continuidade e de momentum. A primeira é baseada na conservação de massa e a segunda na conservação de momentum. As equações são:

$$\frac{\partial Q}{\partial X} + \frac{\partial A}{\partial t} = q_e \quad (1)$$

$$\frac{\partial Q}{\partial t} + \frac{\partial(QV)}{\partial X} + gA \frac{\partial Y}{\partial X} = gA (S_0 - S_f + q_e V_e / Ag) \quad (2)$$

onde Y é a profundidade; V é a velocidade; S<sub>0</sub> é a declividade do fundo; S<sub>f</sub> declividade da linha de fricção; A área da seção transversal; Q a vazão; t é o tempo; X a distância horizontal ao longo do canal; q<sub>e</sub> vazão lateral; V<sub>e</sub> da velocidade da entrada lateral.

O transporte de massa no rio é regido pelos processos de advecção, difusão e dispersão. A equação de transporte unidimensional é:

$$\frac{\partial}{\partial t} (AC) + \frac{\partial(QC)}{\partial X} = \frac{\partial}{\partial X} (EA \frac{\partial C}{\partial X}) + S_i \quad (3)$$

onde E é o coeficiente de dispersão longitudinal, S<sub>i</sub> são as perdas e ganhos do sistema, C é a concentração da substância.

O termo S<sub>i</sub> para DBO é:

$$S_i = (K_1 + K_2)AC + AL_a + q_e(DBO) \quad (4)$$

onde K<sub>1</sub> é o coeficiente de Biodegradação carbonácea, K<sub>2</sub> é o coeficiente de sedimentação, L<sub>a</sub> é a proporção de adição de DBO no trecho, C<sub>e</sub>(DBO) concentração de DBO no escoamento lateral.

O termo S<sub>i</sub> para OD é:

$$S_i = K_1 AC_{DBO} + K_2 A(C_s - C) - D_b A + q_e C_e(OD) \quad (5)$$

onde C<sub>DBO</sub> é a concentração de DBO, K<sub>2</sub> é o coeficiente de reaeração, C<sub>s</sub> é a concentração de saturação de OD, D<sub>b</sub> é a remoção de oxigênio devido aos depósitos bentônicos, respiração de plantas e aumento de oxigênio devido a fotossíntese.

As equações hidráulicas e a equação de transporte são resolvidas em cada intervalo de tempo por um método implícito de diferenças finitas. A formulação detalhada da solução é apresentada em Tucci (1978).

O modelo permite simular DBO e OD num rio ou sistema de rios, onde são calculadas as vazões, níveis e concentração no tempo nas diferentes seções utilizadas.

Os dados necessários para a simulação são:

— Batimetria e nivelamento das seções do curso d'água.

- Nível ou vazão na seção no extremo de montante no período de tempo de estudo.
- Nível, vazão ou curva-chave na seção de jusante.
- Concentração das seções de montante, jusante e das contribuições laterais no período em estudo.

A vantagem do modelo é de que simula utilizando as equações baseadas nas características físicas do rio com o mínimo de empirismo e pode ser modificado sem maior esforço para simular outros parâmetros.

\* Professor do Instituto de Pesquisas Hidráulicas da Universidade Federal do Rio Grande do Sul

## APLICAÇÃO

### Descrição do Delta do Jacuí

O Delta do Jacuí está localizado no Rio Grande do Sul, onde quatro rios escoam para o Delta. São eles os rios Jacuí, Caí, Sinos e Gravataí. A área total da bacia na seção F (Figura 1) é da ordem de 100.000 km<sup>2</sup> o que representa um terço da área do Estado.

O rio Jacuí é o principal, a sua área representa 80% da bacia total. O Delta do Jacuí é um complexo de trechos, confluências e bacias de armazenamento com uma área aproximada de 42 km<sup>2</sup>. A distância entre confluências é pequena (pequenas ilhas), as larguras são grandes (cerca de 1 000 m nos canais principais) e a declividade pequena. O delta está distante cerca de 250 km do mar. Porto Alegre está localizada na margem leste do Delta.

Os níveis no Delta, durante o período seco, apresentam uma variação cíclica, provocando inversão de vazão nos braços e nos formadores do Delta do Jacuí.

Os rios Gravataí e Sinos trazem a poluição de esgotos domésticos e industrial lançados sem tratamento nestes rios. O rio Jacuí poderá em futuro próximo, transportar a poluição do Polo Petroquímico em fase de instalação. A interação da poluição dos formadores como o escoamento complexo no Delta dificulta qualquer análise mais simples do comportamento dos níveis de poluição próximo a Porto Alegre, onde a água é utilizada para recreação, abastecimento, etc.

### Discretização do sistema e definição dos parâmetros

O Delta do Jacuí foi discretizado segundo as 64 seções apresentadas na figura 1. A batimetria e nivelamento das seções, distância entre essas seções, dados de vazão e nível para ajustamento e verificação da parte hidráulica do modelo ao Delta foram obtidos do relatório IPH (1978).

O ajustamento e verificação da parte hidráulica é apresentada por Tucci (1978).

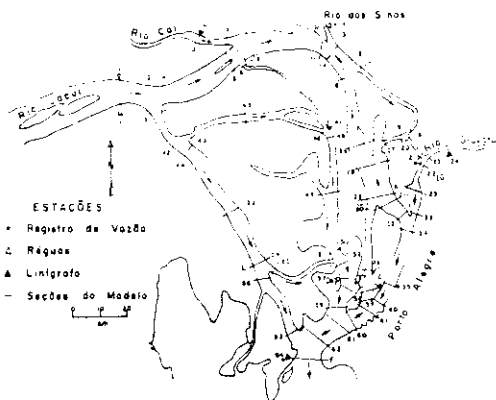


FIGURA 1 — Delta do Jacuí

Os parâmetros a serem definidos, relativo a equação de transporte são: coeficiente de dispersão longitudinal, coeficiente de reabsorção, coeficiente de degradação  $K_1$ .

Dailey e Harleman (1972) usaram a fórmula modificada de Taylor para estimar este coeficiente no rio James. Os valores obtidos pela fórmula de Taylor modificada multiplicados por três, para levar em conta as irregularidades do canal, produziram bons resultados em maré alta, mas não tão bons para maré baixa. Amein e Galler (1978) obtiveram valores de ordem de 0,65 m<sup>2</sup>/s a 3,36 m<sup>2</sup>/s, para o rio Chowan. Os autores adotaram 7,8 m<sup>2</sup>/s devido a dispersão ligada ao efeito do vento e inversão de corrente. O Delta do Jacuí é muito irregular, com um grande número de ilhas e confluências. O valor adotado no teste foi de 10 m<sup>2</sup>/s.

O valor de  $K_1$  utilizado foi de 0,1/dia, valor próximo aos adotados no Rio dos Sinos.

As equações para determinação do coeficiente de reabsorção como a de O'Connor e Dobbins (1958) estimam valores pequenos deste coeficiente devido as pequenas velocidades. Essas fórmulas foram desenvolvidas para curso d'água normal. Neste teste foi adotado o valor de 0,5/dia.

### Análise de Alternativas

Na análise das alternativas foram adotadas as seguintes simplificações:

- Vazão constante entrando no Delta através dos rios formadores no total de 150 m<sup>3</sup>/s.
- A variação de vazão na seção de jusante (seção F) foi definida por dois polinômios de segunda ordem; um para o período de vazão positiva e outro para o período de vazão negativa. A partir de dados observados de vazão estimou-se que o período de vazão positiva é de 16 horas e o período negativo é de 8 horas. Na figura 2 é apresentado o hidrograma resultante da seção F. O volume total que entra no Delta através das seções M, J, R e G durante 24 horas é obtido pela vazão total de 150 m<sup>3</sup>/s multiplicada pelo número de segundos do dia que deve ser igual ao volume que sai, dado pela integração da curva da figura 2. Portanto, assume-se que o armazenamento no Delta é igual a cada 24 horas. A partir destas

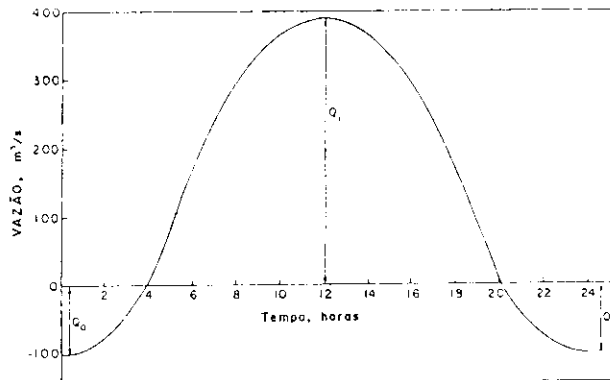


FIGURA 2 — Vazão Gerada na Seção F

considerações as vazões podem ser calculadas.

- A concentração dos rios que escoam para o Delta foram adotadas constantes durante o período de simulação.
- Não foram consideradas contribuições intermediárias de poluição.

### Opção 1

Os rios que apresentam o mais alto nível de poluição são os rios Gravataí e o Sinos. Foram adotadas as concentrações de DBO e OD na foz do Rio Gravataí com o Delta (seção G) como sendo  $C_{DBO} = 11$  mg/l e  $C_{OD} = 1$  mg/l. No Rio dos Sinos (seção R)  $C_{DBO} = 9$  mg/l e  $C_{OD} = 1,5$  mg/l. As concentrações das seções J e M, Rio Caí e Jacuí foram adotadas próximas as de água sem poluição. As condições de escoamento dos rios formadores foram  $Q_M = 100$  m<sup>3</sup>/s,

$Q_R = 20 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q_G = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esses valores foram mantidos constantes para 27 horas de simulação. Os resultados obtidos mostram que a concentração da DBO é alta próxima do rio fonte de poluição e diminui após misturar-se com as águas provenientes dos rios Jacuí e Caf. A figura 3 mostra o perfil de concentração ao longo do Porto até a seção F. A curva *a* mostra o perfil quando o escoamento na seção F é maior valor, em valor absoluto, da faixa de valores negativos. A curva *b* mostra o perfil quando na seção F o escoamento é máximo. É possível observar da referida figura que entre as seções 33 e 34 ocorre um repentino decréscimo de concentração de DBO causado pela mistura com água menos poluída. Na condição *a* ocorre represamento devido a vazão negativa, aumentando a concentração próxima da seção G, diminuindo para a situação *b*, quando a vazão é positiva na seção F.

O perfil de concentração de DBO da seção R no Rio dos Sinos até a seção 41 à jusante está na figura 4, para este teste. Neste caso também ocorre o decréscimo grande de concentração entre as seções 12 e 13 quando as águas do Rio dos Sinos se misturam com a do Delta. Na seção 28 ocorre um pequeno aumento de DBO causado pela água poluída do Gravataí proveniente do laço 21-20-19-27. Também, o pequeno aumento nas seções 30 e 29 é devido ao efeito de dispersão da junção 32-33-34. O mesmo processo ocorre nas seções 38 e 39 próximo a confluência 39-40-41. A figura 5 mostra o perfil de concentração de OD para o teste.

#### Opção 2

Foram aumentadas as vazões dos rios mais poluídos e diminuídas as vazões dos

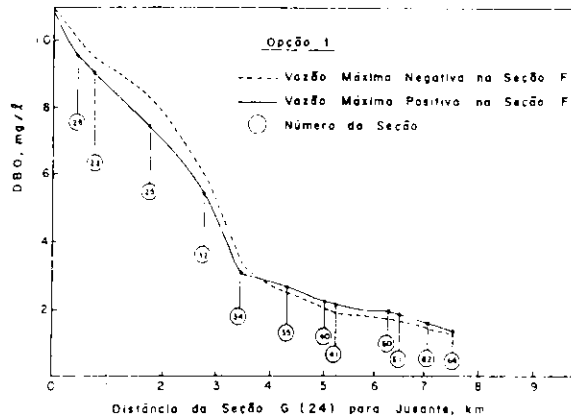


FIGURA 3 – Perfil de Concentração do DBO ao longo do Porto

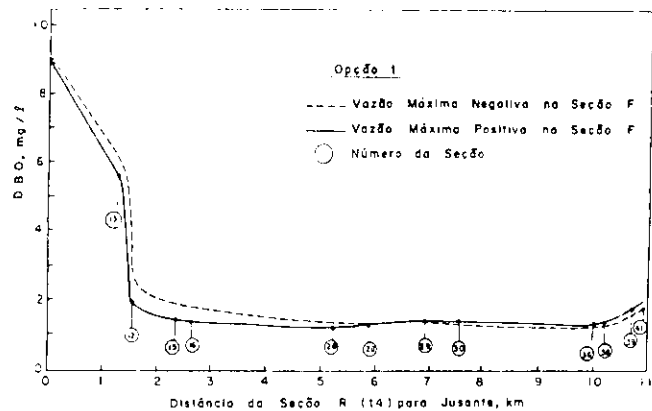


FIGURA 4 – Perfil de Concentração de DBO do Rio dos Sinos até a seção 41

rios Jacuí e Caf para:  $Q_M = 70 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_J = 10 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_R = 35 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q_G = 35 \text{ m}^3/\text{s}$ . As concentrações foram mantidas as mesmas do teste anterior.

A figura 6 mostra o perfil de acordo com as opções 1 e 2. O aumento no perfil da opção 2 ocorre principalmente nas seções 24 e 34 enquanto que nas seções e jusante o efeito é pequeno.

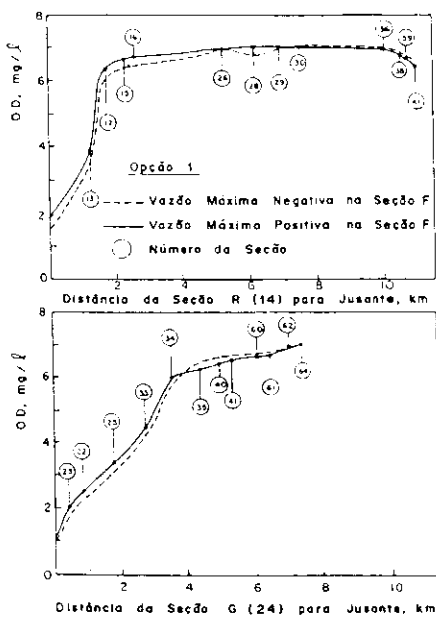


FIGURA 5 – Perfil de OD

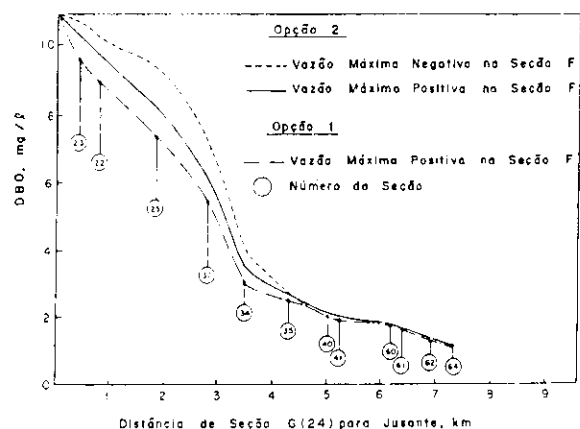


FIGURA 6 – Perfil de DBO para opções 1 e 2

### Opção 3

A terceira opção testada foi de aumentar a concentração de DBO do Rio Cai para 9 mg/l e as condições de escoamento foram modificadas para  $Q_M = 90 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_J = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ ;  $Q_R = 20 \text{ m}^3/\text{s}$  e  $Q_G = 20 \text{ m}^3/\text{s}$ . Esta condição afeta principalmente o trecho entre as seções 8 e 29. Não existe um aumento significativo de concentração após a seção 28.

### Opção 4

Neste último teste foi aumentada a concentração de DBO Jacuí para 4 mg/l, mantendo-se as mesmas vazões de entrada da opção 3. Na figura 7 são apresentados os perfis de todas as opções entre as seções 10 e 41.

### Análise dos Resultados

Esta análise é baseada em duas considerações:

- As fontes de poluição são somente as utilizadas no estudo;
- Os dados gerados são confiáveis.

A concentração dos rios que entram no Delta afetam principalmente o teor de DBO nas seções próximas a estas entradas e são maiores para o período de vazão negativa. Durante o período de escoamento positivo ou níveis menores na seção de justante, existe fluxo para diluição, o que faz deste período o mais conveniente para o despejo de poluição.

Na tabela 1 estão listadas as concentrações máximas de DBO para cada seção nas diferentes opções. Por exemplo, a concentração máxima para a seção 25 ocorreu na opção 2 quando a vazão poluente do Gravataí era maior, o que tem efeito direto nesta seção. Na seção 57 o maior valor ocorre na opção 4 quando o rio Jacuí tem a concentração máxima. Para as seções próximas a seção F e nos trechos 42-53-56 e 48-50-57 não existe mudança significativa quando a poluição dos rios Cai, Sinos e Gravataí aumentam. O rio Cai tem um efeito maior sobre as concentrações das seções 8 até 28. O rio dos Sinos afeta principalmente as seções 12 a 28 e o Gravataí as seções entre 22 e 35. O rio Jacuí é a principal fonte de água no Delta e se o seu nível de qualidade diminui, a maioria das seções do Delta são afetadas.

### CONCLUSÃO

A utilização de um modelo matemático de Qualidade da Água para planejar uma área diminuem as incertezas e permite quantificar as alternativas de sistemas complexos como o do Delta do Jacuí.

A análise feita para o Delta do Jacuí visou principalmente mostrar a aplicabilidade desta ferramenta a um caso complexo, mostrando a importância de se levar em conta a não permanência do fluxo.

Para um estudo mais completo do Delta do Jacuí se faz necessário um levantamento maior de dados da área.

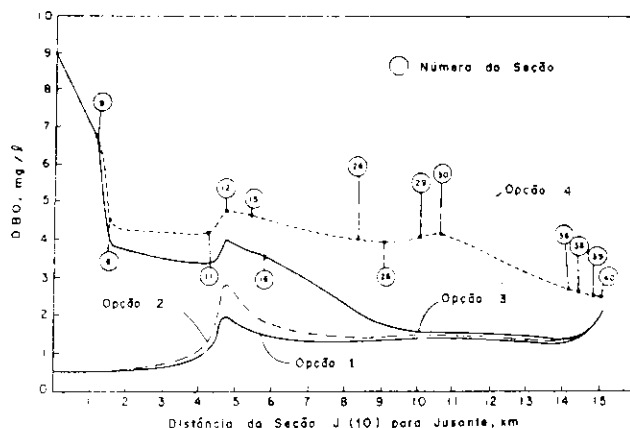


FIGURA 7 – Perfil de DBO para as quatro opções

TABELA 1

### CONCENTRAÇÃO MÁXIMA DE DBO EM ALGUMAS SEÇÕES

SEÇÃO	OPÇÃO 1	OPÇÃO 2	OPÇÃO 3	OPÇÃO 4
25	8,38	9,53	8,46	8,58
29	1,55	2,04	2,03	4,00
36	1,38	1,40	1,44	3,05
61	1,72	1,80	1,75	2,33
57	0,92	0,95	0,94	2,0
C*	2,67	4,67	3,27	5,67

C\* é a concentração média da DBO do fluxo que entra o Delta do Jacuí

### BIBLIOGRAFIA

AMEIN, M. e W. S. GALLER. 1978. Water Quality Management Model for the Lower Chowan River, project B-077-NC North Carolina State University.

DAILEY, J. e HARLEMAN, D. 1972. Numerical Model for the Prediction of Transient Water Quality in Estuary Network, M.I.T.

GRANSRUD et al. 1976. Evaluation of Water Quality Models; A Management Guide for Planners, U.S. EPA, EPA – 600/05-76-004.

IPH. 1977. Estudo do comportamento Hidráulico do Rio Guarba e do Delta do Jacuí, relatório nº 5. IPH, Porto Alegre.

O'CONNOR, D.J. e W.E. DOBBINS. 1978. Mechanism of Recreation in Natural Stream, Transactions ASCE, Volume 123, nº 2934.

Texas Water Development Board. 1971. Simulation of Water Quality in Streams and Canals, Report 128.

TUCCI, Carlos E. M. 1978. Hydraulic and Water Quality Model for a River Network, Ph. D. dissertation, Colorado State University.