

MODELO MATEMÁTICO PARA GERENCIAMENTO DE QUANTIDADE E QUALIDADE DA ÁGUA EM RIOS. UM ESTUDO DE CASO: BACIA DO RIO PIRACICABA

Celimar Azambuja Teixeira ¹

Rubem La Laina Porto ²

RESUMO

Atualmente, uma das maiores causas da escassez dos recursos hídricos, principalmente nos grandes centros urbanos, deve-se a degradação da qualidade da água, a qual é decorrente dos lançamentos inadequados de efluentes industriais e esgotos domésticos. Dentro desse contexto, o desenvolvimento e a aplicação de modelos que consideram aspectos de quantidade e qualidade de água são extremamente necessários para resolver este problema de maneira racional. Desta forma, o objetivo do presente trabalho consiste no desenvolvimento de uma ferramenta computacional capaz de gerenciar de forma integrada os aspectos de quantidade e qualidade de água em uma bacia hidrográfica, considerando os parâmetros de enquadramento dos corpos d'água, de acordo com a resolução CONAMA 357/2005. Essa ferramenta computacional consiste em um modelo matemático para o gerenciamento de recursos hídricos e pode ser aplicado em qualquer bacia hidrográfica, porém especificamente neste estudo o modelo foi aplicado na bacia do rio Piracicaba, sendo que esta apresenta inúmeros conflitos pelo uso da água. A estrutura do modelo AcquaNet é composta por modelos distintos de quantidade e qualidade de água, porém apresentando a capacidade de interagir entre si. Os aspectos de quantidade de água são tratados através da otimização das vazões em uma bacia hidrográfica. Já o modelo de qualidade de água é capaz de determinar as concentrações de diversos constituintes de qualidade de água, tais como DBO, OD, coliformes totais, fósforo total, algas, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrato em diversos trechos dos rios que compõem uma bacia.

Palavras-chave: AcquaNet, gerenciamento de quantidade e qualidade, bacia do Piracicaba

¹ Universidade Tecnológica Federal do Paraná – UTFPR. Av. Sete de Setembro, 3165 – DACOC. CEP: 80230-901. Curitiba – PR. celimar@utfpr.edu.br

² Escola Politécnica da Universidade de São Paulo – Poli/USP. Av. Prof. Luciano Gualberto, 380 – PHD. CEP: 05508-900. São Paulo – SP. rlporto@usp.br

ABSTRACT

Mathematical model for management of water quantity and quality in rivers.

A case study: Piracicaba watershed. Currently, one of the major causes of water resources shortage, especially in large urban centers, is the degradation of water quality, caused by inadequate releases of industrial effluents and domestic sewage. Within this context, the development and application of models that consider aspects of water quantity and quality is extremely necessary to solve this problem in a rational way. Thus, the purpose of this study is to develop a computational tool able to manage it in an integrated manner the issues related to water quantity and quality in a river basin, considering water bodies classification parameters, according to CONAMA 357/2005 resolution. This computational tool is a mathematical model for managing water resources, and can be applied in any river basin. Specifically for this study, the model was applied in Piracicaba watershed, where numerous conflicts related to the use of water occur. Distinct models of water quantity and quality that interact mutually compose the structure of the model AcquaNet. The issues related to water quantity are processed by means of flow rates optimization in a watershed. On the other hand, the model of water quality is capable of determining concentrations of various constituents of water quality, such as BOD, DO, total coli form, total phosphorus, algae, organic nitrogen, ammonia, nitrite and nitrate in several stretches of rivers.

Key words: AcquaNet, water quantity and quality modeling, Piracicaba watershed

INTRODUÇÃO

O grande desafio para os próximos anos, na área de recursos hídricos, é o atendimento das demandas na quantidade necessária e com a qualidade apropriada, como também a preservação das águas, que vêm sofrendo grandes prejuízos em virtude da poluição descontrolada.

O presente trabalho tem por objetivo apresentar a metodologia de um modelo para o gerenciamento de quantidade e qualidade da água, além de sua aplicação na bacia do rio Piracicaba.

Segundo Silva & Ribeiro (2006), um dos maiores desafios da gestão de recursos hídricos no âmbito da implementação e do entendimento dos instrumentos de gestão, está em integrá-los. De forma que a outorga deve definir cotas de água e de lançamentos de efluentes que, por sua vez, deverão ter suas quantidades cobradas em função de uma série de critérios, entre os quais, os objetivos de qualidade que se deseja para o corpo hídrico – expresso pelo seu enquadramento. Todo esse arranjo

deverá ser configurado em um consistente plano de recursos hídricos e o conjunto de informações organizado no banco de dados do sistema de informações sobre recursos hídricos.

Na Resolução Conama 357/2005 ficou estabelecido que os limites de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO) para as águas doces de classes 2 e 3, poderão ser elevados, caso o estudo da capacidade de autodepuração do corpo receptor demonstre que as concentrações mínimas de oxigênio dissolvido (OD) previstas não serão desobedecidas, nas condições de vazão de referência, com exceção da zona de mistura. Além disso, a Resolução Conama 357/2005 leva em consideração a concentração dos poluentes e não a carga gerada.

Segundo Gonçalves et. al. (2008), a gestão de recursos hídricos é tarefa difícil. Os gestores precisam racionalizar o uso de recursos financeiros destinados às obras de saneamento. Essa visão justifica-se pela carência de recursos, sendo inevitável utilizarem o curso d'água como complementação dos processos que ocorrem no tratamento de esgotos, ampliando as opções tecnológicas de tratamento em consonância com a qualidade do corpo receptor.

No desenvolvimento do modelo AcquaNet, buscou-se criar uma ferramenta de apoio à gestão de recursos hídricos na qual se consideram os critérios de enquadramento dos corpos d'água, permitindo analisar as condições ambientais de um rio, associadas às classes de uso da CONAMA 357/2005. A metodologia leva em conta as retiradas de água e os lançamentos pontuais, além da autodepuração do rio.

Os modelos de qualidade de água relacionam o transporte de uma substância ao longo do tempo e do espaço, sendo que esse transporte esta sujeito aos processos físicos, químicos e biológicos. O transporte ocorre devido à advecção, difusão e dispersão das substâncias no corpo d'água. A advecção de uma substância é o transporte resultante do gradiente do escoamento. A difusão é a variação da concentração com base no gradiente da própria substância, ou seja, é o resultado do movimento molecular de um ponto de alta concentração para um de baixa concentração. A dispersão é o efeito da flutuação turbulenta sobre a concentração, quando o fluido é descrito pela velocidade média, num volume finito, considerando que existem partículas que escoam com velocidade diferente da média, existe uma ação dispersiva no escoamento e na concentração de uma substância (Tucci, 1998).

Em se tratando de modelagem de qualidade de água e considerando as diferenças no comportamento dos diferentes corpos d'água, torna-se necessário o desenvolvimento de modelos específicos para análise diferenciada de rios e lagos.

A velocidade e a profundidade do fluxo são as principais características que diferenciam o escoamento em rios, do escoamento em reservatórios e lagos.

De acordo com McCutcheon (1989), os modelos de qualidade de água podem ser agrupados em quatro diferentes classes; os modelos concentrados (dimensão zero) em que um segmento do escoamento é descrito por um elemento computacional simples, ignorando qualquer variação lateral, vertical e longitudinal que deva ocorrer. Os modelos unidimensionais consideram os gradientes na direção longitudinal e relacionam elementos computacionais que se estendem à jusante no escoamento. Os modelos bidimensionais descrevem variações em duas direções, em geral, nas direções lateral e longitudinal. Já os modelos tridimensionais descrevem os gradientes nas direções lateral, longitudinal e vertical dos parâmetros de qualidade da água.

As maiores dificuldades na utilização dos modelos bi e tridimensionais se referem à obtenção de dados, ao grande número de parâmetros e a instabilidade numérica.

Os modelos de qualidade de água utilizados na representação dos fenômenos de transporte de massa em rios são, em geral, unidimensionais e representam o escoamento através da velocidade média na seção transversal, desprezando as variações nas outras direções. No caso dos lagos e reservatórios, onde as variações de densidade e temperatura da água são marcantes, com frequência torna-se necessário à utilização de modelos bi ou tridimensionais.

Na modelagem de qualidade de água em rios normalmente não se considera a zona de mistura. Admite-se que quando um material entra no corpo d'água, ele imediatamente mistura com o escoamento.

De acordo com a Whitehead (1984), existe uma tendência, principalmente nos EUA, ao desenvolvimento de pacotes computacionais que podem ser aplicados a sistemas generalizados de rios, lagos e reservatórios. Entretanto, por causa da generalidade dos modelos, muitos pesquisadores têm preferido à adaptação destes a um problema em particular, ou ainda a elaboração de modelos sob medida. Embora isso necessite de mais tempo, existe a vantagem em relação ao aprendizado, isto é particularmente valioso no processo de gerenciamento, pois há o desenvolvimento de uma sensibilidade na tomada de decisão.

Muitos modelos de qualidade de água de rios já foram desenvolvidos, destacando-se o Qual2E, OTIS e HEC5.

O modelo Qual2E é capaz de simular 15 variáveis de qualidade de água. São elas: OD, DBO, temperatura, algas e clorofila, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito,

nitrito, fósforo orgânico, fósforo dissolvido, coliformes, três constituintes conservativos e mais um constituinte não conservativo arbitrário. O modelo permite a incorporação de descargas pontuais, tributários, captações e incrementos relacionados às fontes difusas (Brown e Barnwell, 1987).

O modelo OTIS (*One-Dimensional Transport with Inflow and Storage*), desenvolvido pelo USGS (*United State Geological Survey*), tem como relação principal a equação de advecção-dispersão com termos adicionais para quantificar o armazenamento transiente, afluxo lateral e o decaimento de primeira ordem. O armazenamento transiente refere-se à detenção temporária de substâncias em pequenas bolsas de água parada, quando comparadas com o movimento mais rápido que acontece perto do centro do canal principal (Runkel, 1998).

O modelo HEC5 pode ser utilizado para determinar a qualidade de água em sistemas de rios e reservatórios, foi desenvolvido pelo *US Army Corps of Engineers* em Davis, Califórnia (Whitehead, 1984).

O AcquaNet, objeto desse estudo, é um modelo unidimensional capaz de determinar a concentração das seguintes substâncias; DBO, OD, coliformes totais, fósforo total, algas, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito e nitrito em diversos trechos de rios, em função de sua vazão, dos lançamentos ocorridos e do processo de decaimento dos poluentes (Teixeira e Porto, 2004).

MATERIAIS E MÉTODOS

O AcquaNet é um modelo de rede de fluxo que engloba o gerenciamento de quantidade e qualidade de água. Tais aspectos podem trabalhar isoladamente ou de forma integrada, dependendo das necessidades do usuário (Teixeira e Porto, 2004).

O modelo de qualidade de água pode ser utilizado em rios, considerando lançamentos pontuais, tais como a entrada de efluentes industriais e a descarga de esgotos domésticos, podendo simular as concentrações de DBO, OD, Coliformes Totais, Fósforo Total, Algas, Nitrogênio Orgânico, Amônia, Nitrito e Nitrito.

No processo de modelagem, os rios estão sendo considerados como escoamentos unidimensionais e estão sujeitos, principalmente, aos fenômenos de conservação de massa e de reações cinéticas. Sendo que o rio pode ser dividido em trechos, como na figura 1.

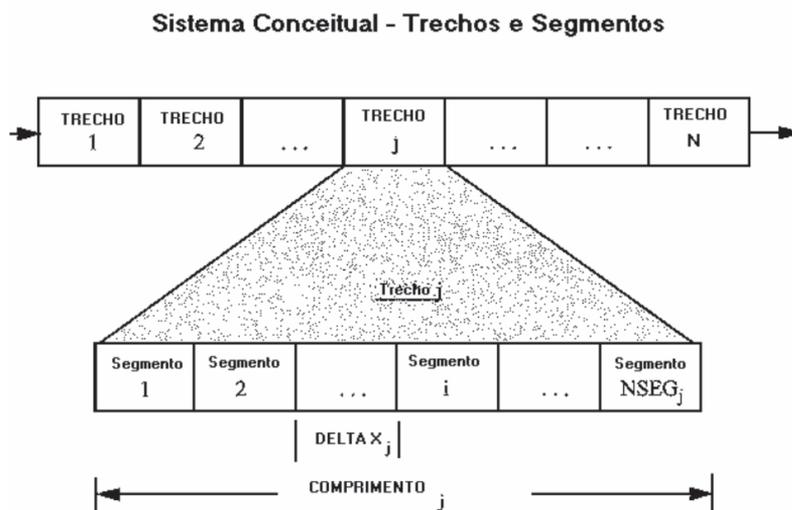


Figura 1. Subdivisão de um trecho do rio em segmentos (Fonte: Runkel, 1998).

Cada trecho deverá apresentar parâmetros constantes, tais como: área da seção, declividade, velocidade, vazão, altura média da lâmina d'água, entre outros. Cada segmento representa um volume de controle sobre o qual as equações que governam o balanço de massa serão aplicadas. Para um dado trecho, haverá um determinado número de volumes de controle de comprimento DX .

A equação de balanço de massa relacionando a conservação de massa e a reação cinética é a seguinte:

$$V \frac{\partial c}{\partial t} = \frac{\partial \left(A_c E \frac{\partial c}{\partial x} \right)}{\partial x} dx - \frac{\partial (A_c U c)}{\partial x} dx + V \frac{dc}{dt} + S \quad (1)$$

Acumulação = Dispersão - Advecção + Reações Cinéticas + Fontes Externas

Onde: V : volume; A_c : Área da seção transversal do canal; E : coeficiente de dispersão; c : concentração do poluente; U : velocidade média; x : distância; S : fontes externas.

A equação 1 foi dividida pelo volume a fim de simplificar a estrutura dos termos. Cabe ressaltar que o termo $A_c E$ está dentro de uma derivada, sugerindo que este termo é uma variável ao longo do volume de controle. Foi assumido que este termo não muda em dx , portanto foi possível colocá-lo fora do diferencial e assim dividir toda a equação pelo volume. Além disso, o modelo não relaciona as fontes externas, portanto a equação resultante é a seguinte:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = E \frac{\partial^2 c}{\partial x^2} dx - U \frac{\partial c}{\partial x} + \frac{dc}{dt} \quad (2)$$

O termo referente às reações cinéticas pode ser demonstrado em função da taxa de decaimento k e da concentração c do poluente no instante t , conforme:

$$\frac{dc}{dt} = -kc \quad (3)$$

O modelo de qualidade de água pode apresentar duas formas para solução do problema: estado constante ou permanente e variando no tempo.

A solução para o estado constante ou permanente considera que não existe variação da concentração em relação ao tempo, ou seja, num determinado dia ou mês. Sendo assim, pode-se assumir que:

$$\frac{\partial c}{\partial t} = 0 \quad (4)$$

A equação de balanço de massa também pode ser chamada de equação de advecção-dispersão-reação e considerando que os diferenciais parciais podem ser substituídos por derivadas parciais, então:

$$0 = -U \frac{dc}{dx} + E \frac{d^2 c}{dx^2} - kc \quad (5)$$

Segundo Chapra (1997), o termo E da eq. (5) refere-se ao coeficiente de dispersão, tal parâmetro é muito significativo em escoamentos dispersivos, tais como os estuários. No caso dos rios, o fenômeno da advecção (parcela referente à velocidade) é o que tem maior importância. Baseando-se nesse princípio, a parcela da dispersão pode ser eliminada na equação de balanço de massa e, portanto, para os rios assume-se que:

$$0 = -U \frac{dc}{dx} - kc \quad (6)$$

Para solucionar a equação 6, a mesma deverá ser aplicada para cada um desses volumes de controle, como demonstra a figura 1. Outra forma de resolver o problema é através da sua integração, obtendo-se uma solução analítica para a questão.

Assumindo que a velocidade (U) deve ser constante no trecho do rio e que corresponde a um ΔX (distância) por um Δt (intervalo de tempo), então:

$$U = \frac{dx}{dt} \quad (7)$$

Considerando a forma geral para um determinado decaimento, a simplificação da velocidade e integrando sua equação, tem-se que:

$$U \frac{dc}{dx} = -kc \quad \text{e} \quad \frac{dx}{dt} \frac{dc}{dx} = -kc \quad (8)$$

Portanto:

$$\frac{dc}{dt} = -kc \quad \text{e} \quad dc = -kcdt \quad (9)$$

Integrando essa equação tem-se que:

$$\int dc = -\int kcdt \quad (10)$$

$$c = c_0 e^{-kt} \quad (11)$$

Assumindo que o t (tempo) é a distância dividida pela velocidade, então:

$$c = c_0 e^{-k \frac{x}{U}} \quad (12)$$

Isso significa dizer que a massa de um constituinte de qualidade da água percorre um determinado trecho com uma velocidade constante U.

Primeiramente, o rio deverá ser analisado quanto as suas características hidrogeométricas e quanto aos pontos de entrada de efluentes e retiradas de água. Isso quer dizer que toda vez que houver alterações nas características hidrodinâmicas do rio, como por exemplo: alterações de velocidade, de área, de vazão ou do coeficiente de dispersão um novo trecho deverá ser criado e também quando houver algum ponto de entrada ou de retirada de água no rio.

A obtenção da solução de cada um dos diversos poluentes considerados no modelo de qualidade de água, se dá a partir do termo dc/dt descritos nas equações (13) a (21).

Reações Cinéticas

Os constituintes considerados no modelo são: DBO_u (DBO última), OD, nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo total, algas e coliformes totais.

As reações cinéticas dos constituintes qualidade de água podem ser representadas matematicamente pelas expressões a seguir. Cada uma dessas equações é resultado de um complexo processo químico e biológico que o constituinte presente no corpo d'água está sujeito.

$$\text{Algas (A): } \frac{dA}{dt} = k_g A - k_{ra} A - \frac{\sigma_1}{H} A \quad (13)$$

$$\text{Nitrogênio Orgânico (N}_o\text{): } \frac{dN_o}{dt} = a_{na} k_{ra} A - k_{oa} N_o - \sigma_4 N_o \quad (14)$$

$$\text{Amônia (N}_a\text{): } \frac{dN_a}{dt} = k_{oa} N_o - k_{ai} N_a + \frac{\sigma_3}{H} - Fa_{na} k_g A \quad (15)$$

$$\text{Nitrito (N}_i\text{): } \frac{dN_i}{dt} = k_{ai} N_a - k_{in} N_i \quad (16)$$

$$\text{Nitrato (N}_n\text{): } \frac{dN_n}{dt} = k_{in} N_i - (1-F)a_{na} k_g A \quad (17)$$

$$\text{Fósforo Total (P): } \frac{dP}{dt} = k_p P \quad (18)$$

$$\text{DBO (L): } \frac{dL}{dt} = -k_d L - k_s L \quad (19)$$

$$\text{OD(o) } \frac{do}{dt} = k_a(o_s - o) - k_d L - \frac{SOD}{H} + (Pk_g - Rk_{ra})A - r_{oa}k_{ai}N_a - r_{oi}k_{in}N_i \quad (20)$$

$$\text{Coliformes Totais (Coli): } \frac{dColi}{dt} = -k'_b Coli \quad (21)$$

Sendo que a taxa das perdas totais dos coliformes é dada por:

$$k'_b = (0.8 + 0.02S)1.07^{T-20} + \frac{\alpha I_o}{k_c H} (1 - e^{-k_c H}) + F_p \frac{v_s}{H} \quad (22)$$

Quanto ao OD (oxigênio dissolvido), pode-se dizer que a sua respectiva equação relaciona a demanda de oxigênio referente a DBO Carbonácea e a NDBO (DBO Nitrogenosa referente ao nitrogênio oxidável, que é a concentração do nitrogênio orgânico somada a da amônia), além dos efeitos de crescimento e respiração das algas relacionados a fotossíntese, em função dos parâmetros de luz e do nutriente limitante.

O modelo corrige internamente as taxas de decaimento (os ks) para a temperatura de 20°C.

Todos os parâmetros das eqs. (13) a (21) estão identificados a seguir:

k_d : taxa de decomposição da DBO ou desoxigenação [d⁻¹];

k_a : taxa de reaeração, diversos autores propõem fórmulas para sua determinação, o Modelo de qualidade de água traz as fórmulas de Churchill et al., O'Connor e Dobbins, Owens et al. e Langbien e Durum [d⁻¹];

k_s : taxa de sedimentação da DBO [d⁻¹];

SOD: demanda de oxigênio no sedimento [g m⁻² d⁻¹];

o : concentração do oxigênio dissolvido presente no corpo d'água [mg L⁻¹];

o_s : concentração de saturação do oxigênio dissolvido, obtido em função da temperatura [mg L⁻¹];

k_g : taxa de crescimento das algas [d⁻¹];

k_{ra} : taxa de perda de biomassa de algas devido o processo de respiração [d⁻¹];

σ_1 : demanda de oxigênio no sedimento pela algas [g m⁻² d⁻¹];

σ_2 : demanda de oxigênio no sedimento pelo fósforo [g m⁻² d⁻¹];

σ_3 : demanda de oxigênio no sedimento pela amônia [g m⁻² d⁻¹];

σ_4 : taxa de sedimentação do nitrogênio orgânico [d⁻¹];

σ_5 : taxa de sedimentação do fósforo orgânico [d⁻¹];

H : profundidade média do rio no trecho considerado, obtida pela equação de Manning [m];

k_p : taxa de decaimento do fósforo [d⁻¹];

F : fator de limitação do nutriente (nitrogênio);

a_{na} : razão estequiométrica do nitrogênio com relação as algas (clorofila) [gN mg-Chla⁻¹];

a_{pa} : razão estequiométrica do fósforo em relação as algas (clorofila) [gP mg-Chla⁻¹];

r_{oa} : razão estequiométrica do oxigênio em relação a amônia [gO gN⁻¹];
 r_{oi} : razão estequiométrica do oxigênio em relação ao nitrito [gO gN⁻¹];
 r_{on} : razão estequiométrica do oxigênio em relação a nitrogênio total [gO gN⁻¹];
 r_{oA} : razão estequiométrica do oxigênio em relação as algas definida pela clorofila A [gO mgChla⁻¹];

P : razão de fotossíntese;

R : razão de respiração.

k_{oa} : taxa de transformação de nitrogênio orgânico em amônia;

k_{ai} : taxa de transformação de amônia em nitrito;

k_{in} : taxa de transformação de nitrito em nitrato;

Os parâmetros k_{oa} , k_{ai} e k_{in} são multiplicados internamente no modelo pelo fator de nitrificação (f_{nitr}), obtido através da seguinte equação:

$$f_{nitr} = 1 - e^{-k_{nitr}o} \quad (23)$$

Onde k_{nitr} = coeficiente de primeira ordem referente à inibição da nitrificação ($\approx 0,6$), é considerado igual a 1 para concentrações de OD maiores que 3 mg/l.

Integrando as equações dos diversos poluentes (equações 13 a 21), chega-se a formulação analítica, a qual foi utilizada no modelo de qualidade de água e que é demonstrada a seguir.

As fórmulas para a determinação de DBO e OD correspondem ao modelo clássico de Streeter-Phelps.

- Fórmula para determinar a concentração da DBO_u (L):

$$L = L_0 e^{-\frac{(k_d + k_s)X}{U}} \quad (24)$$

Onde k_d = taxa de decomposição da DBO ou desoxigenação e k_s = taxa de sedimentação da DBO.

A fórmula correspondente a determinação do oxigênio dissolvido, relaciona vários fatores, entre eles: o déficit de OD inicial, a relação da DBO-Carbonácea, a relação do SOD (Demanda de Oxigênio pelo Sedimento), a relação da DBO distribuída e presente no sedimento e a relação da DBO nitrogenosa.

- Fórmula total para determinar a concentração do Déficit de OD (o):

$$o = OS - D \quad (25)$$

$$\begin{aligned}
 D = D_0 e^{-\frac{k_a X}{U}} + \frac{k_d L_o}{k_a - k_r} (e^{-\frac{k_r X}{U}} - e^{-\frac{k_a X}{U}}) + \frac{-P + R + (\frac{SOD}{H})}{k_a} (1 - e^{-\frac{k_a X}{U}}) \\
 + \frac{k_d S_L}{k_r k_a} (1 - e^{-\frac{k_a X}{U}}) - \frac{k_d SOD}{k_r (k_a - k_r)} (e^{-\frac{k_r X}{U}} - e^{-\frac{k_a X}{U}}) + \frac{k_n L_{NO}}{k_a - k_n} (e^{-\frac{k_n X}{U}} - e^{-\frac{k_a X}{U}})
 \end{aligned} \quad (26)$$

Sendo que a taxa de saturação de oxigênio é dada em função da temperatura, conforme equação 27.

$$\ln OS = -139.34411 + \frac{1.575701 * 10^5}{T_a} - \frac{6.642308 * 10^7}{T_a^2} + \frac{1.243800 * 10^{10}}{T_a^3} - \frac{8.621949 * 10^{11}}{T_a^4} \quad (27)$$

$$T_a = T(^{\circ}C) + 273.15 \quad (28)$$

Onde: k_a = taxa de reaeração, SOD = demanda de oxigênio no sedimento, o = concentração do oxigênio dissolvido presente no corpo d'água [mg L^{-1}], o_s = concentração de saturação do oxigênio dissolvido, kn = taxa de nitrificação, L_{NO} = DBO nitrogenosa, P e R = Razão da fotossíntese e respiração respectivamente.

Muitos pesquisadores desenvolveram fórmulas para determinar a taxa de reaeração nos corpos d'água, as mais usuais são apresentadas na tabela 1.

Tabela 1. Fórmulas para determinação da reaeração (Fonte: Chapra, 1997).

Pesquisador	Fórmula (d^{-1})	Aplicação	H (m)	U (m/s)
O'Connor-Dobbins	$k_a = 3.93 \frac{U^{0.5}}{H^{1.5}}$	Rios profundos a moderados com velocidade baixa a moderada	0.30 – 9.14	0.15 – 0.49
Churchill	$k_a = 5.026 \frac{U}{H^{1.67}}$	Rios profundos a moderados com altas velocidades	0.61 – 3.35	0.55 – 1.52
Owens e Gibbs	$k_a = 5.32 \frac{U^{0.67}}{H^{1.85}}$	Rios com baixa profundidade	0.12 – 0.73	0.03 – 0.55

A determinação das concentrações oriundas do ciclo do nitrogênio tem como base o modelo de nitrificação apresentado por Chapra (1997).

- Fórmula para determinar a concentração do Nitrogênio Orgânico (No):

$$No = No_o e^{-\frac{k_{oa}X}{U}} \quad (29)$$

- Fórmula para determinar a concentração da Amônia (Na):

$$Na = Na_o e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} + \frac{k_{oa}No_o}{k_{ai} - k_{oa}} \left(e^{-\frac{k_{oa}X}{U}} - e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} \right) \quad (30)$$

- Fórmula para determinar a concentração do Nitrito (Ni):

$$Ni = Ni_o e^{-\frac{k_{in}X}{U}} + \frac{k_{ai}Na_o}{k_{in} - k_{ai}} \left(e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} - e^{-\frac{k_{in}X}{U}} \right) + \frac{k_{ai}k_{oa}No_o}{k_{ai} - k_{oa}} \left(\frac{e^{-\frac{k_{oa}X}{U}} - e^{-\frac{k_{in}X}{U}}}{k_{in} - k_{oa}} - \frac{e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} - e^{-\frac{k_{in}X}{U}}}{k_{in} - k_{ai}} \right) \quad (31)$$

- Fórmula para determinar a concentração do Nitrato (Nn):

$$Nn = No_o + Na_o + Ni_o - No_o e^{-\frac{k_{oa}X}{U}} - Na_o e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} - Ni_o e^{-\frac{k_{in}X}{U}} - \frac{k_{oa}No_o}{k_{ai} - k_{oa}} \left(e^{-\frac{k_{oa}X}{U}} - e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} \right) - \frac{k_{ai}Na_o}{k_{in} - k_{ai}} \left(e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} - e^{-\frac{k_{in}X}{U}} \right) - \frac{k_{ai}k_{oa}No_o}{k_{ai} - k_{oa}} \left(\frac{e^{-\frac{k_{oa}X}{U}} - e^{-\frac{k_{in}X}{U}}}{k_{in} - k_{oa}} - \frac{e^{-\frac{k_{ai}X}{U}} - e^{-\frac{k_{in}X}{U}}}{k_{in} - k_{ai}} \right) \quad (32)$$

Sendo que: k_{oa} = taxa de transformação de nitrogênio orgânico em amônia, k_{ai} = taxa de transformação de amônia em nitrito e k_{in} = taxa de transformação de nitrito em nitrato.

- Fórmula para determinar a concentração das Algas (a):

Para a determinação da concentração das algas, primeiramente torna-se necessário definir a taxa de decaimento Knet.

$$a = a_o e^{-\frac{k_{net}X}{U}} \quad (33)$$

O Knet pode ser determinado a partir da seguinte equação:

$$k_{net} = kg(T, N, I) * k_{ra} * \frac{V_a}{H} \quad (34)$$

Onde: $k_g(T, N, I)$ = taxa de crescimento das algas em função da temperatura, presença de nutrientes e condições de luz, k_{ra} = taxa de perda de biomassa de algas devido o processo de respiração; V_a = velocidade de sedimentação e H = profundidade média do rio no trecho considerado.

- Fórmula para determinar a concentração dos Coliformes (COLI):

$$COLI = COLI_o e^{-\frac{k_{COLI}X}{U}} \quad (35)$$

Sendo k_{COLI} : taxa de decaimento dos coliformes [d^{-1}].

-Fórmula para determinar a concentração do Fósforo (P):

$$P = P_o e^{-\frac{k_p X}{U}} \quad (36)$$

Onde k_p : taxa de decaimento do fósforo [d^{-1}].

O AcquaNet consiste na integração dos modelos de quantidade e qualidade de água . Os dados de entrada do modelo de quantidade são as séries históricas de vazão nos diversos trechos do rio e os dados de saída são valores otimizados de vazões de acordo com o cenário definido pelo usuário, em função dos diversos usos da água na bacia. Essas vazões otimizadas pelo modelo de quantidade de água constituem-se como dados de entrada para o modelo qualidade e que por sua vez fornece, como dados de saída, as concentrações mensais dos poluentes simulados nos mais diversos pontos da bacia.

A questão do gerenciamento de recursos hídricos envolve grandes sistemas que acabam resultando em grandes redes de fluxo no modelo AcquaNet, com muitos reservatórios, nós de passagem, links e demandas. A quantidade de dados envolvida na simulação é enorme, visto que os dados se configuram na forma de séries temporais.

O AcquaNet analisa as condições do rio considerando os parâmetros de qualidade da água em função do enquadramento dos corpos d'água, definidos pela Resolução Conama 357/2005. Dessa forma, o usuário informa ao modelo a classe do rio e o modelo informa se as concentrações estão enquadradas ou não de acordo com a referida resolução.

Na hipótese de não enquadramento, o usuário poderá atribuir diversos níveis de tratamento aos efluentes lançados, para verificar qual o tratamento mais adequado para que o rio obedeça ao enquadramento.

Vale enfatizar que, por se tratar de modelagem matemática algumas hipóteses e simplificações foram admitidas quando do processo de formulação do modelo. O AcquaNet tem por objetivo auxiliar na gestão de recursos hídricos e portanto o nível de conhecimento e a sensibilidade do usuário em trabalhar com os dados são de fundamental importância para a qualidade dos resultados. Visto que o processo de modelagem de qualidade das águas requer um intenso e constante monitoramento dos corpos d'água, alocando recursos, equipamentos e pessoal qualificado.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para a validação e calibração do modelo AcquaNet para uma situação real, utilizou-se a bacia do Rio Piracicaba como área de estudo.

Essa bacia foi escolhida por apresentar diversos dados, tanto de quantidade como de qualidade de água. Além disso, ela representa uma bacia complexa no cenário nacional de recursos hídricos, apresentando disputas pelos usos da água e comprometimento de sua qualidade.

Como o modelo trabalha num cenário de rede de fluxo, procurou-se montar a rede levando em consideração os pontos de lançamento e retiradas de água que ocorrem em toda a bacia. Também foram consideradas as indústrias e cidades que tem algum tipo de influência, retirada de água ou lançamento de efluente nos rios. Tais dados referem-se ao estudo realizado pela Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo (SMA – SP, 1994).

Validação e Calibração do Modelo

Nas simulações realizadas, considerou-se o período de dados de seis anos, compreendendo entre os anos de 1979 a 1984. Esse período foi escolhido por apresentar dados mensais de qualidade de água e também por coincidir com a existência de dados de vazões mensais nesse período.

Para os dados de entrada das vazões afluentes, foram considerados os postos fluviométricos de responsabilidade do DAEE (Departamento de Água e Energia Elétrica) e, quanto aos dados de qualidade de água, foram utilizados os postos de monitoramento da Cetesb existentes na bacia do Rio Piracicaba.

Através da formulação de Manning, o modelo calcula a velocidade média e a profundidade, em função da vazão média mensal determinada pelo modelo de quantidade de água.

O AcquaNet avalia as condições do rio e seleciona automaticamente a fórmula mais adequada para definir a taxa de reaeração, conforme tabela 1. O usuário do modelo ainda tem a opção de atribuir um valor que julgar mais conveniente. Além disso, os coeficientes de qualidade de água são definidos nos vários trechos do rio, correspondentes aos links da rede de fluxo criados pelo usuário para simular a bacia hidrográfica, conforme figura 2.

Figura 2. Tela de entrada de dados nos links (trechos de rio).

O modelo apresenta os resultados na forma de tabelas e gráficos. Os dados das tabelas poderão ser exportados para aplicativos como o Excel, permitindo outros tipos de análises.

Para comparar os dados observados com os simulados, buscaram-se pontos específicos na bacia e que foram representados no modelo, conforme tabela 2. Esses mesmos pontos estão destacados, por círculos maiores na rede de fluxo apresentada na figura 3.

Tabela 2. Descrição dos pontos de verificação e Cetesb.

Ponto na rede do AcquaNet	Posto Cetesb correspondente	Rio	Localidade
PV1	AT-2605	Atibaia	Paulínea
PV2	JA-2800	Jaguari	Jusante da confluência do rio Jaguari com o rio Camanducaia
PV3	PI-2800	Piracicaba	Jusante da confluência do rio Piracicaba com o rio Camanducaia

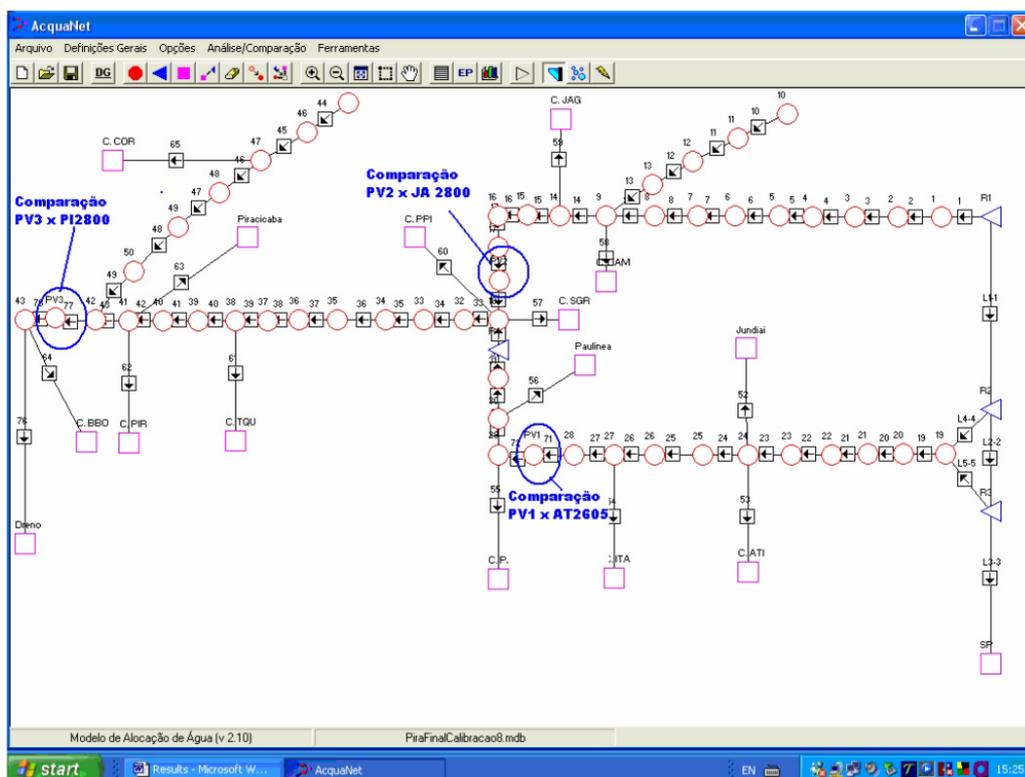


Figura 3. Rede de fluxo destacando os pontos de verificação através de círculos azuis. Tabela 4. Características Hidrodinâmicas (Fonte: Teixeira e Porto, 2004).

Nas simulações de qualidade de água foram analisadas apenas as concentrações de DBO e OD. As concentrações dos demais constituintes de qualidade de água não foram consideradas por não existirem dados suficientes para suas simulações no modelo. Quanto aos resultados de quantidade de água, pode-se dizer que as demandas foram supridas satisfatoriamente. Os valores dos coeficientes de DBO e OD que foram utilizados nas simulações foram os valores médios apresentados na literatura atual e que responderam de forma satisfatória no processo de calibração do modelo, de acordo com a tabela 3. Já as características hidrodinâmicas dos rios estão descritas na tabela 4.

Tabela 3. Temperatura e Coeficientes Cinéticos (Fonte: Teixeira e Porto, 2004).

Rio	T média (°C)	K_d (d ⁻¹)	K_S (d ⁻¹)	SOD (g/m ² dia)
Atibaia (próximo ao posto AT -2605)	20	0,50	0,50	5,30
Jaguari (próximo ao posto JA-2800)	20	0,50	0,50	5,30
Piracicaba (próximo ao posto PI-2800)	20	1,00	0,50	5,30

Tabela 4. Características Hidrodinâmicas (Fonte: Teixeira e Porto, 2004).

Rio	Largura média do rio (m)	Declividade do canal (m/m)	n de Manning
Atibaia (próximo ao posto AT -2605)	15	0,0002	0,030
Jaguari (próximo ao posto JÁ-2800)	10	0,0002	0,030
Piracicaba (próximo ao posto PI-2800)	30	0,0002	0,030

Para o Rio Atibaia, as comparações de DBO e OD entre os dados simulados (AcquaNet) e observados (fornecidos pela CETESB) são mostradas nas figuras 4 e 5, respectivamente.

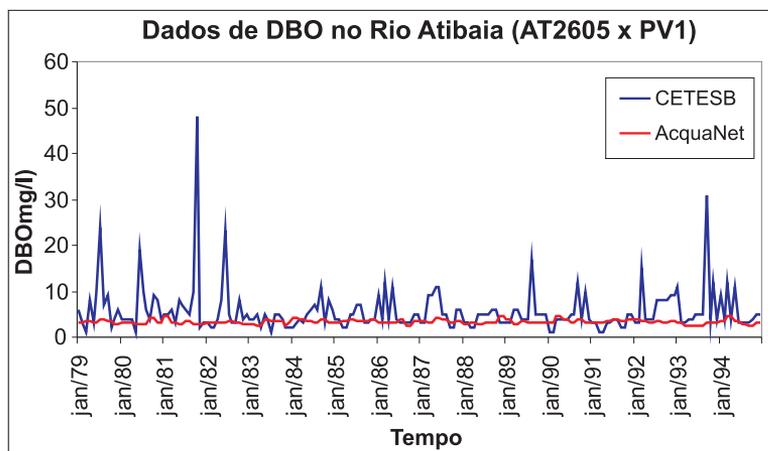


Figura 4. Comparação dos dados de DBO do Rio Atibaia.

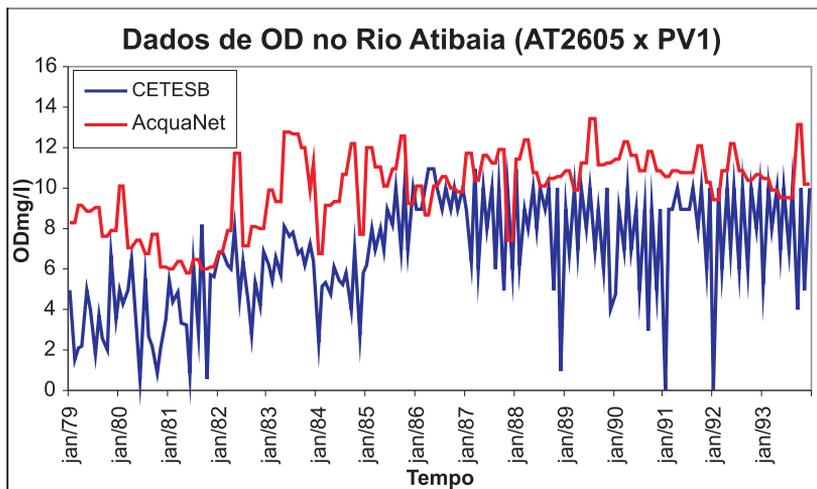


Figura 5. Comparação dos dados de OD do Rio Atibaia.

Para uma melhor comparação entre os valores simulados e os dados observados utilizou-se de dados estatísticos das concentrações de DBO, conforme figuras 6 e 7. Para os valores de OD, os mesmos são apresentados nas tabelas 5 e 6.

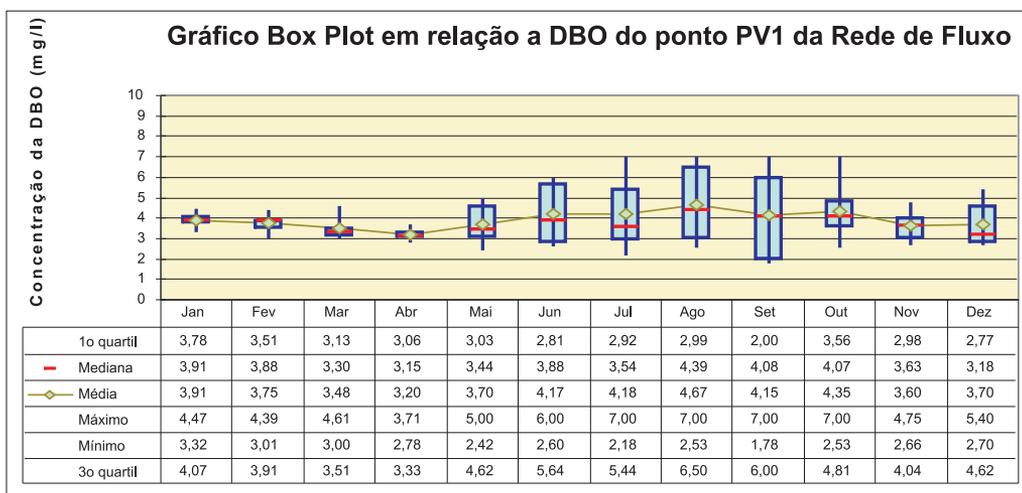


Figura 6. Gráfico *Box Plot* para os resultados de DBO fornecidos pelo AcquaNet.

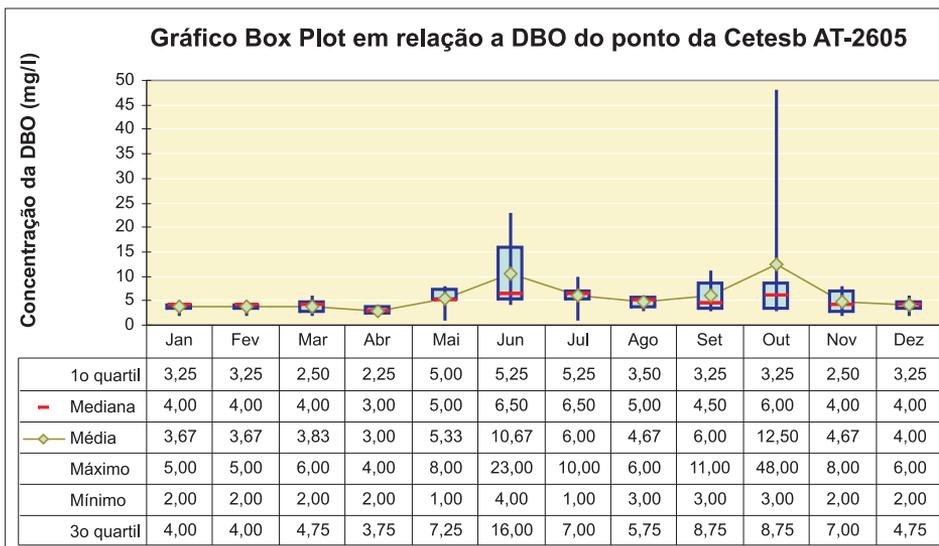


Figura 7. Gráfico *Box Plot* para os dados de DBO do posto da CETESB AT-2605.

Tabela 5. Dados Estatísticos referentes ao OD do ponto PV1 fornecido pelo AcquaNet.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	4,28	4,95	5,50	5,78	6,40	5,25	7,39	6,02	6,16	6,65	5,37	4,91
Mediana	5,34	5,00	5,60	5,85	6,96	6,08	7,45	6,74	6,83	6,72	6,56	5,50
Média	5,25	5,29	5,80	6,13	6,69	6,08	7,05	6,86	6,50	6,70	6,02	5,49
Máximo	6,74	6,76	6,41	7,22	7,17	7,29	7,82	7,94	7,66	7,58	6,74	6,53
Mínimo	3,85	4,89	5,36	5,42	5,79	4,87	4,59	6,00	4,67	5,64	4,57	4,56
3. quartil	6,06	5,15	6,18	6,50	7,03	6,93	7,60	7,65	7,02	6,86	6,65	5,97

Tabela 6. Dados Estatísticos referentes ao OD do posto da CETESB AT-2605.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	5,10	4,58	5,08	5,03	3,93	1,83	5,68	3,28	3,10	1,68	3,15	5,65
Mediana	5,80	5,25	5,75	5,85	6,45	5,00	6,30	4,70	5,20	4,65	4,95	6,10
Média	5,33	5,68	5,83	5,38	5,87	4,18	6,55	4,60	5,10	4,00	4,70	5,87
Máximo	6,80	8,00	7,00	6,50	8,10	7,60	8,20	6,80	8,20	7,00	7,20	7,00
Mínimo	2,40	4,30	4,90	3,30	3,00	0,60	5,20	2,70	2,20	0,60	2,10	3,50
3. quartil	6,20	6,53	6,50	6,00	7,70	5,85	7,45	5,60	6,85	5,98	6,08	6,78

As comparações dos dados simulados e observados, para o Rio Jaguari, são mostradas nas figuras 8 e 9.

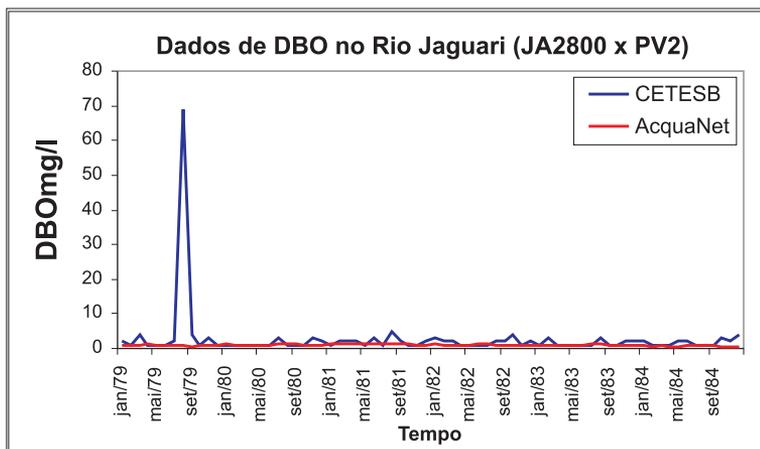


Figura 8. Comparação dos valores de DBO do Rio Jaguari.

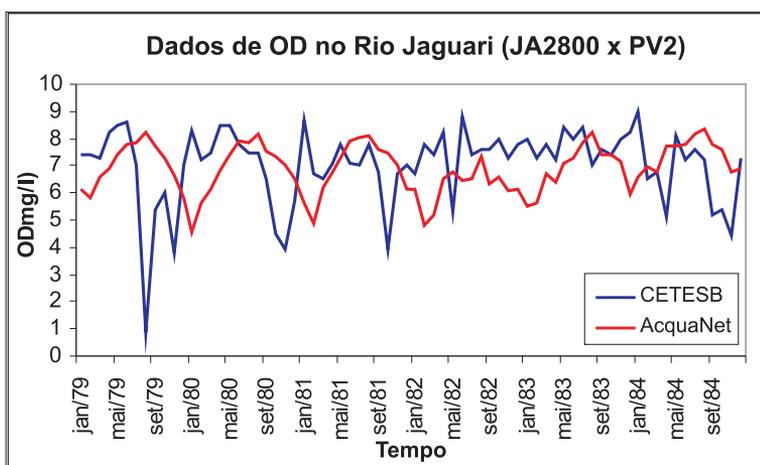


Figura 9. Comparação dos dados de OD do Rio Jaguari.

Os dados estatísticos das concentrações de DBO e OD podem ser usados para comparar melhor os valores simulados com os dados observados do nó PV2 com os valores do posto de monitoramento da Cetesb JA-2800, conforme tabelas 7, 8, 9 e 10.

Tabela 7. Dados Estatísticos referentes à DBO do ponto PV2 fornecido pelo AcquaNet.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	0,97	0,98	0,93	0,96	0,85	1,01	1,07	1,09	0,80	0,86	0,69	0,80
Mediana	1,07	1,00	1,03	0,98	0,87	1,06	1,17	1,15	0,95	0,92	0,75	0,85
Média	1,05	0,91	0,98	0,96	0,86	1,07	1,16	1,17	1,01	0,90	0,79	0,83
Máximo	1,18	1,14	1,12	1,19	1,13	1,25	1,29	1,52	1,49	1,15	1,02	1,06
Mínimo	0,84	0,30	0,74	0,52	0,48	0,83	1,04	0,85	0,61	0,56	0,58	0,49
3. quartil	1,17	1,05	1,07	1,10	0,94	1,20	1,23	1,24	1,20	1,00	0,91	0,92

Tabela 8. Dados Estatísticos referentes à DBO do posto da CETESB JA-2800.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,25	1,00	1,00	1,25	2,00
Mediana	1,50	1,50	1,50	1,00	1,00	1,00	1,00	2,50	1,50	1,00	2,00	2,00
Média	1,67	1,67	1,83	1,17	1,17	1,50	1,50	13,50	1,83	1,83	2,00	2,17
Máximo	3,00	3,00	4,00	2,00	2,00	3,00	3,00	69,00	4,00	4,00	3,00	4,00
Mínimo	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00	1,00
3. quartil	2,00	2,00	2,00	1,00	1,00	1,75	1,75	4,50	2,00	2,50	2,75	2,00

Tabela 9. Dados Estatísticos referentes ao OD do ponto PV2 fornecido pelo AcquaNet.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	5,54	5,07	6,14	6,57	7,13	7,39	7,85	8,09	7,42	7,28	6,69	5,98
Mediana	5,89	5,63	6,39	6,82	7,35	7,80	7,87	8,17	7,58	7,39	6,90	6,13
Média	5,77	5,61	6,26	6,85	7,27	7,51	7,71	8,05	7,40	7,28	6,79	6,24
Máximo	6,57	6,94	6,77	7,70	7,69	7,90	8,13	8,32	7,76	7,59	7,17	6,90
Mínimo	4,59	4,79	5,21	6,38	6,75	6,43	6,52	7,36	6,32	6,56	6,08	5,85
3. quartil	6,16	5,77	6,65	6,87	7,41	7,87	7,99	8,21	7,72	7,46	7,03	6,41

Tabela 10. Dados Estatísticos referentes ao OD do posto da CETESB JA-2800.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	7,55	6,83	6,93	7,13	7,88	7,35	7,10	7,05	5,68	4,73	4,03	7,00
Mediana	8,15	7,25	7,35	7,70	8,25	7,90	7,45	7,35	6,65	5,70	5,55	7,15
Média	8,02	7,15	7,22	7,38	7,77	7,92	7,48	6,33	6,52	5,87	5,68	7,17
Máximo	9,00	7,80	7,80	8,50	8,50	8,80	8,40	7,80	7,60	8,00	8,00	8,20
Mínimo	6,70	6,50	6,50	5,10	5,30	7,10	7,00	0,90	5,20	3,90	3,80	5,70
3. quartil	8,60	7,38	7,48	8,20	8,48	8,45	7,60	7,58	7,40	7,05	7,15	7,68

Comparações de dados simulados e observados do rio Piracicaba conforme figuras 10 e 11.

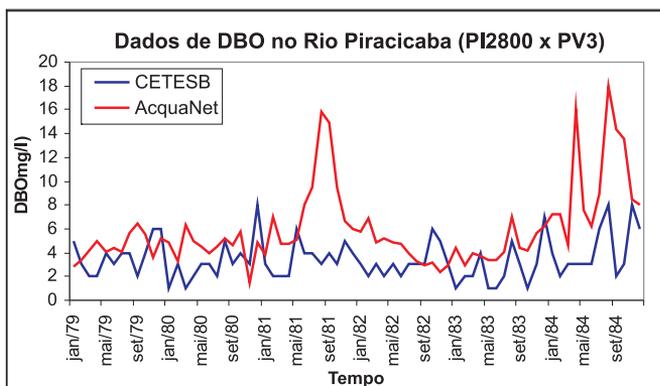


Figura 10. Comparação da DBO do Rio Piracicaba.

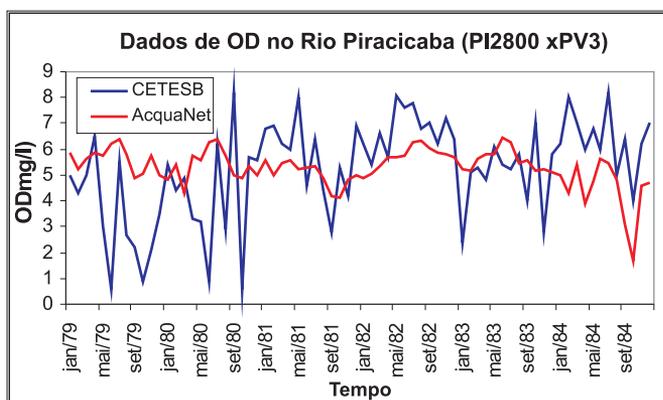


Figura 11. Comparação de OD do Rio Piracicaba

Nas tabelas 11, 12, 13 e 14, são apresentados parâmetros estatísticos para o Rio Piracicaba, das concentrações de DBO e OD.

Tabela 11. Dados Estatísticos referentes à DBO do ponto PV3 fornecido pelo AcquaNet.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	3,03	3,03	3,04	4,00	3,51	3,50	4,06	5,05	3,11	3,50	2,64	4,93
Mediana	3,16	3,11	3,34	4,06	4,19	3,98	4,32	5,41	3,17	3,84	4,64	5,58
Média	4,19	4,41	3,93	6,14	4,63	4,84	5,82	8,83	6,96	5,58	4,70	5,53
Máximo	7,20	7,28	6,36	16,07	7,52	7,98	9,44	18,00	14,93	13,58	8,44	8,05
Mínimo	2,83	2,99	2,91	3,72	3,33	3,39	3,91	3,28	2,98	3,11	1,45	2,93
3. quartil	5,13	6,00	4,36	4,74	5,00	5,76	7,79	13,30	11,61	5,23	6,46	6,15

Tabela 12. Dados Estatísticos referentes à DBO do posto da CETESB PI-2800.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	1,50	2,00	2,00	2,00	3,00	2,25	2,25	3,25	2,25	3,00	3,50	4,50
Mediana	3,00	2,00	2,00	2,00	3,00	3,00	3,50	4,50	3,00	3,50	5,00	6,00
Média	2,83	2,33	2,17	2,50	3,33	2,67	3,50	4,67	2,83	3,50	5,00	5,67
Máximo	5,00	3,00	3,00	4,00	6,00	4,00	6,00	8,00	4,00	6,00	8,00	8,00
Mínimo	1,00	2,00	1,00	2,00	1,00	1,00	2,00	3,00	2,00	1,00	3,00	3,00
3. quartil	3,75	2,75	2,75	2,75	3,75	3,00	4,00	5,00	3,00	4,00	5,75	6,75

Tabela 13. Dados Estatísticos referentes ao OD do ponto PV3 fornecido pelo AcquaNet.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	4,89	5,02	5,36	5,59	5,30	5,66	5,65	5,03	4,36	4,30	4,94	4,97
Mediana	5,09	5,09	5,41	5,70	5,62	5,98	6,26	5,61	4,94	4,96	5,28	5,00
Média	5,21	5,02	5,29	5,42	5,46	5,94	6,01	5,52	4,79	4,45	5,26	5,08
Máximo	5,84	5,38	5,66	5,85	5,80	6,46	6,38	6,33	6,02	5,88	5,83	5,69
Mínimo	4,84	4,32	4,29	3,88	4,76	5,30	5,34	4,81	3,08	1,67	4,60	4,72
3. quartil	5,47	5,22	5,57	5,80	5,74	6,25	6,34	5,81	5,42	5,12	5,64	5,10

Tabela 14. Dados Estatísticos referentes ao OD do posto da CETESB PI-2800.

Estatística	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez
1. quartil	5,10	4,58	5,08	5,03	3,93	1,83	5,68	3,28	3,10	1,68	3,15	5,65
Mediana	5,80	5,25	5,75	5,85	6,45	5,00	6,30	4,70	5,20	4,65	4,95	6,10
Média	5,33	5,68	5,83	5,38	5,87	4,18	6,55	4,60	5,10	4,00	4,70	5,87
Máximo	6,80	8,00	7,00	6,50	8,10	7,60	8,20	6,80	8,20	7,00	7,20	7,00
Mínimo	2,40	4,30	4,90	3,30	3,00	0,60	5,20	2,70	2,20	0,60	2,10	3,50
3. quartil	6,20	6,53	6,50	6,00	7,70	5,85	7,45	5,60	6,85	5,98	6,08	6,78

Com a aplicação do AcquaNet na bacia do Rio Piracicaba, pode-se testar e calibrar o modelo para uma situação real e conforme mostraram os resultados, o modelo respondeu de forma satisfatória.

Tanto para o rio Atibaia como para o Jaguari, os valores máximos da concentração de DBO apresentados pela Cetesb são provavelmente picos de lançamentos que ocorreram em determinados meses. Esses valores o AcquaNet não consegue representar, porque no modelo entrou-se com valores médios de lançamentos e que foram considerados os mesmos para todos os meses da simulação, por esse motivo os resultados apresentados pelo modelo apresentaram um comportamento mais uniforme.

Já para o rio Piracicaba, os valores mantiveram também um comportamento mais homogêneo, de acordo com as figuras 11 e 12.

CONCLUSÕES

A utilização de modelos de qualidade de água e a sua calibração consistem numa etapa trabalhosa, requerendo do usuário do modelo sensibilidade quanto aos processos de autodepuração dos rios e dos processos de qualidade das águas.

Considerando que o objetivo do modelo AcquaNet é auxiliar no planejamento de recursos hídricos. Pode-se dizer que para a bacia do Rio Piracicaba, o processo de calibração mostrou que os resultados fornecidos para os pontos de verificação – PV1, PV2 e PV3 da rede de fluxo, responderam de forma satisfatória quando comparados com os dados observados nos postos de monitoramento da CETESB.

Portanto, o AcquaNet se mostrou eficiente e pode auxiliar na gestão de recursos hídricos, podendo ainda relacionar níveis de tratamento para os esgotos e efluentes lançados no rio, com o objetivo do enquadramento do corpo d'água de acordo com a legislação ambiental.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FAPESP pela bolsa de estudo concedida durante a realização desta pesquisa.

REFERÊNCIAS

BROWN, L. C.; BARNWELL Jr., T. O. 1987. **Computer program documentation for the enhanced stream water quality model QUAL2E and QUAL2E-UNCAS**. Athens: US Environmental Protection Agency, 206 p. (Report EPA/600/3-87/007)

CETESB. 1997. **Relatório sobre o controle de qualidade da água para consumo humano**. São Paulo: Cetesb, 254 p. (Série Relatórios)

CHAPRA, S. C. 1997. **Surface water-quality modeling**. Colorado: MacGraw-Hill, 843 p.

CONAMA, Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, n. 53, 18 mar. 2005.

EIGER, S. 1991. Qualidade da água em rios e estuários. In: Porto, R. L. (Org.). **Hidrologia ambiental**. São Paulo: EDUSP/ABRH, p. 69-163. (Coleção ABRH de recursos hídricos; v. 3)

EPA, Environmental Protection Agency. 1995. **Qual2E Windows Interface User's Guide**. Athens: USEPA (United States Environmental Protection Agency), 60 p. (Report EPA/823/B/95/003)

GONÇALVES, J. C. S. et al. 2008. Desenvolvimento de modelo para simulação em regime não permanente da qualidade da água em rios, utilizando o software VenSim Ple. In: ANAIS DO XIII SILUBESA, 2008, Belém. CD-Rom.

McCUTCHEON, S. C. 1989. **Transport and surface exchange in rivers**. Boca Raton: CRC Press, 325 p. v. 1.

RUNKEL, R. L. 1998. **One dimensional transport with inflow and storage (OTIS): a solute transport model for streams and rivers**. Denver: USGS Water Resources Investigation, 73 p. (Report 98-4018)

SILVA, S. C.; RIBEIRO, M. M. R. 2006. Enquadramento dos corpos d'água na bacia do Rio Pirapama – PE. **Revista da Assoc. Brasileira de Engenharia Sanitária**, **11**(4):371-379.

SEMA/SP, Secretaria de Estado do Meio Ambiente. 1994. **Estabelecimento de metas ambientais e reenquadramento dos corpos d'água: Bacia do Rio Piracicaba**. São Paulo: CETESB [et al.], 81 p. (Série Manuais Ambientais)

TEIXEIRA, C. A. 2004. **Gerenciamento integrado de quantidade e qualidade de água**. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, 257 p.

THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. 1987. **Principles of surface water quality modeling and control**. New York: HarperCollinsPublishers Inc, 644 p.

TUCCI, C. E. M. 1998. **Modelos hidrológicos**. Porto Alegre: UFRGS [et al.], 669 p.

WHITEHEAD, P. G. 1984. **The application of mathematical models of water quality and pollutant transport: An international intercomparison**. Paris: UNESCO, 50 p. (Technical documents in hydrology – Project IHP-II-A.1.7.1)