

Modelo de simulação de OD e DBO integrando rio e reservatório aplicado ao rio Tietê

Simulation model of DO and BOD integrating river and reservoir applied to the Tietê River

João Rafael Bergamaschi Tercini e Arisvaldo Vieira Mélo Júnior

Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, SP, Brasil

joao.tercini@usp.br; arisvaldo@usp.br

Recebido: 01/07/2015- Revisado: 13/10/2015- Aceito: 14/12/2015

RESUMO

Um modelo de simulação de OD e DBO, combinando rios e reservatórios, foi desenvolvido no aplicativo Microsoft Office Excel e aplicado no rio Tietê, trecho entre Pirapora do Bom Jesus e Salto, conhecido por ser poluído devido ao recebimento do aporte de carga orgânica remanescente da Região Metropolitana de São Paulo. Na calibração utilizaram-se dados monitorados e ferramentas de otimização. Foram simulados 12 cenários caracterizados pela combinação das seguintes variáveis: vazão descarregada (700, 411 e 130 m³/s), nível do reservatório (691 e 688 m) e concentração de DBO afluente ao reservatório de Pirapora (37 e 56 mgO₂/L). A análise destes cenários permitiu avaliar os possíveis impactos da operação do reservatório na qualidade da água do rio Tietê a jusante deste barramento. Os resultados indicaram que a qualidade da água afluente ao reservatório sobressai perante os aspectos operacionais do mesmo. Diminuir o aporte dessa carga orgânica remete a um planejamento de longo prazo. Uma alternativa de curto prazo para minimizar os impactos é operar o reservatório com descarga baixa (130 m³/s), mantendo o nível normal (691 m). Desta maneira, quando a concentração de DBO afluente é alta (56 mgO₂/L), o trecho entre Pirapora do Bom Jesus e Cabreúva fica anóxico e a região de Salto apresenta concentrações de OD e DBO de 3 e 20 mgO₂/L, respectivamente. Quando é normal (37 mg/L), não é encontrada condições de anaerobiose em todo o trecho simulado e a região de Salto apresenta concentrações de 6 mgO₂/L e DBO igual a 17 mgO₂/L.

Palavras Chave: Qualidade da água. Carga orgânica. Rio Tietê. Operação de reservatórios.

ABSTRACT

A simulation model of DO and BOD combining rivers and reservoirs, was developed in the software Microsoft Office Excel and used in the Tietê river, stretch between Pirapora do Bom Jesus and Salto, known to be polluted due to the receipt of the remaining organic load contribution to Metropolitan Region of São Paulo. The calibration used to monitored data and optimization tools. They were simulated 12 scenarios characterized by the combination of the variables: discharged flow (700, 411 and 130 m³/s), level of the reservoir (691 and 688 m), and input concentration of BOD to Pirapora reservoir (37 and 56 mgO₂/L). With these analysis of the scenarios was possible to evaluate the impacts of reservoir operation on the water quality of the Tietê River downstream of this dam. The results indicated that the water quality to input on reservoir protrudes towards the operational aspects. Reduce the contribution that organic load refers to a long-term planning. A short-term alternative is to minimize the impacts operate with low discharge reservoir (130 m³/s), while keeping the normal level (691 m). Thus, when the input concentration of BOD is high (56 mgO₂/L), the stretch between Pirapora do Bom Jesus and Cabreúva is anoxic and the region of Salto presents DO and BOD concentrations of 3 and 20 mgO₂/L, respectively. When normal (37 mgO₂/L), is not found anaerobic conditions throughout the simulated stretch and the region of Salto presents concentrations of 6 mgO₂/L and BOD equal to 17 mgO₂/L.

Keywords: Water quality. Organic load. Tiete river. Reservoirs operation.

INTRODUÇÃO

Desde as antigas civilizações as populações se aglomeraram nas proximidades dos corpos d'água (GORSKI, 2010). A cidade de São Paulo, por exemplo, fundada em 1554, estabeleceu-se entre os rios Tamanduateí e Anhangabaú (afluentas do rio Tietê), por quase três séculos. Com o ciclo do café a cidade começa a crescer e apresentar investimentos na infraestrutura urbana, como: pontes, linhas de trem, saneamento, entre outros. Posteriormente, o processo de industrialização acelerou o crescimento da cidade, causando a ocupação das margens dos rios Tietê e Pinheiros (KAHTOUNI, 2004). Em geral, a poluição, a ocupação desordenada e a falta de tratamento de efluentes são as principais causas dos impactos ambientais em rios urbanos. Assim como em outros rios de megacidades, o rio Tietê é um exemplo claro dessa consequência. De acordo com CETESB ([2014]), a carga orgânica poluidora remanescente na bacia do Alto Tietê, que abrange os municípios da Região Metropolitana de São Paulo, é de aproximadamente 660 ton O₂.dia⁻¹. Cargas orgânicas lançadas nos corpos d'água induzem o consumo de oxigênio na água, provocando a mortandade de peixes e outras formas de vida aquática.

A poluição das águas em rios urbanos tem um preço à sociedade, seja pela indisponibilidade na quantidade de água, seja pelo efeito na redução da qualidade de vida das pessoas. Na gestão dos recursos hídricos, o primeiro passo a ser dado para mitigar a situação de degradação é compreender o processo de autodepuração do sistema hídrico. O conhecimento do comportamento dos parâmetros de inferência da qualidade da água para diferentes condições de cargas poluidoras e vazões de referência auxilia o processo decisório em relação aos usos pretendidos, além de embasar o planejamento das alternativas de tratamento (TERCINI, 2014). Segundo James (1993), modelos de simulação da qualidade da água são essenciais nessa avaliação, pois representam processos físicos de advecção e difusão, e processos bioquímicos e físicos de conversão (decomposição bacteriana, volatilização e reações químicas sofridas pelos constituintes da água).

Embora exista uma grande variedade de modelos, conforme observado por Kannel et al. (2011), deve-se utilizar aquele que melhor represente as condições ambientais do caso em estudo, dos objetivos propostos, além de depender da disponibilidade de tempo e dados, e custo financeiro. De acordo com Cox (2003) é necessário avaliar o ambiente modelado, o propósito, o número de dimensões consideradas, a forma como os processos são descritos, a disponibilidade de dados e a variabilidade temporal. A maneira pela qual os processos são descritos define a categoria do modelo se conceitual ou empírico. Ao contrário dos conceituais, os modelos empíricos não tentam explicitamente modelar processos físico-químicos. Por este motivo os modelos conceituais são usados na hidrologia e na engenharia ambiental quando interessa saber a transformação dos constituintes da qualidade da água ao longo do sistema, ou quando se deseja realizar previsões dos impactos causados por modificações no ambiente.

Em relação ao ambiente modelado, é comum encontrar modelos que simulam separadamente rios, reservatórios ou es-

tuários. Por exemplo, Kannel et al. (2011) elencou e revisou os seis modelos mais utilizados de qualidade da água de domínio público que simulam o oxigênio dissolvido em rios e córregos. Estes modelos são: SIMCAT (simulation catchment), TOMCAT (temporal overall model for catchment), QUAL2Kw, QUAL2EU, WASP7 (water quality analysis simulation program) e QUASAR (quality simulation along rivers). Os modelos SIMCAT e TOMCAT são os mais simplificados, porém úteis para analisar rapidamente o impacto de fontes pontuais. O QUAL2Kw tem opção de representar a morte de algas na DBO, portanto mais completo que o QUAL2EU, uma vez que as macrófitas desempenham importante papel nessa interação. Já a grande quantidade de dados requeridos para WASP7 e QUASAR dificulta justificar o tempo e custos necessários. Aplicações de modelos de qualidade da água realizadas no Brasil foram feitas por Jesus (2006), Knapik (2009) e Mourão Junior (2010).

Modelos, em geral, não dispõem de ferramentas que representem ambientes lênticos e lóticos integradamente, o que dificulta a modelagem de sistemas complexos de recursos hídricos, aqueles que envolvem rios e reservatórios com diferentes características físicas. Uma ferramenta de análise, que satisfaça a necessidade de simulação de sistema complexo, no qual envolvem a operação de reservatórios e análise integrada dos impactos de lançamento de cargas orgânicas auxilia a gestão e o planejamento do sistema de recursos hídricos.

O reservatório de Pirapora, localizado na cidade de Pirapora do Bom Jesus, no estado de São Paulo, é conhecido por apresentar o fenômeno de formação de espumas nas estruturas de descarga devido ao aporte de carga de toda a Região Metropolitana de São Paulo. O reservatório também exerce a função de controle de inundações a jusante da barragem, especialmente da própria cidade de Pirapora do Bom Jesus e da Estrada dos Romeiros.

Em dezembro de 2006 foi realizado um teste de rebaixamento controlado do reservatório, com monitoramento do Departamento de Águas e Energia Elétrica (DAEE), Empresa Metropolitana de Águas e Energia S.A. (EMAE) e a Companhia Ambiental do Estado de São Paulo (CETESB). Previa-se rebaixar o nível de água gradativamente. Devido às obras do rebaixamento da calha do Rio Tietê as vazões afluentes ao reservatório aumentariam e seria necessário estabelecer uma nova regra operativa a fim de amortecer as cheias e reduzir os impactos da mesma a jusante do reservatório. No entanto, no dia 25/12/2006 o teste foi interrompido devido à ocorrência de mortandade de peixes no Médio Tietê atribuída, pela Agência CETESB de Sorocaba, à contaminação das águas causada pelo rebaixamento efetuado. Segundo a EMAE, o centro de Operação do Sistema foi informado pelo operador da Usina de Porto Góes que havia uma grande quantidade de lodo afluindo à usina, o que vinha prejudicando a operação das unidades geradoras.

A CETESB monitorou o evento e concluiu que as operações correspondentes às duas etapas do rebaixamento dos níveis do Reservatório de Pirapora não implicaram em nenhum impacto à qualidade do Rio Tietê a jusante do barramento (CETESB, 2007). Porém diante do evento ocorrido o reservatório de Pirapora foi considerado o causador da mortandade de peixes e da péssima qualidade da água descarregada que segue

para jusante. Porém não houve indícios que comprovem que a operação do reservatório é a causadora da mortandade. Segundo Tercini (2014) o fato das águas que afluem o reservatório estarem tão poluídas que este (assim como os outros reservatórios do trecho estudado) agem como lagoas de estabilização e aeram as águas nos dissipadores de energia, dessa forma, melhorando a qualidade da água.

Outro evento parecido ocorreu em 27/11/2014 no qual o secretário de Meio Ambiente de Salto/SP, João De Conti Neto, diz que ao menos 40 toneladas de peixes foram mortas pela manta de poluição que escureceu as águas do rio Tietê, sendo a maior mortandade de peixes já registrada no município de Salto (SIQUEIRA, 2014).

Neste contexto, da necessidade do suporte da modelagem para gestão de recursos hídricos, é proposto um modelo de simulação da qualidade da água, para os parâmetros Oxigênio Dissolvido (OD) e Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO), em sistemas hidrológicos integrando rios e reservatórios. O objetivo deste trabalho além de apresentar um modelo integrado que necessite de poucos dados de entrada, é identificar no estudo de caso do rio Tietê o papel relevante dos reservatórios na melhora da qualidade da água e possivelmente amparar uma regra de operação do reservatório de Pirapora, ou de outros reservatórios, que não envolva só aspectos quantitativos.

MÉTODO

O modelo integrado proposto foi desenvolvido em planilha no software Microsoft Office Excel, no qual rios são discretizados em intervalos regulares de 100 em 100 metros, e reservatórios são posicionados de acordo com sua localização. Consiste na estimativa das concentrações de OD e DBO ao longo do rio, subdividido em trechos, e no reservatório, a partir de uma concentração inicial e de características do sistema (coeficientes de decaimento dos poluentes, velocidades dos cursos d'água, volumes dos reservatórios). O modelo adota as equações básicas de Streeter e Phelps (1925) modificando o equacionamento para a estimativa dos parâmetros nos reservatórios. A equação (1) representa o decaimento de primeira ordem para DBO e a equação (2) o déficit de OD a uma distância do ponto inicial, em que L e D são as concentrações de DBO e déficit de OD à distância x (m) do ponto inicial (mgO_2/L), L_0 é a concentração de DBO inicial (mgO_2/L), D_0 é o déficit inicial de OD (mgO_2/L), k_d é a constante de decaimento da DBO (dia^{-1}), k_a é a constante de aeração (dia^{-1}) e U é a velocidade média do rio (m/s).

$$L = L_0 e^{-\frac{k_d}{U}x} \quad (1)$$

$$D = D_0 e^{-\frac{k_a}{U}x} + \frac{k_d L_0}{k_a - k_d} \left(e^{-\frac{k_d}{U}x} - e^{-\frac{k_a}{U}x} \right) \quad (2)$$

Quando a concentração de OD for igual ou menor que zero (condição de anaerobiose), o modelo necessita ser corrigido para OD igual a zero, pois não existem valores negativos de OD, e a degradação da matéria orgânica se dá de forma linear

(CHAPRA, 1997). Na fase anaeróbia a concentração da DBO é descrita pela equação (3) e o comprimento do trecho do rio onde ocorrerá a decomposição na ausência de oxigênio é dado pela equação (4), em que L_f é a última concentração de DBO observada antes da condição de anaerobiose (mgO_2/L), x é a distância do ponto onde se inicia a fase anaeróbia (m) e x_f é o comprimento do trecho do rio onde ocorre a fase anaeróbia (m).

$$L = L_i - k_a O_{\text{sat}} \left(\frac{x}{U} \right) \quad (3)$$

$$x_f = \left(\frac{L_i}{k_a O_{\text{sat}}} - \frac{1}{k_d} \right) \cdot U \quad (4)$$

As equações de (1) a (4) representam o decaimento da DBO e consumo de OD em função da posição, considerando um escoamento em regime estacionário do rio e compõem o modelo de modelo de Streeter-Phelps modificado.

No reservatório foi adotado um modelo de mistura completa que é adequado para reservatórios que não apresentam estratificação vertical em relação à temperatura e que apresentam tempos de residência do volume armazenado reduzidos (menor que um ano), conforme Chapra (1997), sendo que em média o maior reservatório simulado apresenta 1,5 dias de tempo de residência. O tempo de residência é o período médio que uma determinada massa de água permanece no reservatório desde a chegada até a saída e pode ser calculado a partir dos dados de volume do reservatório e a vazão descarregada, conforme a equação (5), em que T_{res} é o tempo de residência da água no reservatório (dias), Vol é o volume do reservatório (hm^3), Q_{jus} é a vazão a jusante do reservatório, ou vazão descarregada (m^3/s). Os reservatórios são simulados por meio das equações (1) e (2) substituindo a relação x/U por T_{res} e considerando os coeficientes k_d e k_a correspondentes a cada reservatório. O modelo também considera a aeração da água provocada pelos dissipadores de energia dos reservatórios que em determinadas condições de descarga podem aumentar significativamente a concentração de OD para os trechos de jusante. A equação (6) dada por Butts e Evans (1978) foi usada para calcular o déficit de OD a jusante do dissipador (D_{jus}), dado pelo produto do déficit de OD a montante do dissipador (D_{mont}) e o índice de redução do déficit (r).

$$T_{\text{res}} = 11,574 \cdot \frac{Vol}{Q_{\text{jus}}} \quad (5)$$

$$D_{\text{jus}} = D_{\text{mont}} \cdot r \quad (6)$$

A calibração do modelo consistiu em variar os coeficientes das equações de maneira a se obter dados calculados que representassem a mediana dos valores medidos em campo. Os coeficientes de decaimento da DBO e de aeração variaram de 0 a 2 dia^{-1} , a velocidade média do rio variou de 0 a 2 m/s e o índice de redução do déficit variou de 0 a 1. Esses coeficientes foram alterados de maneira sistemática, dentro das faixas de variação citadas, e as concentrações de OD e DBO calculadas

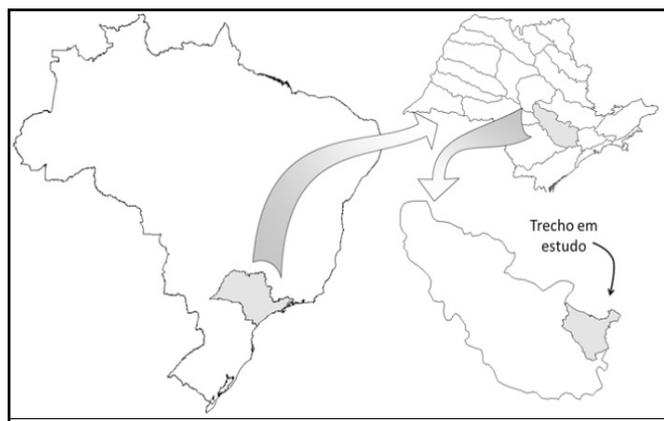


Figura 1 – Localização da área de estudo

foram comparadas com valores observados. O modelo foi considerado calibrado quando as curvas das concentrações dos parâmetros calculados ficaram entre os intervalos interquartis de 25% (1º quartil) e 75% (3º quartil) dos dados observados (região com 50% dos dados). A ferramenta de otimização Solver da Frontline Systems, disponível no software Microsoft Office Excel, foi usado na calibração do modelo. A função objetivo foi minimizar a soma dos desvios quadrados entre as concentrações calculadas e a mediana das observadas tanto para DBO quanto para OD. A dispersão dos valores calibrados com a mediana dos observados foi medida por meio do erro padrão da estimativa conforme Naghettini e Pinto (2007).

O modelo de qualidade da água integrando rio e reservatório foi aplicado em um trecho do rio Tietê entre os municípios de Pirapora do Bom Jesus e Salto, na Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos do Médio Tietê e Sorocaba, no Estado de São Paulo, em um comprimento de 83 km, conforme a figura 1. O trecho apresenta cinco postos de monitoramento da qualidade da água realizado pela Companhia Ambiental do Estado de São

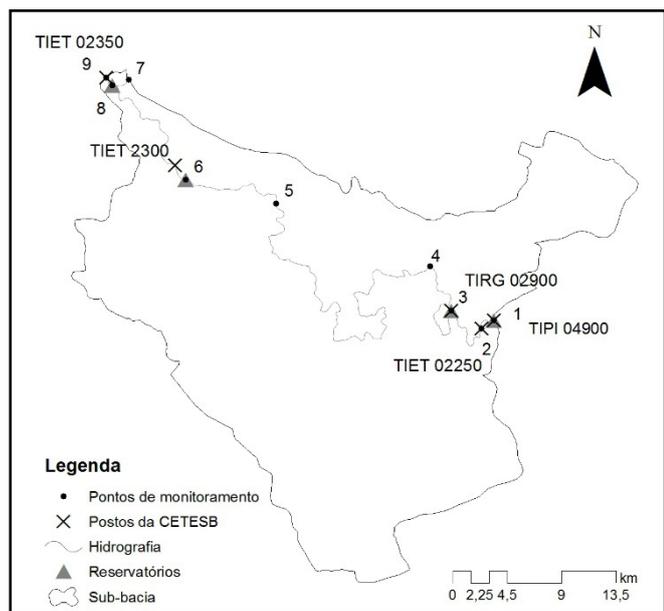


Figura 2 – Pontos de monitoramento mensal (autores) e bimestral (CETESB) no rio Tietê, no trecho entre o reservatório de Pirapora e o município de Salto

Paulo (CETESB), dos quais três estão ativos (TIPI 04900, TIRG 02900 e TIET 02300). Os dados apresentam uma frequência bimestral formando séries históricas de OD, DBO e temperatura da água entre 21 e 37 anos de dados. Para proporcionar melhores condições de calibração do modelo, também foi realizado um monitoramento mensal das mesmas variáveis por Tercini e Mélo Júnior (2013), durante o ano de 2012, em pontos distribuídos ao longo do trecho estudado, sendo oito pontos no rio Tietê e um no rio Jundiá, apresentados na tabela 1 (Figura 2).

Tabela 1 – Pontos de monitoramento mensal realizado pelos autores

Ponto	Identificação	Latitude	Longitude	Rio
1	Reservatório Pirapora	-23,3916	-46,9948	Tietê
2	Ponte de Pirapora	-23,3959	-47,0047	Tietê
3	Reservatório Rasgão	-23,3829	-47,0293	Tietê
4	Mesas na estrada dos Romeiros	-23,3496	-47,0448	Tietê
5	Ponte do sítio em Cabreúva	-23,3008	-47,1676	Tietê
6	Reservatório São Pedro	-23,2808	-47,2403	Tietê
7	Reservatório Porto Góes	-23,2098	-47,2969	Tietê
8	Ponte dos Pescadores	-23,2038	-47,3021	Tietê
9	Ponte da Eucatex em Salto	-23,2057	-47,2864	Jundiá

As características físicas dos reservatórios estão apresentadas na tabela 2. As curvas cota-volume dos reservatórios são dadas pelas equações (7), (8) e (9), em que *Vol* é o volume (m³) e *N* o nível do reservatório em (m RN EPUSP), para os reservatórios Pirapora, Rasgão e Porto Góes, respectivamente. O reservatório da Usina São Pedro é muito pequeno e sua regularização foi desconsiderada, levando em conta somente o efeito de aeração causada pela descarga (dissipadores de energia). Os reservatórios desse trecho operam a fio d'água, exceto Pirapora.

$$0,3(N - 683)^4 + 10,164 \cdot 10^4(N - 683)^3 - 47,021 \cdot 10^4(N - 683)^2 + 66,21 \cdot 10^4(N - 683) \quad (7)$$

$$Vol = 221,37(N - 646)^{3,65} \quad (8)$$

$$Vol = 4180,36(N - 512)^{2,12} \quad (9)$$

Em dezembro de 2006 foi realizado um teste de rebaixamento controlado do reservatório em que foi previsto rebaixar o nível de água gradativamente, até a cota do nível mínimo operacional 688 m, compatível com uma vazão de restrição de 700 m³/s na saída da barragem. Este teste teve a finalidade de controle de cheias em São Paulo. No entanto, no dia 27/12/2006, ao atingir a cota 690 m, o teste foi interrompido devido à ocorrência de mortandade de peixes nos municípios de Itu, Salto, porto Feliz e Tietê, atribuída à contaminação das águas causada pelo rebaixamento efetuado. A vazão máxima descarregada pela Barragem de Pirapora foi igual a 411 m³/s (CETESB, 2007). Na ocasião não ficou comprovado que a causa da mortandade

Tabela 2 – Dados físicos dos reservatórios no rio Tietê, no trecho entre o reservatório de Pirapora e Salto

Dados	Pirapora	Rasgão	Porto Góes
Volume (hm ³)	78,702	6,677	0,439
Cota ¹ máxima (m)	699	663	521
Nível operacional normal (m)	691	-	-
Nível rebaixado (m)	688	-	-
Vazão média (m ³ /s)	135,38	133,21	155,62
Tempo de residência médio (dia)	1,50	0,45	0,03

1-Cotas no RN EPUSP

dos peixes foi provocada pela operação do reservatório. Desde então a questão não foi suficientemente esclarecida. As variáveis relacionadas a este problema serviram de base para a aplicação do modelo proposto. Foram estabelecidos 12 cenários de simulação combinando-se a vazão descarregada, o nível e a concentração afluente de DBO no reservatório Pirapora, conforme a tabela 3.

A vazão descarregada pelo reservatório Pirapora de 700 m³/s representa o máximo permitido, 411 m³/s representa um valor intermediário, idêntico à vazão descarregada no evento de mortalidade de peixes e 130 m³/s representa a mediana observada no monitoramento. O nível do reservatório Pirapora de 691 m é o nível normal de operação e 688 m o nível rebaixado. As concentrações afluentes de DBO foram 37 mgO₂/L (mediana dos dados observados) e 56 mgO₂/L (3º quartil dos dados observados), denominados qualidade da água afluente comum e qualidade da água afluente ruim, respectivamente. Essas condições representam três patamares de vazão descarregada (alto, médio e baixo), duas possibilidades de níveis (normal e

Tabela 3 - Cenários para as condições de contorno do reservatório de Pirapora

N.	Cenário	Descarga m ³ /s	Nível m	DBO afluente mgO ₂ /L
1	Descarga alta, nível normal e DBO afluente comum	700	691	37
2	Descarga alta, nível baixo e DBO afluente comum	700	688	37
3	Descarregada alta, nível normal e DBO afluente ruim	700	691	56
4	Descarga alta, nível baixo e DBO afluente ruim	700	688	56
5	Descarga média, nível normal e DBO afluente comum	411	691	37
6	Descarga média, nível baixo e DBO afluente comum	411	688	37
7	Descarga média, nível normal e DBO afluente ruim	411	691	56
8	Descarga média, nível baixo e DBO afluente ruim	411	688	56
9	Descarga baixa, nível normal e DBO afluente comum	130	691	37
10	Descarga baixa, nível baixo e DBO afluente comum	130	688	37
11	Descarga baixa, nível normal e DBO afluente ruim	130	691	56
12	Descarga baixa, nível baixo e DBO afluente ruim	130	688	56

rebaixado) e dois níveis quanto à qualidade da água que provem da Região Metropolitana de São Paulo - RMSP (comum e ruim).

Não foram incluídas descargas pontuais e difusas ao longo do trecho modelado, uma vez que essas informações não representam um aporte significativo de vazão e de carga no trecho, exceto o rio Jundiá que contribui com aporte significativo de vazão e de carga pontual.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Calibração do modelo integrado de rio e reservatório

Na calibração do modelo foram consideradas as seguintes condições de contorno: (i) mediana das concentrações observadas no monitoramento, (ii) as vazões descarregadas nos reservatórios de 130 m³/s em Pirapora, 119,56 m³/s em Rasgão e 115,24 m³/s em Porto Góes, (iii) os níveis nos reservatórios de 691,67 em Pirapora, 661,30 m em Rasgão e 519,43 em Porto Góes, (iv) a temperatura média da água foi adotada 24,2°C e a elevação média dos rios de 610 m, (v) as concentrações de 0 mgO₂/L de OD e 37 mgO₂/L de DBO na vazão afluente ao reservatório de Pirapora, e (vi) as concentrações para o rio Jundiá de 5,5 mgO₂/L de OD, 30 mgO₂/L de DBO e a vazão de 20 m³/s. A calibração resultou nos valores dos coeficientes do modelo de simulação integrado de rio e reservatório (Tabela 4). Os coeficientes calibrados para todos os trechos do rio apresentaram: velocidade média (*U*) de 0,343 m/s, *k_d* de 0,188 dia⁻¹ e *k_e* de 1,12 dia⁻¹. Exceto no trecho da corredeira localizada entre os quilômetros 63,3 e 66,6 (3,3 km de comprimento), em que a taxa de aeração *k_e* foi igual a 10 dia⁻¹. A figura 3 mostra os perfis das concentrações de OD e DBO calculadas pelo modelo integrado calibrado e o box-plot dos pontos monitorados por Tercini e Mélo Júnior (2013), indicando a representatividade dos coeficientes do modelo de simulação. O erro padrão da estimativa é de 0,47 mgO₂/L para OD e 1,7 mgO₂/L.

Tabela 4 - Valores calibrados dos coeficientes do modelo integrado de simulação de OD e DBO nos reservatórios do rio Tietê

Reservatório	Coefficiente	Valor
Pirapora	<i>k_d</i> (dia ⁻¹) ^a	0,282
	<i>k_a</i> (dia ⁻¹) ^b	0,100
	<i>r</i> ^c	0,500
Rasgão	<i>k_d</i> (dia ⁻¹)	0,183
	<i>k_a</i> (dia ⁻¹)	0,009
São Pedro ^d	<i>r</i>	0,965
	<i>r</i>	0,366
Porto Góes	<i>k_d</i> (dia ⁻¹)	0,000
	<i>k_a</i> (dia ⁻¹)	0,020
	<i>r</i>	0,968

a: constante de decaimento da DBO; b: constante de aeração; c: índice de redução do déficit; d: o reservatório de São Pedro foi considerado com um trecho de rio, somente sendo considerada a influência dos dissipadores de energia.

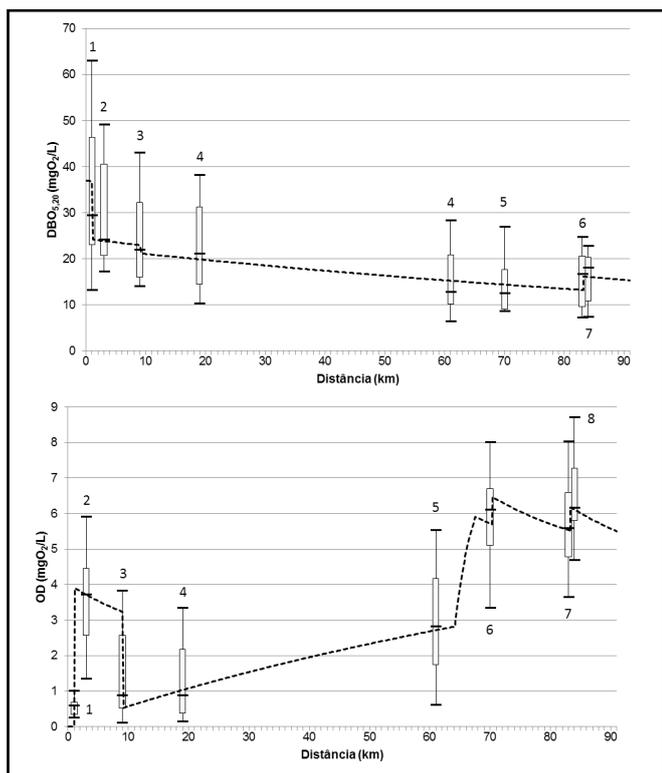


Figura 3 - Perfil calibrado do modelo integrado de simulação de OD e DBO para o rio Tietê, entre o reservatório de Pirapora e Salto

Em diversos estudos realizados em rios nos EUA citados por Bowie et al. (1985), valores calibrados de k_d variaram de 0,01 a 1,5 dia⁻¹, mostrando que o coeficiente obtido para o rio Tietê, no trecho estudado, apresenta a mesma ordem de grandeza. Mourão Junior (2010) observou uma variação do k_d entre 0,08 e 1 dia⁻¹ para o rio Piracicaba. Knapik (2009) determinou em laboratório o k_d para dois pontos na bacia do Alto Iguaçu, Região Metropolitana de Curitiba, em que os valores situaram-se entre 0,03 e 0,56 dia⁻¹ para um ponto e entre 0,07 e 0,34 dia⁻¹ para outro ponto.

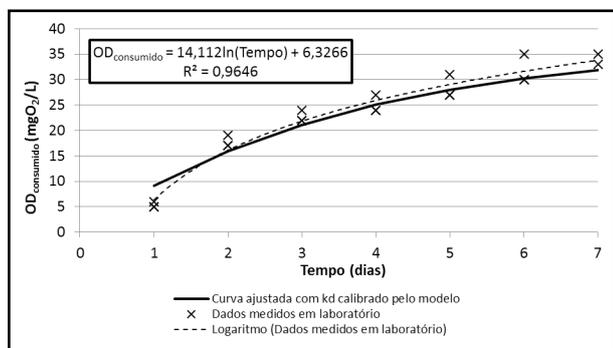


Figura 4 - k_d determinado pelo ensaio de DBO com frequência diária de medição

O valor de k_d teve sua confirmação num ensaio realizado para a amostra do mês de junho das águas coletadas no reservatório Pirapora. Este ensaio resumiu-se a medir o consumo de oxigênio diariamente, utilizando o equipamento OxiDirect®

BSB BOD da AQUALYTIC, desta maneira criando uma curva do oxigênio consumido no tempo apresentado no gráfico da figura 4 justamente com a curva calculada com taxa de decaimento igual 0,282 (calibrado pelo modelo). Este fato confirma a qualidade da calibração deste parâmetro, que é representativo para o ajuste obtido pelos dados observados, cujo o coeficiente de determinação foi de 0,9646.

MODELAGEM DOS CENÁRIOS

Os cenários simulados foram definidos levando em conta a variação das características operacionais do reservatório Pirapora, conforme tabela 3. A pior qualidade da água foi constatada no cenário 4, em que no trecho entre o reservatório de Rasgão e a corredeira (P3 e P5) apresentou anaerobiose. O trecho encachoeirado proporcionou um acréscimo de OD que foi sendo consumido no restante do trecho, inclusive a jusante do reservatório de Porto Góes (P7), conforme a figura 5. O cenário 9 apresentou as melhores condições de qualidade da água, mantendo concentrações de OD acima de 4 mgO₂/L. Este cenário foi o mais parecido com a condição mediana do monitoramento, utilizado para a calibração do modelo.

O diagrama unifilar, apresentado na figura 6, contém as concentrações de OD para todos os cenários estudados ao longo do trecho do rio Tietê desde o reservatório de Pirapora até o município de Salto. Os cenários comuns de qualidade da água afluente ao reservatório de Pirapora (cenários 1, 2, 5, 6, 9 e 10) não apresentam anaerobiose no trecho estudado. Em contrapartida todos os cenários com qualidade ruim da água, afluente ao reservatório Pirapora (cenários 3, 4, 7, 8, 11 e 12), apresentam anaerobiose entre os reservatórios de Pirapora (km 0) e São Pedro (km 70). Este resultado destaca que a carga de DBO afluente ao reservatório é a principal influência na qualidade da água a jusante desse reservatório, pois está relacionada à grande demanda de oxigênio provocada pela carga orgânica da RMSF.

Os aspectos operacionais do reservatório de Pirapora (variação de nível e descarga) também influenciam a qualidade da água a jusante. Os cenários que consideram o nível normal de operação (cenários 1, 3, 5, 7, 9 e 11) apresentam uma melhor qualidade da água geral em todo o trecho em estudo do que os cenários (2, 4, 6, 8, 10, 12) em que o reservatório está rebaixado. Resultado semelhante acontece quando são comparadas a vazões descarregadas pelo reservatório. A qualidade da água em todo o trecho nos cenários de vazões baixas (cenários 9, 10, 11 e 12) é melhor em relação às vazões médias descarregadas (cenários 5, 6, 7 e 8). Por sua vez, os cenários de vazões médias descarregadas apresentam melhor qualidade da água do que os cenários de vazões altas (cenários 1, 2, 3 e 4).

A qualidade da água afluente ao reservatório de Pirapora sobressai perante os aspectos operacionais do mesmo, sendo que, operando o reservatório da maneira mais conservadora possível (baixa vazão descarregada e nível normal), quando a carga de matéria orgânica proveniente da RMSF é alta, o trecho entre Pirapora do Bom Jesus e Cabreúva fica anóxico e a região de Salto apresenta concentrações de OD e DBO de 3 e 20 mgO₂/L, respectivamente. Os resultados indicaram que a

alternativa mais eficiente para diminuir os impactos na qualidade da água para jusante é reduzir a carga orgânica gerada pela RMSP. Outra possibilidade para minimizar os impactos na qualidade da água a jusante é manter o reservatório com níveis elevados e descarregar vazões baixas.

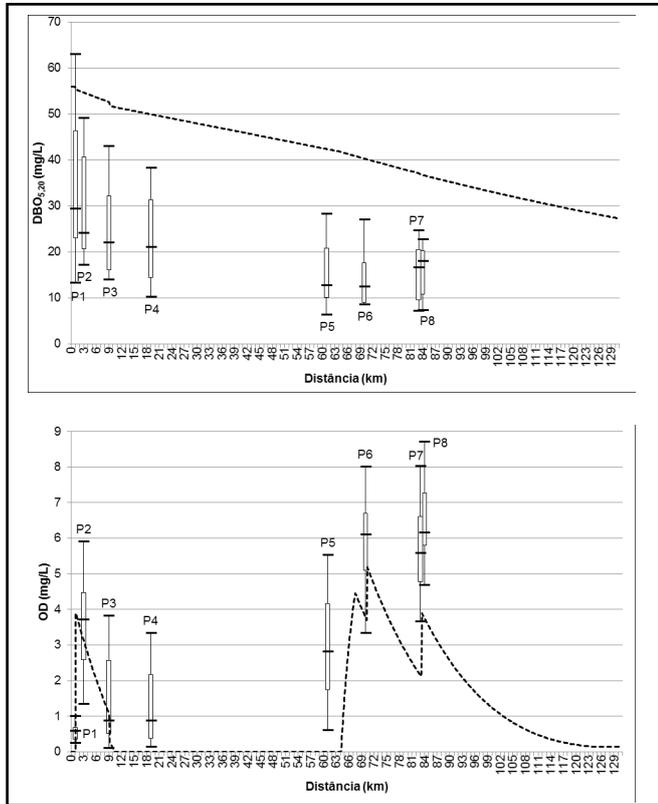


Figura 5 - Perfis de DBO e OD calculado pelo modelo integrado para o cenário 4

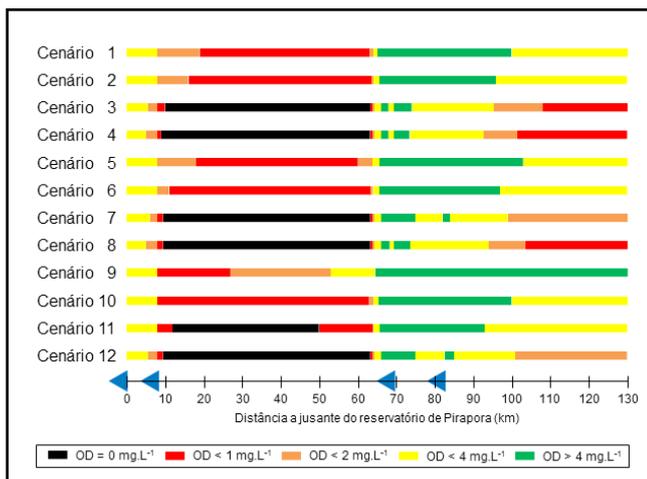


Figura 6 - Concentrações de OD simuladas para todos os cenários, ao longo do trecho estudado do rio Tietê

A condição de rebaixamento do reservatório (688 m), mesmo que para vazões baixas quando a DBO afluente a montante de Pirapora é ruim, conferiu uma qualidade não aceitável a jusante do reservatório de Porto Góes, pois as concentrações

de OD foram inferiores a 2 mgO₂/L, o que pode provocar impactos na sobrevivência de algumas espécies de peixes. Manter o nível de operação normal (691 m) minimiza esse impacto (Cenário 11), elevando as concentrações de OD para níveis acima de 2 mgO₂/L. Ressalta-se que, as condições que levaram ao evento de mortandade de peixes ocorrido em dezembro de 2006 são similares ao cenário 6. O parecer dado pela CETESB (2007) inferiu que o rebaixamento do reservatório não impactou a qualidade da água a jusante do barramento de Pirapora. A mesma observação foi encontrada na análise do cenário 6 para os mesmos pontos citados no parecer (reservatório de Rasgão e a jusante do reservatório de Porto Góes). Porém, percebeu-se que a qualidade da água calculada pelo modelo, no trecho intermediário, é impactada pelo rebaixamento do reservatório. Como o parecer não apresentou dados para pontos no trecho intermediário, essa constatação não pôde ser verificada.

Verificou-se que os reservatórios localizados no trecho melhoram a qualidade da água, pois possuem a capacidade de amortecer a carga orgânica e aerar a água nos dissipadores de energia. Destaca-se o reservatório de Pirapora, que possui o maior volume e, conseqüentemente, o maior tempo de residência. Além disso, os reservatórios proporcionam benefícios relacionados ao amortecimento de ondas de cheia. Quanto mais rebaixado este estiver, melhor para resolver problemas relacionados às cheias, pois maior será seu volume de espera, por outro lado, menor será o tempo de residência da água no reservatório. Os reservatórios, principalmente o de Pirapora, o maior, atuam como lagoas de estabilização. Quanto maior o volume, maior é o tempo de residência, maior o decaimento da matéria orgânica e, conseqüentemente, uma melhor qualidade da água é encontrada no trecho. O efeito positivo do reservatório decorre de uma operação que mantenha cotas elevadas e descargas baixas, possibilitando a autodepuração da matéria orgânica. Assim como o efeito dos dissipadores de energia que promovem grande oxigenação, causando o aumento da capacidade de depuração do rio no trecho a jusante. Este fato não está relacionado ao efeito de diluição causado pelo aumento do volume do reservatório, pois o mesmo encontra-se tão poluído quanto as vazões afluentes.

CONCLUSÃO

O modelo que considera a modelagem de OD e DBO em rio e reservatório, de maneira integrada, desenvolvido e aplicado no trecho do rio Tietê, entre Pirapora do Bom Jesus e Salto, representou com confiabilidade a realidade ali existente. A calibração foi considerada satisfatória e possível de ser realizada pela quantidade de pontos monitorados no trecho. O modelo permite simular vários cenários de operação do reservatório de Pirapora ou qualidade da água afluente do mesmo. Além da possibilidade de ser adaptado facilmente a outras bacias hidrográficas com características semelhantes ao contexto analisado.

A análise dos impactos da operação do reservatório de Pirapora (vazão descarregada e nível), aliados à carga orgânica proveniente da RMSP na qualidade da água do rio Tietê a jusante deste barramento, mostrou que o principal fator, dentre

os que foram avaliados, é a carga de DBO afluente, seguido pelo nível do reservatório e depois, com menor relevância, a vazão descarregada.

A alternativa mais eficiente para diminuir os impactos na qualidade da água para jusante é reduzir a carga orgânica gerada pela RMSP, por exemplo, a ampliação e descentralização das estações de tratamento de esgotos. Esta alternativa requer um planejamento de longo prazo e envolve investimentos finan-

ceiros de grande porte. Outra possibilidade para minimizar os impactos na qualidade da água a jusante é manter o reservatório de Pirapora com níveis elevados e descarregar vazões baixas. As consequências desta operação produzem resultados no curto prazo e não envolve grandes investimentos. Entretanto, manter o nível do reservatório alto diminui a capacidade de controle de cheias e aumenta a probabilidade de descargas elevadas em eventos de cheia, comprometendo a qualidade da água para jusante.

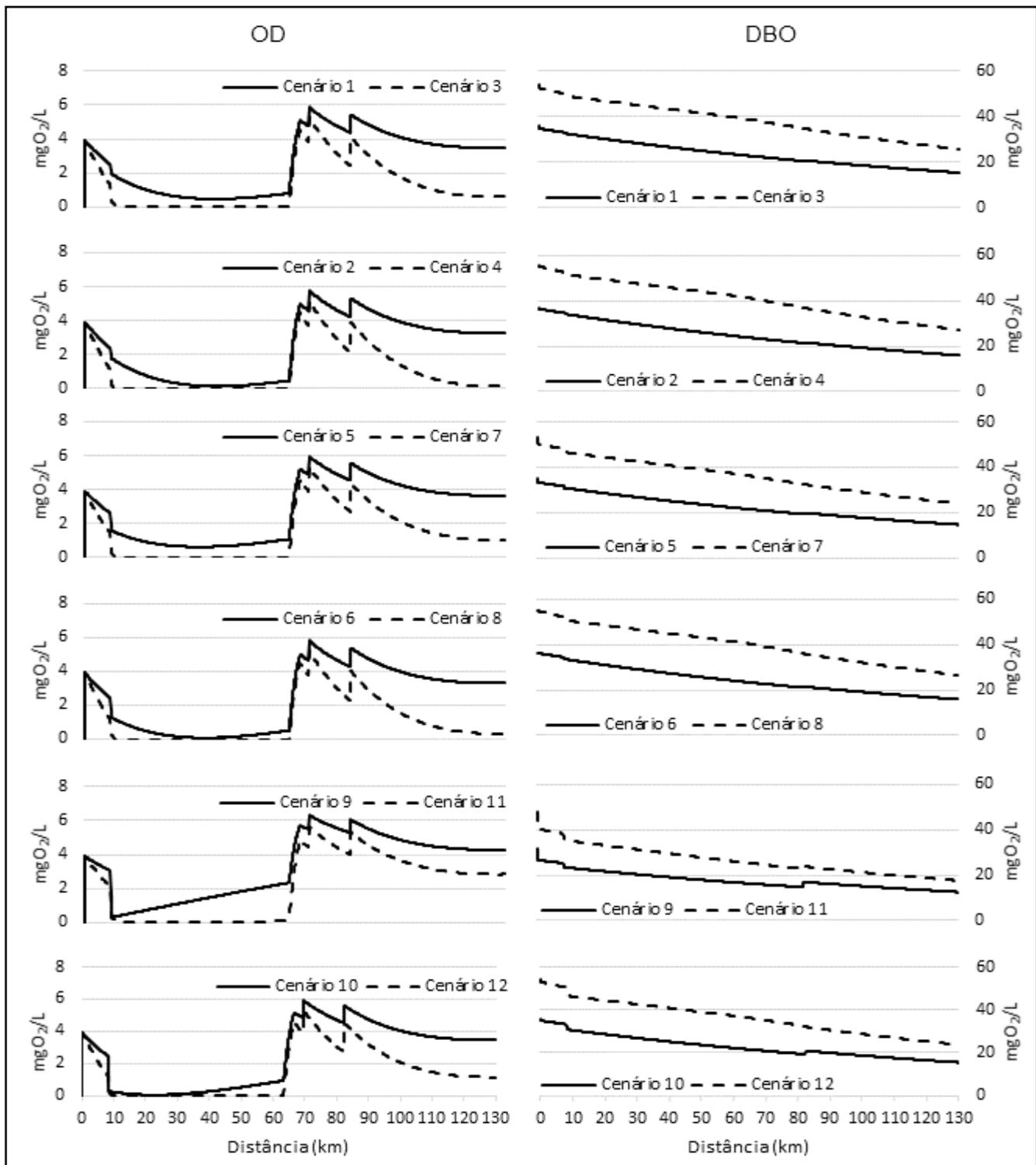


Figura 7 - Perfis da concentrações de OD e DBO simuladas para todos os cenários, ao longo do trecho estudado do rio Tietê

AGRADECIMENTOS

Este artigo foi fruto da Dissertação de Mestrado do primeiro autor, realizada com o auxílio de bolsa do CNPq, do apoio operacional da Fundação Centro Tecnológico de Hidráulica - FCTH nas campanhas de campo, do Laboratório de Saneamento Professor Lucas Nogueira Garcez - EPUSP pela contribuição com as análises laboratoriais e da Empresa Metropolitana de Águas e Energia – EMAE pelo fornecimento de dados dos reservatórios, pelos quais os autores agradecem.

REFERÊNCIAS

- APHA - American Public Health Association. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 18th ed. Washington, DC: APHA, 1992.
- BOWIE, G. L.; MILLS, W. B.; PORCELLA, D. B.; CAMPBELL, C. L.; PAGENKOPF, J. K.; RUPP, G. L.; JOHNSON, K. M.; CHAN, P. W. H.; GHERINI, S. A. *Rates, constants and kinetics formulations in surface water quality modeling*. 2nd ed. Athens: U.S. Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, 1985. EPA/600/3-85/040.
- BUTTS, T. A.; EVANS, R. L. *Effect of Channel Dams on Dissolved Oxygen Concentration in Northeastern Illinois Streams*. Champaign, IL: Illinois State Water Survey, 1978.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Informação Técnica nº 001/07/EEQH: monitoramento da qualidade do Rio Tietê durante as operações de rebaixamento dos níveis do Reservatório de Pirapora*. São Paulo: CETESB, 2007.
- CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. *Relatório de qualidade: pontos de monitoramento e qualidade das águas superficiais*. São Paulo: CETESB, [2014]. Disponível em: <<https://servicos.cetesb.sp.gov.br/infoaguas/>>. Acesso em: 26 fev. 2014.
- CHAPRA, S. C. *Surface water-quality modeling*. New York: McGraw Hill, 1997.
- COX, B. A. A review of currently available in-stream water-quality models and their applicability for simulating dissolved oxygen in lowland rivers. *Sci. Total Environ.*, v. 314-316, p. 335-377, Oct. 2003.
- GORSKI, M. C. B. *Rios e Cidades: ruptura e reconciliação*. São Paulo: Senac, 2010.
- JAMES, A. *An introduction to water quality modeling*. 2nd ed. Londres: John Wiley, 1993.
- JESUS, J. A. O. de. *Utilização de modelagem matemática 3D na gestão da qualidade da água em mananciais: aplicação no Reservatório Billings*. 2006. 142 f. Tese (Doutorado) - Faculdade de Saúde Pública, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2006.
- KAHTOUNI, S. *Cidade das águas*. São Carlos: RiMa, 2004.
- KANNEL, P. R.; KANEL, S. R.; LEE, S.; LEE, Y-S.; GAN, T. Y. A Review of Public Domain Water Quality Models for Simulating Dissolved Oxygen in Rivers and Streams. *Environ. Model. Assess.*, v. 16, n. 2, p. 183-204, Apr. 2011.
- KNAPIK, H. G. *Reflexões sobre Monitoramento, Modelagem e Calibração na Gestão de Recursos Hídricos: Estudo de caso da Qualidade da Água da Bacia do Alto Iguaçu*. 2009. 180 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2009.
- MOURÃO JUNIOR, P. R. *Aplicação do Modelo de autodepuração de Qualidade das Águas QUAL-UFGM*. 2010. 144 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2010.
- NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. *Hidrologia Estatística*. 1. ed. Belo Horizonte: CPRM, 2007.
- PIVELI, R. P.; KATO, M. T. *Qualidade das águas e poluição: aspectos físico-químicos*. São Paulo: ABES, 2005.
- SIQUEIRA, C. Salto retira 40 t de peixes mortos por poluição no Tietê. *O Estado de S. Paulo*, São Paulo, 1 dez. 2014. Disponível em: <<http://www.estadao.com.br/noticias/geral,salto-retira-40-t-de-peixes-mortos-por-poluicao-no-tiete,1600482>>. Acesso em: 1 dez. 2014.
- STREETER, H. W.; PHELPS, E. B. *A study of the natural purification of the Ohio River*. Washington: Public Health Service, 1925. (Public health bulletin, 146).
- TERCINI, J. R. B. *Modelagem da qualidade da água integrando rio e reservatório*. 2014. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2014.
- TERCINI, J. R. B.; MÉLLO JÚNIOR, A. V. Caracterização da qualidade da água do rio Tietê entre Pirapora do Bom Jesus e Salto. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 20., 2013, Bento Gonçalves. *Anais...* Porto Alegre: RBRH, 2013.

Contribuição dos autores

João Rafael Bergamaschi Tercini: Caracterização da área de estudo, coleta dos dados, organização dos dados, elaboração da metodologia, desenvolvimento do modelo, calibração do modelo, elaboração dos gráficos, interpretação dos resultados e elaboração do texto.

Arisvaldo Vieira Mélo Júnior: Orientação do estudo, coleta dos dados, organização da metodologia, escolha dos cenários, discussão dos resultados e elaboração do texto.