

Simulação de Modelagem Quali-Quantitativa para Avaliação Preliminar da Qualidade da Água na Bacia do Ribeirão das Perdizes em Campos do Jordão/SP, como Subsídio ao Enquadramento

Fabricio Cesar Gomes*, Silvio Jorge Coelho Simões*

eng_fabriciocg@hotmail.com; simoes@feg.unesp.br

Recebido: 10/07/13 - revisado: 25/08/13 - aceito: 28/01/14

RESUMO

A pesquisa teve por finalidade apresentar os princípios para a implantação de um futuro programa de enquadramento dos corpos hídricos na UGRHI-1 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos-1/SP) utilizando-se modelagem quali-quantitativa da água. A área de estudo limitou-se ao município de Campos do Jordão/SP, especificamente a bacia do Ribeirão das Perdizes. Para avaliação da qualidade aplicou-se modelagem matemática demonstrando uma metodologia que poderá subsidiar um futuro estudo de enquadramento para os rios da região. Na simulação de cenários de qualidade de água avaliou-se o comportamento dos parâmetros OD e DBO considerando-se as variações da vazão, carga, reduções em captações e diferentes níveis de eficiência no tratamento de esgotos. Nas simulações foi utilizado o modelo QUAL2E como interface gráfica QUAL2R. As vazões $Q_{7,10}$, $Q_{95\%}$ e Q_m utilizadas foram obtidas através do método da regionalização hidrológica do DAEE. As contribuições foram calculadas pelas outorgas e população da bacia. Verificou-se que dos 9 cenários propostos, somente o cenário 6, simulado no regime de vazão Q_m com a existência de um sistema de tratamento capaz de remover 93% da DBO, o ribeirão se manteve somente 67.5% do tempo na classe 2. No cenário 8, onde se previu a redução de 50% na vazão captada em CA-04 associada a eficiência de 93% na remoção da DBO em regime de vazão referencial $Q_{95\%}$, o rio se manteve na classe 2. No cenário 9, para a vazão referencial $Q_{95\%}$, foi simulado qual seria a eficiência mínima requerida em um sistema de tratamento de esgotos para se manter o ribeirão na classe 2, obtendo-se o valor de 94.7%.

Palavras Chave: Modelagem matemática da qualidade da água. Enquadramento de corpos d'água. Modelo QUAL2E. Gestão da qualidade e da água.

INTRODUÇÃO

A Lei Federal 9433/97 estabelece como um de seus objetivos, assegurar à atual e às futuras gerações a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos (BRASIL, 1997). A referida norma também estabelece o enquadramento de corpos hídricos segundo seus usos preponderantes como um dos instrumentos da Política Nacional de Recursos Hídricos.

O conceito de enquadramento dos corpos hídricos como instrumento de gestão foi introduzido mais enfaticamente pela resolução CONAMA 20/86 (Conselho Nacional de Meio Ambiente), atualizada pela Resolução CONAMA 357/05 (CONAMA, 2005), que distribuíram os corpos hídri-

cos de água doce em classes de usos sendo: classes especial, 1, 2, 3 e 4, com níveis gradativos de qualidade associados. Para a classe especial não se permite qualquer lançamento de efluentes ainda que tratados. O enquadramento é o estabelecimento do nível de qualidade a ser alcançado ou mantido em um corpo d'água ou trecho do mesmo, ao longo do tempo (PORTO, 2002).

Conforme Garcia (2011), o enquadramento fornece diretrizes para o planejamento, fiscalização e monitoramento por parte dos órgãos licenciadores, e para a formulação de critérios de penalidades, assim como para outros instrumentos de gestão de recursos hídricos tais como a outorga e a cobrança pelo uso dos recursos hídricos.

Oppa (2007) relata que o enquadramento de corpos d'água representa o aspecto legal das aspirações da sociedade relativas à qualidade das águas.

Com o advento do enquadramento o conceito de qualidade da água ganhou um entendimento muito mais amplo. A água é

*UNESP - Faculdade de Engenharia de Guaratinguetá

considerada de qualidade ou não, dependendo do atendimento aos padrões determinados para a classe em que o corpo hídrico esteja enquadrado, sendo esta classe associada a determinados usos específicos conforme resolução CONAMA 357/05.

Como no presente estudo tratou-se da simulação de qualidade da água como ferramenta de auxílio à gestão hídrica quali-quantitativa, procurou-se abordar mais especificamente esse instrumento de gestão a fim de verificar se os resultados dos parâmetros simulados atendiam aos padrões estabelecidos para a classe 2, na qual se encontra enquadrado o corpo hídrico objetivado na simulação.

Segundo Rodrigues (2005), o enquadramento de corpos d'água em classes de usos preponderantes permite fazer a junção entre a gestão da qualidade e da quantidade da água, visando assegurar água com qualidade compatível aos usos mais exigentes da bacia.

Confirmando esse entendimento, La Laina & Porto (2008) relatam que os dois primeiros instrumentos indicados pela Lei Federal 9433/97 têm por objetivo a construção de consensos na bacia hidrográfica, sendo eles o Plano de Recursos Hídricos e o Enquadramento de Corpos Hídricos.

O presente artigo visa mostrar a importância da modelagem matemática na gestão quali-quantitativa da água como subsídio ao planejamento e a tomada de decisões na bacia hidrográfica. Ao fazer uso de um manancial, o usuário de recursos hídricos deve ter em mente que a manutenção dos padrões requeridos para os parâmetros físicos, químicos e biológicos, referentes à classe do rio, deverão ser respeitados e mantidos.

Dessa forma, na interpretação dos resultados da simulação da qualidade da água na bacia do Ribeirão das Perdizes em Campos do Jordão/SP, procurou-se utilizar os conceitos do enquadramento como importante instrumento de gestão de recursos hídricos.

MODELOS DE QUALIDADE DE ÁGUA EM RIOS

Modelos matemáticos são técnicas que podem representar alternativas propostas e simular condições reais que poderiam ocorrer dentro de um limite de incertezas inerentes ao conhecimento científico (TUCCI, 1998).

O conhecimento do comportamento dos processos envolvidos na simulação dos modelos é essencial para que as alternativas e os resultados sejam representativos e possam ser bem avaliados.

Desta forma os modelos se tornam numa ferramenta importante para extrapolar as informações no curto prazo para outras escalas temporais e podem variar de simples aplicações a modelos mais complexos que necessitam de um grande número de dados de entrada (SCARIOT, 2008).

Os modelos de qualidade de água usualmente utilizados em rios são unidimensionais, ou seja, são modelos que simulam processos considerando somente uma direção no espaço, e representam o escoamento através da velocidade média na seção transversal, desprezando as variações vertical e transversal (TUCCI, 1998). Palmieri (2003) relata ser razoável essa consideração tendo-se em vista a natureza longitudinal do fluxo da água em rios.

Esta formulação torna implícita a hipótese de mistura instantânea da emissão pontual de poluição através da seção transversal do rio (SOUZA, 2006).

O transporte de substâncias em um espaço tridimensional se dá pelas componentes físicas da advecção, difusão e dispersão que representam a resultante do gradiente do escoamento, a variação da concentração da substância e o efeito da flutuação turbulenta na concentração, respectivamente, devendo ser considerados também os fenômenos bioquímicos.

Através da teoria do calor de Fourier, Fick (TYRRELL, 1964) estabeleceu-se o princípio de proporcionalidade entre a massa de uma substância e seu gradiente de concentração, que matematicamente se escreve (TUCCI, 1998):

$$q_i = -e^i \frac{\partial c}{\partial x_i} \quad (1)$$

em que e^i é o coeficiente de difusão molecular na direção i ; c é a concentração da substância e q_i é o fluxo de massa na direção i .

A partir da modelagem da equação 1, admite-se as formulações bidimensionais e tridimensionais considerando-se as variações da massa no tempo e do fluxo no espaço. A equação mais largamente utilizada em rios, devido a consideração unidimensional dos modelos, despreza as variabilidades transversais e verticais, assim como a difusão, considera as parcelas advectiva e dispersiva do fluxo longitudinal em regime permanente uniforme, e considera as contribuições laterais, sendo escrita da forma:

$$\frac{\partial C}{\partial t} + V \frac{\partial C}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(E \frac{\partial C}{\partial x} \right) + \frac{q}{A} (C_l - C) + \frac{S_i}{A} \quad (2)$$

em que C_l é a concentração de contribuição lateral; E é o coeficiente de dispersão longitudinal; C é a concentração da substância; q é o fluxo da massa; A é a área da seção; S_i são os ganhos ou perdas por contribuição lateral ou reações bioquímicas internas da substância.

Streeter e Phelps (STREETER & PHELPS, 1925), apresentaram seu modelo de qualidade em rios considerando o escoamento permanente uniforme e representando os parâmetros DBO (Demanda Bioquímica de Oxigênio) e OD (Oxigênio Dissolvido), considerando somente o efeito advectivo do transporte de massa e a fase carbonácea de consumo de oxigênio na água, desprezando, portanto, a demanda pela camada bentônica e as reações constituintes.

O modelo de Streeter e Phelps (STREETER & PHELPS, 1925) estabeleceu que a variação da DBO remanescente (DBOr) em um infinitésimo de tempo (dt) é igual a DBOr multiplicada por uma constante de degradação K_1 a ser determinada. Assim, o equacionamento para obtenção da DBOu (DBO última ou total) teve a seguinte forma:

$$DBOu = \frac{DBOe(t)}{1 - e^{-k_1 t}} \quad (3)$$

em que DBOe é a exercida e DBOu=BDoe+DBOr.

Os autores formularam também, considerando os processos de reaeração atmosférica e desoxigenação pela degradação da matéria orgânica, o déficit de oxigênio resultante do lançamento de cargas orgânicas nos rios (VON SPERLING, 1998), conforme a equação 4:

$$Dt = \frac{K_1 L_0}{K_2 - K_1} \cdot (e^{-k_1 t} - e^{-k_2 t}) + D_0 \cdot e^{-k_2 t} \quad (4)$$

em que Dt é o déficit total de oxigênio no instante t ; K_1 e K_2 são as constantes de desoxigenação e reaeração, respectivamente, e L_0 é a concentração da DBO no ponto de mistura do efluente com o corpo receptor (mg.L^{-1}). Da equação 4, a concentração pode ser obtida sabendo-se que $ODt = Cs - Dt$, sendo ODt a concentração total de oxigênio e Cs a concentração de saturação de oxigênio.

O modelo de Streeter-Phelps pressupõe mistura imediata, portanto as concentrações de mistura do OD e da DBO são alcançadas pelo balanço de massa. As principais limitações advindas dessas formulações são: i) pressuposto de mistura imediata, ii) desconsideração da dispersão, iii) desconsideração

das características hidráulicas do corpo hídrico, iv) só considera a decomposição aeróbia, v) não inclui a reoxigenação pela fotossíntese, vi) não inclui a sedimentação da matéria orgânica e vii) não inclui a demanda pela camada bentônica (RODRIGUES, 2005).

Entretanto esse modelo é clássico dentro da engenharia ambiental, sendo atualmente ainda largamente utilizado, e serve de suporte a outros modelos mais sofisticados que se sucederam (VON SPERLING, 1998).

MODELO QUAL2E

O modelo de simulação de qualidade da água superficial QUAL2E (BROWN & BARNELL, 1987), distribuído pela USEPA (United States Environmental Protection Agency), permite simular 15 variáveis indicativas de qualidade das águas em rios ramificados e bem misturados, usando o método das diferenças finitas para a solução da equação unidimensional do transporte (advecção e dispersão) e de reação dos constituintes.

O modelo simula de forma espacial às seguintes variáveis indicativas da qualidade da água: DBO, OD, temperatura, alga (clorofila a), nitrogênio orgânico, amônia, nitrito, nitrato, fósforo orgânico, fósforo inorgânico dissolvido, coliformes, variável não-conservativa arbitrária, três variáveis conservativas arbitrárias. Permite também a incorporação de descargas pontuais, tributários, captações e de incrementos de vazão e poluentes relacionados às fontes difusas (USEPA, 1987).

É um modelo unidimensional simples porém eficiente e válido (MCCUTCHEON, 1989 apud SOUZA, 2006), sendo largamente utilizado por pesquisadores de todo o mundo com centenas de trabalhos publicados.

O QUAL2E resolve equação básica de transporte de massa unidimensional. Esta equação inclui os efeitos de advecção, dispersão, diluição, reações e interações entre os componentes, além das fontes e sumidouros (OPPA, 2007).

Na Figura 1 temos a modelagem de cálculo no QUAL2E através do balanço de vazão e massa em um sistema fluvial discretizado em trechos, admitindo-se o transporte de massa advectivo dispersivo na direção longitudinal do rio. A quantificação da carga de certo elemento é feita multiplicando as concentrações por suas respectivas vazões (RODRIGUES & PORTO 2003; OPPA, 2007).

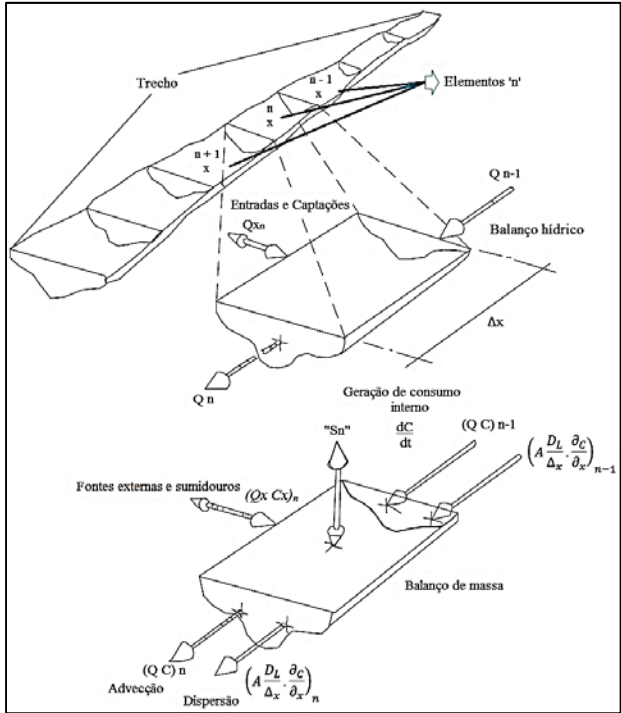


Figura 1 - Discretização de um sistema hídrico fluvial em trechos no QUAL2E.
Fonte: BROWN & BARNWELL (1987), adaptado.

Cinética das reações e hidráulica no QUAL2E

Uma das mais importantes considerações na determinação da capacidade de assimilação de um corpo hídrico é sua capacidade de manter uma adequada concentração de oxigênio dissolvido. Os níveis de oxigênio dissolvido em rios são controlados pela reaeração atmosférica, fotossíntese, respiração de plantas e animais, demanda bentônica, demanda bioquímica de oxigênio, nitrificação, salinidade, temperatura, dentre outros fatores (BROWN & BARNWELL, 1987).

O modelo QUAL2E incorpora em sua sistemática de cálculos, além da modelagem do OD previsto no modelo de Streeter & Phelps, as inter-relações do mesmo com o nitrogênio e sua série, fósforo, clorofila-a e matéria orgânica (KNAPIK *et al.*, 2011), buscando com isso uma representação mais aproximada dos fenômenos endógenos que ocorrem dentro da massa líquida.

Assim, em função de se obter melhores respostas, o QUAL2E considera em sua modelagem do OD e DBO, diversas constantes intrínsecas às reações dos constituintes, muitas vezes de difícil determinação. Os maiores exemplos são os coeficientes

K_1 , K_2 , K_3 e K_4 que representam as taxas de desoxigenação carbonácea, de reaeração superficial, de sedimentação da matéria orgânica e da demanda bentônica de oxigênio do sedimento, respectivamente, sendo que K_3 e K_4 estão diretamente interligados. Esses coeficientes são frequentemente utilizados na calibração do modelo e se encontram tabelados por diversos autores. O K_2 é normalmente calculado internamente no QUAL2E através de sete formulações empíricas, havendo também a possibilidade de entrada com valores que não se enquadram nas formulações ou levantados em campo/laboratório.

A hidráulica no QUAL2E é determinada de maneira relativamente simplificada, podendo ser feita através de constantes empíricas de coeficientes de descarga para ajuste dos dados de campo a cada trecho do rio. Outra forma é através das formulações de *manning* associadas a equação da continuidade. Nessa segunda forma são requeridas informações da seção do canal, declividade e coeficientes de rugosidade de *manning* (CHAPRA, 2008).

O QUAL2E possui algumas limitações que podem ser contornadas através de técnicas de programação. Rodrigues & Porto (2003) desenvolveram uma interface gráfica mais intuitiva para a utilização do QUAL2E intitulada por QUAL2R que foi utilizada no estudo. Limitam-se hidraulicamente para simulações nas quais tanto o fluxo do rio quanto as cargas pontuais e captações sejam constantes. Na Tabela 1 tem-se essas limitações.

Tabela 1 - Limitações computacionais do modelo QUAL2E.

Número de trechos	No máximo 25
Elementos computacio-	No máximo 20 por trecho
Elemento de cabeceira	No máximo 7
Elemento de junção	No máximo 6
Elementos de lançamento	No máximo 25

Fonte: Interface QUAL2R para QUAL2E (RODRIGUES & PORTO, 2003).

DELIMITAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

Para realização da simulação foi selecionada a bacia do Ribeirão das Perdizes, no município de Campos do Jordão, a fim de que, nesta bacia, se pudesse inferir o comportamento dos parâmetros OD e DBO, ao longo dos trechos modelados.

A bacia do Ribeirão das Perdizes é uma sub-bacia do Ribeirão Capivari, principal rio de Campos

do Jordão, e possui área preservada com histórico de ocupação residencial por condomínios de classe média-alta e serviços de hotelaria. Há pequenas captações ao longo do curso principal do rio e em alguns afluentes. Nas cabeceiras e no centro da bacia, existem duas sensíveis captações da SABESP (Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo) que juntas exportam considerável quantidade de água (95.8% da vazão outorgada na bacia) para auxílio no abastecimento público de Campos do Jordão. O lançamento de esgoto mais significativo é realizado pela SABESP e fica próximo a foz do rio.

As cabeceiras da bacia do Ribeirão das Perdizes encontram-se protegidas por uma unidade de conservação estadual denominada Parque dos Mananciais de Campos do Jordão, que cobre cerca 40% de toda a área da bacia, situando-se nas cabeceiras da mesma.

A bacia do Ribeirão das Perdizes possui área de 12.76km² e seu exutório encontra-se nas coordenadas UTM (Unidade Transversa de Mercator) 442.107E e 7.487.740N na projeção SAD 69. A Figura 2 mostra a localização da bacia.

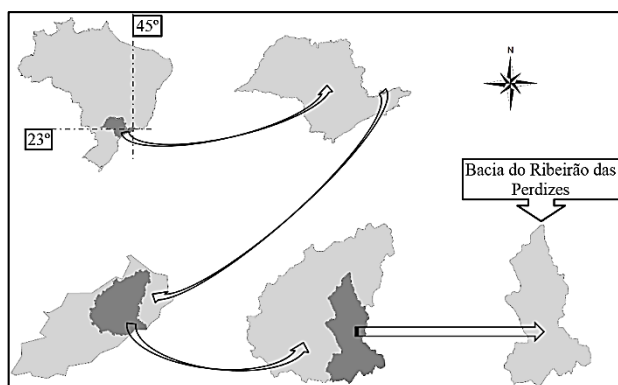


Figura 2 - Bacia hidrográfica do Ribeirão das Perdizes.

METODOLOGIA

Discretização do sistema hídrico e obtenção dos dados hidráulicos e seções ideais

Foi selecionado o talvegue principal do Ribeirão das Perdizes dividido em 5 trechos de características semelhantes a fim de utilizá-los na simulação. Isso resultou em 44 elementos de 0.2km cada. A Tabela 2 mostra os trechos com seus respectivos dados hidráulicos definidos.

Tabela 2 - Trechos e dados hidráulicos

Trecho	Nº elem.	Área (Km ²)	Q _{incr. trecho} (m ³ .s ⁻¹)			i _{méd} * (m/m)
			Q _{7.10}	Q _{95%}	Q _m	
1	14	5.34	0.0578	0.0800	0.1725	0.0668
2	13	4.03	0.0463	0.0600	0.1393	0.0116
3	7	1.03	0.0134	0.0180	0.0402	0.0223
4	6	1.97	0.0248	0.0330	0.0774	0.0023
5	4	0.39	0.0057	0.0070	0.0166	0.0029
Total	44	12.76	0.1480	0.1980	0.4460	

* declividade média no trecho.

Tabela 3 - Intervenções na bacia das Perdizes

Finalidade	Ponto/ Trecho	DBO mg.L ⁻¹	OD mg.L ⁻¹	Vazão	
				m³.h ⁻¹	m³.s ⁻¹
Captações superficiais					
Ab. Pub.	CA-01/04	-	-	216,0	0,0600
Piscic.	CA-02/06	-	-	3,6	0,0010
Piscic.	CA-03/06	-	-	3,6	0,0010
Ab. Pub.	CA-04/07	-	-	288,0	0,0800
Piscic.	CA-05/10	-	-	3,0	0,0008
Sanit.	CA-06/12	-	-	2,0	0,0005
Sanit.	CA-07/12	-	-	2,0	0,0005
Sanit.	CA-08/12	-	-	4,0	0,0011
Sanit.	CA-09/12	-	-	4,0	0,0011
Total				526,2	0,1461
Lançamentos					
Piscic.	LA-01/06	36,6	4,1	3,6	0,0010
Piscic.	LA-02/06	36,6	4,1	3,6	0,0010
Piscic.	LA-03/10	36,6	4,1	3,0	0,0008
Sanit.	LA-04/13	350,0	0	25,0	0,0069
Total				35,2	0,0097

Algumas simplificações foram estabelecidas. Afluentes foram incorporados ao curso d'água principal atendendo as limitações do modelo QUAL2E. Por serem pequenas, as cargas dos afluentes foram consideradas lançadas diretamente na calha do rio principal. Lançamentos e captações próximas foram somadas e locadas no elemento computacional mais próximo das mesmas. As vazões referenciais foram calculadas para o exutório de cada área de drenagem (KNAPIK *et al.*, 2011). A Tabela 3 mostra as intervenções na bacia do Ribeirão das Perdizes com suas respectivas concentrações. Para a DBO e o OD dos esgotos foram considerados valores segundo SABESP (2009) e Von Sperling (2005), respectivamente. Para a DBO e o OD da piscicultura foram adotados valores segundo Zaniboni Filho *et al.* (1997) e Monteiro *et al.* (2008), respectivamente.

Na Figura 3 temos a bacia delimitada e seccionada em trechos com locação das captações superficiais e lançamentos outorgados para simulação.

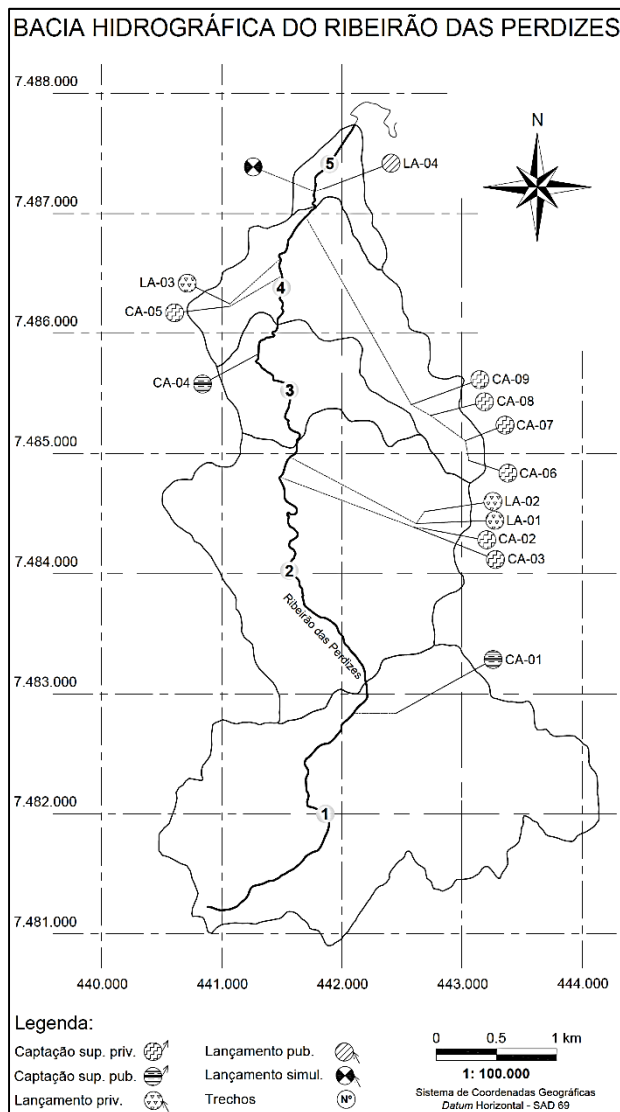


Figura 3 - Demarcação da bacia do Ribeirão das Perdizes, divisão em trechos e locação das intervenções.

Utilizando-se os dados hidráulicos contidos na Tabela 2, foram adotadas 2 tipos de seções ideais que retrataram as dimensões daquele corpo hídrico, mostradas na Figura 4.

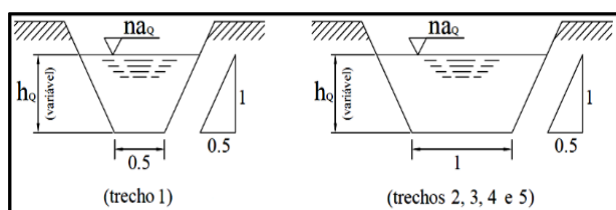


Figura 4-Seções ideais adotadas.

Nos 2 casos fixou-se a inclinação dos taludes laterais 1:m, onde 'm' representa a base do triângulo do talude.

Na adoção das seções ideais cuidou-se que suas dimensões atendessem tanto as vazões mínimas quanto as máximas, buscando-se aproximação da realidade. A Figura 5 mostra uma seção ideal sobreposta sobre o trecho 13, próximo a foz.

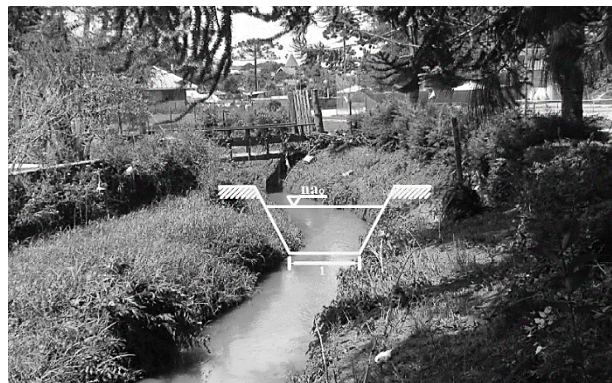


Figura 5 - Seção ideal sobreposta sobre trecho 5 no Ribeirão das Perdizes.

Coefficientes e parâmetros de entrada adotados na simulação com o QUAL2E

Uma das variáveis importantes para as simulações de qualidade em corpos hídricos é a vazão, normalmente obtida por campanhas com um lapso temporal, na maioria das vezes, muito restrito. A limitação verificada, é que essas vazões pontuais representam bem um momento, sendo, entretanto, incapazes de representar condições de regime mais adversas em um corpo hídrico.

Em tese, os dados de qualidade, bem como coeficientes de entrada para os modelos deveriam ser atrelados diretamente aos referidos regimes de vazões, o que não é uma tarefa simples. Nesse sentido a obtenção de séries históricas quali-quantitativas com maior tempo de observação podem levar a resultados mais confiáveis, podendo-se alcançar resultados muito próximos da realidade. Palmieri (2003) relata possíveis implicações na calibração de modelos em função das limitações na disponibilidade e coleta de dados.

Além dessas dificuldades de difícil superação, tem-se ainda que a Resolução CONAMA 357/05 fixa que o enquadramento deve se dar na vazão de referência.

No Estado de São Paulo a Lei Estadual 9.034/94 refere-se à $Q_{7,10}$ como vazão referencial, entretanto a vazão outorgável é limitada em 50%

desse valor, ou seja, um valor extremamente conservador. Segundo DAEE (Departamento de Águas e Energia Elétrica, 2005), esta vazão está menos sujeita a erros operacionais e intervenções humanas. A $Q_{7,10}$ é a vazão média das mínimas de sete dias consecutivos com 10 anos de período de retorno.

No caso de ocorrência da extrapolação dos 50% da $Q_{7,10}$, a bacia deve ser declarada como crítica pelo comitê de bacias, que poderá ainda propor ao órgão gestor, novas regras para outorga que visem a proteção dos recursos hídricos. Cabe lembrar que no Estado de São Paulo as outorgas são quantitativas, não havendo, até o momento, restrições em relação a carga máxima assimilável pelos corpos hídricos.

Atendendo-se às recomendações da Resolução CONAMA 357/05, utilizou-se as séries de vazões obtidas pelo método de regionalização hidrológica do DAEE (LIAZI *et al.*, 1988). Como as vazões obtidas foram muito pequenas, dada a metodologia bem como o tamanho da bacia, não foi possível realizar a simulação para a vazão $Q_{7,10}$. No trecho 1 há uma captação (CA-01) da SABESP que ultrapassou o valor da vazão $Q_{7,10}$ disponível naquele ponto, gerando uma vazão negativa e inconsistência no modelo. As vazões que puderam ser simuladas foram a $Q_{95\%}$, que é a vazão igualada ou ultrapassada em 95% do tempo da série estudada, e a Q_m que é a vazão média das médias observadas, sendo que essa última foi utilizada somente para fins didáticos.

Para a determinação dos coeficientes de entrada do modelo utilizou-se os dados obtidos na literatura, observando-se suas particularidades e adequação com a simulação pretendida.

Segundo informações obtidas junto ao CBH-SM (Comitê das Bacias Hidrográficas da Serra da Mantiqueira) esse problema deverá ser resolvido com o advento da cobrança que está em processo de implantação, pois dos 21 comitês de bacias paulistas, 15 já possuem cobrança e 6 estão em processo de implantação sendo o CBH-SM um deles. Não há tratamento de esgotos nem dados disponíveis da poluição difusa na bacia. No ponto LA-04, mais a jusante e próximo a foz do Ribeirão das Perdizes, tem-se o único lançamento público da SABESP que em tese concentra todos os esgotos produzidos na bacia.

Com base nos dados de população do Censo 2010 do IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística), foi estimado a produção de esgotos de toda a população da bacia a fim de se comparar com o dado da outorga no ponto LA-04. Para o cálculo considerou-se uma população de 6454 habitantes

com contribuição de 200L.habitante⁻¹. dia⁻¹. Subtraindo-se 20% da vazão de lançamento, por conta do consumo, chegou-se ao valor de 0.012m³.s⁻¹. Como esse valor é maior do que o declarado na outorga (Tabela 3 - 0.007m³.s⁻¹), optou-se por utilizar o maior valor de lançamento em LA-04 nas simulações.

Para efeito desse estudo, o Ribeirão das Perdizes foi considerado um corpo hídrico com 'águas limpas' pelo fato de não receber grandes cargas de esgotos domésticos ou industriais e ter suas cabeceiras bem preservadas, exceto nos trechos próximos a foz onde há considerável adensamento populacional.

Dessa forma adotou-se os dados da Tabela 4 (VON SPERLING, 2005) como valor da DBO para a condição inicial do rio, ou seja, 2mg.L⁻¹.

Tabela 4 - Estimativa da DBO em função da condição do rio.

Condição do rio	DBO _{5,20} (mg.L ⁻¹)
Bastante limpo	1
Limpo	2
Razoavelmente limpo	3
Duvidoso	5
Ruim	> 10

Fonte: Klein (1962) apud Von Sperling (2005).

O teor de OD aparece em diversas literaturas tabelado como função da temperatura e altitude (DERÍSIO, 1992), sendo inversamente proporcional a essas duas variáveis. Para a bacia do Ribeirão das Perdizes considerou-se altitude e temperatura médias de 1650m e 20°C, respectivamente, o que equivale a um teor de saturação de OD da ordem de 6.7mg.L⁻¹, que corresponde a cerca de 90% do OD de saturação máximo estimado para corpos hídricos nas condições descritas (VON SPERLING, 2005).

A Tabela 5 apresenta, para "Rios com águas limpas", valores de K_1 entre 0.09 a 0.21 dia⁻¹ (CHAPRA, 1997).

Tabela 5 - Valores típicos de K_1 .

Origem	K_1 (dia ⁻¹)
Água residuária concentrada	0.35 - 0.45
Água residuária de baixa concentração	0.30 - 0.40
Efluente primário	0.30 - 0.40
Efluente secundário	0.12 - 0.24
Rios com águas limpas	0.09 - 0.21
Água para abastecimento público	< 0.12

Fonte: Chapra, 1997.

Portanto utilizou-se o valor médio de 0.15 dia⁻¹ para o K₁. Esse valor encontra-se também compreendido entre os valores sugeridos por Von Sperling (2005).

Os valores de K₂ podem ser obtidos através de 7 equações empíricas, incorporadas ao modelo QUAL2E, que relacionam dados hidráulicos da seção em estudo (NAHON, 2006). Há também a opção do valor ser atribuído pelo usuário.

Pelo fato de se ter trabalhado com vazões muito pequenas, ao testar-se a aplicabilidade das equações, verificou-se que as mesmas não se adequaram devido a seus limites de validade.

Desta forma aplicou-se aos trechos 1 ao 5, na opção de entrada pelo usuário incorporada ao QUAL2E, o valor médio tabelado por Von Sperling (2005) de 0.69 dia⁻¹ para o K₂, observadas as características locais (Tabela 6).

Tabela 6 - Valores típicos de K₂.

Corpo d'água	K ₂ (dia ⁻¹)	
	Fundo	Raso
Pequenas Lagoas	0.12	0.23
Rios vagarosos, grandes lagos	0.23	0.37
Grandes rios com baixa velocidade	0.37	0.46
Grandes rios com velocidade normal	0.46	0.69
Rios rápidos	0.69	1.15
Corredeiras e quedas d'água	> 1.15	> 1.61

Fonte: Von Sperling, 2005.

Para o coeficiente K₄ utilizou-se os valores da Tabela 7 considerando-se a média entre leito arenoso e leito de solo mineral, de acordo com as características da região de estudo. Portanto o valor de K₄ foi de 0.29.

Tabela 7- Demanda oxigênio pela camada bentônica (K₄).

Tipo de leito e situação local	Demanda bentônica	
	Variação	Média
Lodo de esgoto - próximo ao	2 - 10	4
Lodo de esgoto - a jusante do	1 - 2	1.5
Leito estuarino	1 - 2	1.5
Leito arenoso	0.2 - 1.0	0.5
Leito de solo mineral	0.05 - 0.1	0.07

Fonte: Thomann & Muller (1987) apud Rodrigues (2005).

Determinação do K₃

O K₃ representa a capacidade de sedimentação de matéria orgânica no sistema e é calculado em

função da altura da lâmina d'água e da velocidade de sedimentação da matéria orgânica e, essa segunda, por sua vez, varia em função do tamanho e da densidade da partícula. Para a determinação do K₃ foi considerada a altura média da seção trapezoidal no regime de vazão referencial Q_{95%} e no regime Q_m.

A verificação do tamanho das partículas é importante para a determinação do K₃. É necessário ter-se a informação do tamanho e densidades médias para acessar a Tabela 8 e obter a velocidade de sedimentação média para o corpo hídrico em estudo.

De acordo com o Plano de Bacia da UGRHI-1 (Unidade de Gerenciamento de Recursos Hídricos 1/SP), a região tem “as características geológicas e geotécnicas dos depósitos de argila orgânica e o seu comportamento bastante sensível a intervenções antrópicas bruscas que alteram as suas condições de equilíbrio original têm condicionado processos de instabilização notáveis na área urbana do município de Campos do Jordão (IPT, 2002)” (CPTI, 2012). A existência desses depósitos de “argila orgânica” remete a prevalência do carreamento de partículas da ordem de 1 a 2µm em Campos do Jordão.

Tabela 8 - Velocidades de sedimentação (m.dia⁻¹)

Tamanho das partículas (µm)	Densidades das partículas (g.cm ⁻³)			
	1.8	2.0	2.5	2.7
Areia fina				
300	300	400	710	800
50	94	120	180	200
Silte				
50	94	120	180	200
20	15	19	28	32
10	3.8	4.7	7.1	8
5	0.94	1.2	1.8	2.0
2	0.15	0.19	0.28	0.32
Argila				
2	0.15	0.19	0.28	0.32
1	0.04	0.05	0.07	0.08

Fonte: Kiser et al. (2001) apud Nahon (2006).

Considerou-se o intervalo de tamanho das partículas entre 1 a 2µm, através da Tabela 8, obtendo-se a velocidade média entre a mínima (0.04 m.dia⁻¹) e a máxima (0.32 m.dia⁻¹), referentes ao intervalo, obtendo-se uma velocidade de sedimentação média de 0.180 m.dia⁻¹ para o Ribeirão das Perdizes.

Através da equação 5 pôde-se calcular o valor de K₃.

$$K_{3(Q_{95\%}; Q_m)} = \frac{v_s}{H_{m(Q_{95\%}; Q_m)}} \quad (5)$$

em que V_s é a velocidade de sedimentação e H_m é a altura da lâmina d'água.

A Tabela 9 mostra o resultado dos K_3 calculado para o regime de vazão $Q_{95\%}$, considerando-se a altura média da lâmina d'água de todo o talvegue. Analogamente foi feito para a vazão Q_m .

Tabela 9- K_3 (dia⁻¹) com $V_s = 0.180$ m.dia⁻¹.

Trechos	H_m (m)	K_3
1 ao 5	$Q_{95\%}$	
	0.0880	2.05
	Q_m	
	0.2118	0.85

Utilizou-se um mesmo K_3 para todo o talvegue, tendo-se em vista tratar-se de uma bacia de pequenas proporções.

PROPOSTA DE CENÁRIOS

Para a proposta de cenários foi considerada a vazão referencial $Q_{95\%}$ e a vazão Q_m . Os parâmetros analisados foram o OD e a DBO. Primeiramente simulou-se para a vazão $Q_{95\%}$ com as intervenções outorgadas, lançamentos e captações superficiais, sem se considerar qualquer remoção de DBO (tratamento de esgotos). Da mesma forma se procedeu para a vazão Q_m , também sem se considerar qualquer remoção de DBO.

Depois, sob os dois regimes de vazão, simulou-se para dois tipos de tratamento, conforme Tabela 10, a fim de se inferir o comportamento dos parâmetros OD e DBO face a possível existência desses sistemas de tratamento.

Tabela 10-Eficiências em sistemas de tratamento.

Sistema de tratamento	Eficiência na remoção de DBO (%)
Lodos ativados aeração prolongada	93-98
Conjunto tanque séptico filtro anaeróbio	70 - 90

Fonte: Von Sperling, 2005; adaptado.

Os dois sistemas de tratamento propostos são normalizados pela ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) nas normas NBR 7229/93 e

NBR 13969/97. Para ambos os casos foram utilizadas as menores eficiências das faixas em favor da segurança, ou seja, simulou-se a remoção de 70% e 93%, respectivamente.

Após, foi simulado também a possibilidade de redução na captação CA-04 em 50% de seu valor original outorgado. Nesse caso utilizou-se também a eficiência dos dois tipos de tratamento e a vazão $Q_{95\%}$. Finalmente, foi simulado, através de tentativas, qual seria a eficiência mínima requerida para que o rio permanecesse em sua classe original, ou seja, classe 2. A Tabela 11 mostra o resumo dos cenários propostos.

Tabela 11 - Cenários propostos para simulação.

Cen.	Regime de vazão e simulação pretendida
1	$Q_{95\%}$ com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, sem trat. esgotos
2	$Q_{95\%}$ com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, com trat. esgotos (remoção 70% DBO)
3	$Q_{95\%}$ com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, com trat. esgotos (remoção 93% DBO)
4	Q_m com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, sem trat. esgotos
5	Q_m com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, com trat. esgotos (remoção 70% DBO)
6	Q_m com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, com trat. esgotos (remoção 93% DBO)
7	$Q_{95\%}$ com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, com trat. esgotos (remoção 70% DBO e redução de 50% em CA-04)
8	$Q_{95\%}$ com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, com trat. esgotos (remoção 93% DBO e redução de 50% em CA-04)
9	$Q_{95\%}$ com intervenções outorgadas, população estimada para LA-04, (eficiência mínima requerida para permanência na classe 2)

CENÁRIOS: RESULTADOS E DISCUSSÃO

Dados hidráulicos para os cenários

Nos estudos de qualidade de água, os dados hidráulicos são importantes para se entender o comportamento dos parâmetros. No caso do OD e da DBO, objetivados no estudo, quanto maior for a relação 'vazão disponível' *versus* 'concentração do poluente', melhor será a diluição dos poluentes e consequentemente mais limpa será a água.

A Figura 6 mostra como as principais captações e lançamentos afetaram a vazão $Q_{95\%}$ no corpo hídrico.

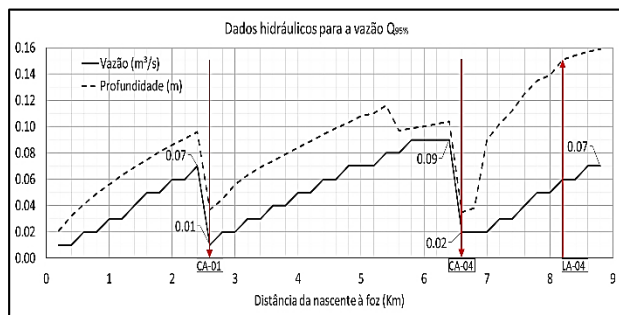


Figura 6 - Comportamento da vazão $Q_{95\%}$ diante das principais intervenções no Ribeirão das Perdizes.

O QUAL2E efetua o balanço de massa considerando as reações constituintes das substâncias e suas interações com o oxigênio dissolvido na água, e esse por sua vez aumenta na medida que o sistema recebe maior quantidade de água limpa.

Notou-se que as captações CA-01 e a CA-04 promoveram as maiores variações no regime hídrico. Mudanças bruscas no regime hídrico alteram significativamente a capacidade autodepuradora do corpo hídrico e consequentemente a qualidade da água. O lançamento LA-04 não acrescentou quantidade de água significativa ao sistema. As captações CA-02, CA-03 e CA-05 são compensadas pelos lançamentos LA-01, LA-02 e LA-03 não promovendo mudanças no regime hídrico. As captações CA-06, CA-07, CA-08 e CA-09 também são pequenas para impactar o regime hídrico.

A Figura 7 mostra como as principais captações e lançamentos afetaram a vazão Q_m no corpo hídrico.

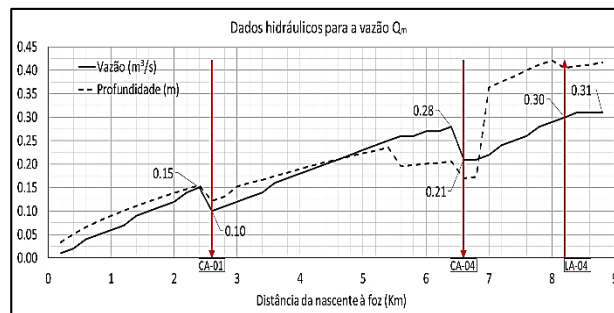


Figura 7 - Comportamento da vazão Q_m diante das principais intervenções no Ribeirão das Perdizes.

A vazão média Q_m , também conhecida como vazão média de longo período, pode estabelecer uma melhor representação do que ocorre medianamente no curso d'água em termos de quantidade. Notou-se que a vazão Q_m sofreu menor impacto diante das intervenções presentes no Ribeirão das Perdizes.

Nesse caso não foram observadas mudanças bruscas no regime hídrico, em termos proporcionais à vazão presente no corpo hídrico. A captação CA-04 é a intervenção que promove uma mudança um pouco mais significativa no regime de vazão. Entretanto se considerado a soma das duas captações, CA-01 e CA-04, as mesmas representam uma vazão subtraída da ordem de $0.14 m^3.s^{-1}$ ou $140 L.s^{-1}$. Essa vazão é suficiente para abastecer, considerando 25% de perdas, cerca de 45360 pessoas por dia e representa cerca de 94.6% da $Q_{7,10}$, 70.71% da $Q_{95\%}$ e 31.39% da Q_m , no Ribeirão das Perdizes.

Cenário 1-OD, DBO, $Q_{95\%}$, sem tratamento de esgotos

A Figura 8 ilustra como se comportaram o OD e a DBO diante de um regime de vazão reduzido. O OD se manteve quase todo o tempo na classe 1 ($OD \geq 6 mg.L^{-1}$) sofrendo redução em 20.18% ($6.54 mg.L^{-1}$ para $5.22 mg.L^{-1}$) somente quando o rio recebe os lançamentos de LA-04, que representa a contribuição de esgotos de toda a população da bacia. Nesse ponto o parâmetro cai para a classe 2, classe na qual encontra-se enquadrado o Ribeirão das Perdizes, portanto, para esse cenário o OD não infringe a classe original do rio. Os demais lançamentos, por sua pequena dimensão, não proporcionaram mudanças significativas nos níveis do OD.

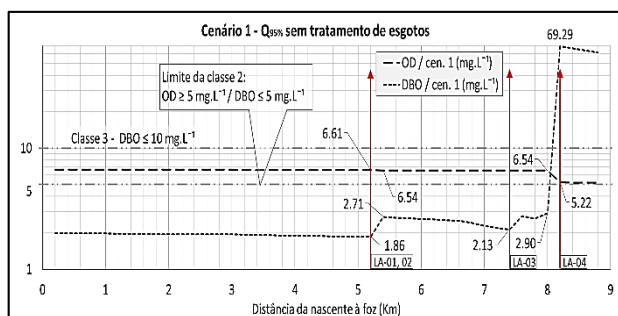


Figura 8 - Comportamento do OD e da DBO na vazão $Q_{95\%}$ sem sistema de tratamento de esgotos.

Quanto a DBO, a mesma sofreu pequenas variações ao longo dos lançamentos LA 01-02 e LA-03, não alterando significativamente seus valores. Até o ponto de lançamento LA-04 a DBO se manteve dentro na classe 1, entretanto após LA-04 seus níveis subiram muito além do limiar da classe 4 ($>10\text{mg.L}^{-1}$) o que indicou ser esse o ponto com o maior problema a ser resolvido.

Cenário 2 - OD, DBO, $Q_{95\%}$ com tratamento de esgotos (70% de eficiência na remoção da DBO)

Simulando-se os parâmetros OD e DBO, pôde-se notar no cenário 2, ilustrado na Figura 9, que os níveis de OD se mantiveram praticamente constantes em relação ao cenário 1 com uma, quase imperceptível, variação para maior no OD após o lançamento LA-04, mantendo-se, entretanto, na classe 1 em quase todo o curso do rio, caindo para a classe 2 após LA-04, semelhante ao cenário 1. Isso mostrou que os lançamentos não alteraram significativamente o parâmetro OD muito provavelmente devido à reduzida proporção do volume de carga lançada em relação à vazão no ponto de lançamento combinada com a condição inicial do corpo hídrico considerada na simulação (rio com águas limpas).

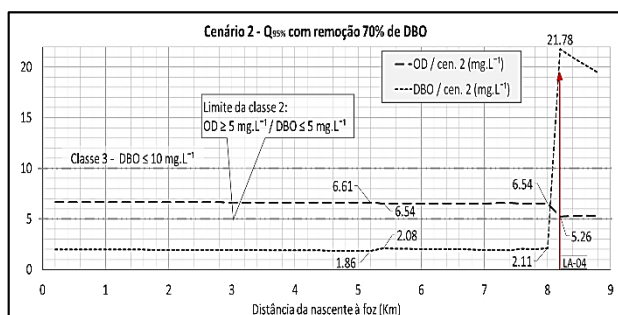


Figura 9 - Comportamento do OD e da DBO na vazão $Q_{95\%}$ com 70% de eficiência na remoção da DBO.

Já o parâmetro DBO sofreu uma redução bastante significativa em relação ao cenário 1, passando de 69.29mg.L^{-1} para 21.78mg.L^{-1} no ponto de lançamento LA-04, ou seja, reduziu em cerca de 3.18 vezes o seu valor.

Apesar dessa redução, os valores da DBO se mantiveram ainda muito acima do limiar da classe 4, sendo nesse caso insuficiente, ainda que haja a implantação de um sistema de tratamento com eficiência de 70% na remoção de DBO, para baixar os níveis da DBO à classe do rio.

Embora o valor mínimo de remoção da DBO esteja abaixo do recomendado pelo Decreto Estadual Paulista 8468/76, que prevê remoção mínima de 80%, contudo com a Resolução CONAMA 430/11 prevê que o órgão ambiental poderá excepcionalmente, e em caráter temporário, mediante análise técnica fundamentada, autorizar o lançamento de efluentes em desacordo com as condições e padrões estabelecidos, desde que atendidos os requisitos dispostos nos itens I ao VI do artigo 6º da citada resolução.

Cenário 3 - OD, DBO, $Q_{95\%}$ com tratamento de esgotos (93% de eficiência na remoção da DBO)

Para o cenário 3, mostrado na Figura 10, foi simulado a existência de um sistema de tratamento aeróbio capaz de remover 93% da DBO, se bem operado, no ponto de lançamento LA-04. Esse sistema, além de mais eficiente, é mais indicado para atender grandes populações.

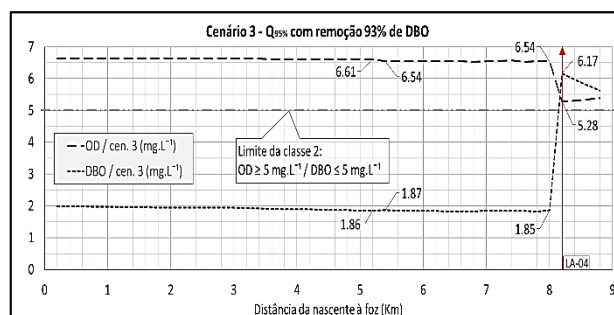


Figura 10 - Comportamento do OD e da DBO na vazão $Q_{95\%}$ com 93% de eficiência na remoção da DBO.

Notou-se, nesse cenário, que os níveis de OD se mantiveram praticamente estáveis em relação aos cenários 1 e 2, havendo uma tênue melhora do parâmetro no ponto de lançamento LA-04. A DBO no ponto LA-04 caiu sensivelmente de 21.78mg.L^{-1} para 6.17mg.L^{-1} .

Entretanto, apesar de ter havido grande redução nos níveis da DBO, não foi possível enquadrar o parâmetro na classe 2. Os demais lançamentos existentes (LA-01, LA-02 e LA-03), devido a simulação com remoção de quase toda a DBO (93%), tiveram sua carga remanescente completamente diluídas pelo corpo hídrico.

Concluiu-se que as cargas lançadas em LA-04, associadas ao reduzido regime de vazão $Q_{95\%}$, não são capazes de serem diluídas pelo Ribeirão das Perdizes no ponto de lançamento LA-04 e ainda assim manter o corpo hídrico operando na classe 2, ainda que se utilizasse um sistema capaz de remover 93% da DBO. Por analogia deduziu-se que no regime $Q_{7,10}$, menor que o $Q_{95\%}$, também não seria possível que o rio permanecesse em sua classe original.

Cenário 4 - OD, DBO, Q_m sem tratamento de esgotos

A Figura 11 mostra como se comportaram os parâmetros OD e DBO diante dessa vazão menos conservadora. Os níveis de OD, como esperado, se mantiveram em toda a extensão do Ribeirão das Perdizes na classe 1, sofrendo uma pequena variação somente no lançamento LA-04.

A DBO se manteve em toda a extensão do rio na classe 1, exceto a jusante do ponto de lançamento LA-04 onde a mesma subiu para 15.90 mg.L^{-1} , se estabelecendo na classe 4, apesar de haver uma vazão razoável no ponto ($0.3 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$).

Nesse cenário deduziu-se que os níveis de DBO compatíveis com o enquadramento do Ribeirão das Perdizes não poderiam ser alcançados pois a $Q_{95\%}$ é mais restritiva que a Q_m . A capacidade autodepuradora seria reduzida em regimes menores como a $Q_{95\%}$ e a $Q_{7,10}$.

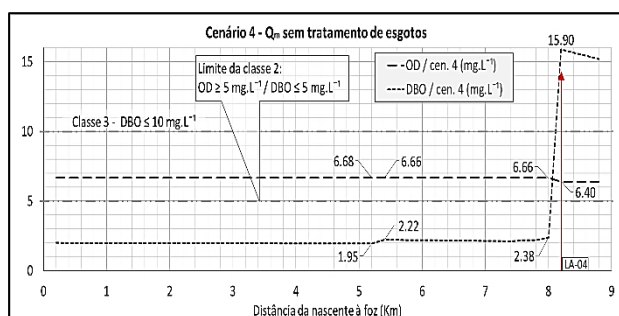


Figura 11 - Comportamento do OD e da DBO na vazão Q_m sem sistema de tratamento de esgotos.

Apesar de haver um vazão razoável de $0.30 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$ no ponto LA-04 (Figura 7), contudo um

lançamento de $0.012 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$, que representa somente 4% da vazão no rio, com elevada concentração (350 mg.L^{-1}), mostrou-se suficiente para comprometer a qualidade do manancial.

Cenário 5- OD, DBO, Q_m com tratamento de esgotos (70% de eficiência na remoção da DBO)

No cenário 5, mostrado na Figura 12, utilização da vazão Q_m associada a um sistema de tratamento com eficiência de 70%, o parâmetro DBO apresentou 6.04 mg.L^{-1} a jusante de LA-04, alcançando a classe 3, portanto acima da classe original do rio.

Se percebeu ainda que para se manter o rio na classe 2 seriam necessários mais investimentos, pois os sistemas alternativos (menor capacidade de redução da DBO) não são suficientes para atender a necessidade de se trazer os níveis da DBO para a classe 2 nem para a condição de Q_m .

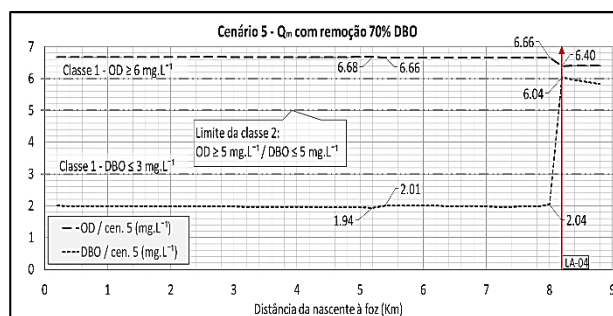


Figura 12 - Comportamento do OD e da DBO na vazão Q_m com 70% de eficiência na remoção da DBO.

Para o cenário 5 os níveis de OD também se mantiveram na classe 1, ou seja, acima de 6 mg.L^{-1} em toda a extensão do talvegue principal do Ribeirão das Perdizes e, como nos outros cenários, sofrendo uma pequena depleção somente no ponto de lançamento LA-04.

Pôde-se notar que vazões maiores podem ser bastante sensíveis a lançamentos relativamente pequenos, porém com concentrações elevadas. Nesses casos, se não removida boa parte da DBO através de tratamento, o rio pode apresentar resultados negativos em termos da qualidade de suas águas e consequente facilidade de extrapolar sua classe original.

Cenário 6- OD, DBO, Q_m com tratamento de esgotos (93% de eficiência na remoção da DBO)

Na Figura 13 tem-se ilustrado os resultados dos parâmetros OD e DBO para o cenário 6.

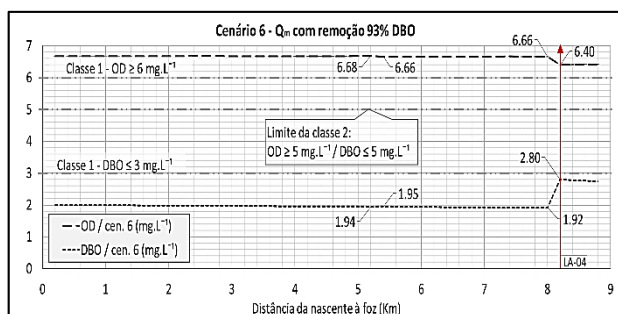


Figura 13 - Comportamento do OD e da DBO na vazão Q_m com 93% de eficiência na remoção da DBO.

Os níveis de OD mais uma vez se mostraram quase constantes havendo uma pequena queda no ponto de lançamento LA-04.

Com a DBO, viu-se nesse cenário uma queda bastante significativa fazendo o parâmetro se manter abaixo dos 3mg.L^{-1} , valor limite para a classe 1. Esse foi o melhor resultado obtido para a DBO dentre todos os cenários.

Como a vazão Q_m não ocorre todo o tempo no corpo hídrico, fica claro que em alguma parte do tempo, tendo em vista que haverá vazões mais restritivas nos períodos de estiagem, essa simulação não atenderia, pois em vazões menores os níveis da DBO tendem a aumentar e extrapolar os limites da classe do rio.

Utilizando-se a curva de permanência de vazões do Ribeirão das Perdizes pôde-se determinar qual a provável porcentagem do tempo que poderia não haver o atendimento aos padrões da classe do rio, devido à ocorrência de vazões mais restritivas. Para a vazão de balanço no ponto LA-04 ($0.30\text{m}^3.\text{s}^{-1}$) tem-se que a mesma é igualada e ultrapassada em cerca de 67.5% do tempo, conforme Figura 14.

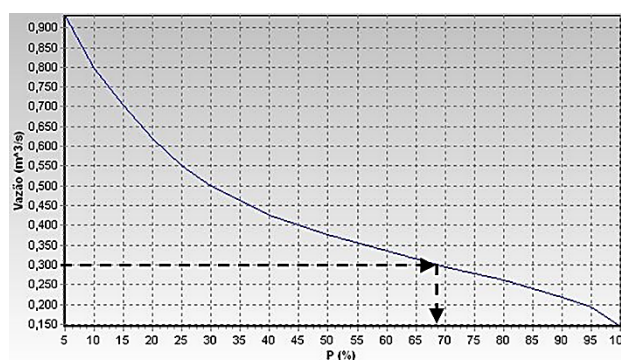


Figura 14 - Curva de permanência de vazões para a bacia do Ribeirão das Perdizes com marcação da $Q_{67.5\%}$.

Fonte: <http://www.sigrh.sp.gov.br>.

Restou 32.5% do tempo em que a situação descrita no cenário 6 pode não ocorrer, ou seja, os limites da DBO para a classe 2 no ponto LA-04 pode ser extrapolado nessa porcentagem de tempo, que provavelmente estará associada ao período de estiagem do ano hidrológico.

Cenário 7– OD, DBO, $Q_{95\%}$ com remoção de 70% da DBO e redução de 50% na captação CA-04

No cenário 7 tem-se a hipótese de se reduzir a captação CA-04 em 50% fazendo com que a mesma passe de $0.08\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ para $0.04\text{m}^3.\text{s}^{-1}$. Assim ocorreria a liberação de mais água para o sistema aumentando a diluição e consequentemente a capacidade autodepuradora do Ribeirão das Perdizes.

Os níveis de OD diante desse cenário se mantiveram em quase toda a extensão do Ribeirão da Perdizes na classe 1, caindo para a classe 2 no ponto de lançamento LA-04 (6.55mg.L^{-1} para 5.78mg.L^{-1}).

Com relação a DBO, observou-se que seus valores se mantiveram na classe 1 ($\leq 3\text{mg.L}^{-1}$) em quase toda a extensão do rio. Contudo, no ponto de lançamento LA-04, apesar de se aplicar 70% de remoção na DBO e liberar metade da captação CA-04, os níveis da DBO se elevaram a 13.95mg.L^{-1} , o que indica um elevado grau de poluição e sua permanência na classe 4. A Figura 15 mostra os resultados dos parâmetros simulados.

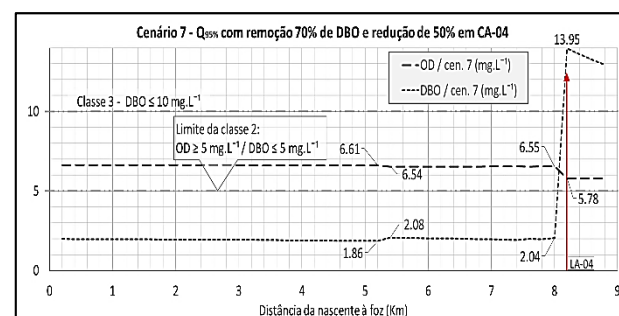


Figura 15 - Comportamento do OD e da DBO na vazão $Q_{95\%}$ com 70% de eficiência na remoção da DBO e redução de 50% da CA-04.

A redução na vazão foi uma situação hipotética proposta. Na prática, para ser possível uma redução dessa natureza exigiria grandes esforços de todos os setores envolvidos, inclusive com a apresentação de possíveis alternativas para o auxílio no abastecimento público de Campos do Jordão.

Cenário 8- OD, DBO, $Q_{95\%}$ com remoção de 93% da DBO e redução de 50% na captação CA-04

No cenário 8 a simulação foi semelhante ao cenário 7 considerando-se a existência de um sistema de tratamento com remoção de 93% da DBO. Na Figura 16 tem-se ilustrado o comportamento dos parâmetros OD e DBO para essas condições. Notou-se que os níveis de OD mais uma vez mantiveram-se em quase toda a extensão do rio na classe 1, sofrendo uma pequena redução para a classe 2 por ocasião do lançamento em LA-04.

Nessa condição simulada, observou-se que a DBO manteve-se, nos trechos a montante de LA-04, quase constante na classe 1 com uma leve queda linear até LA-04, alterando-se nesse ponto para 4.41 mg.L^{-1} . Esse valor garante a permanência da DBO na classe 2 no ponto onde o curso d'água recebe os esgotos de toda a população da bacia (LA-04).

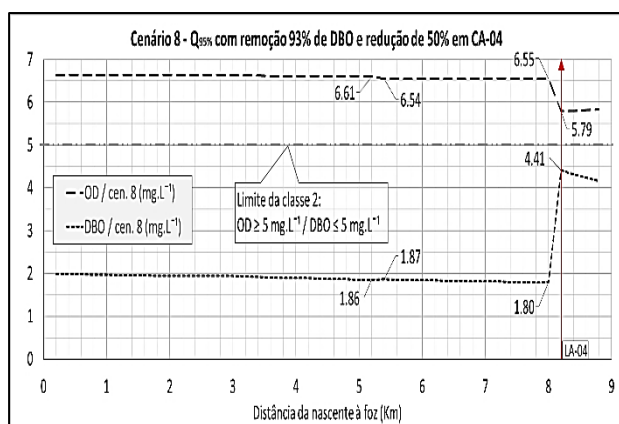


Figura 16 - Comportamento do OD e da DBO na vazão $Q_{95\%}$ com 93% de eficiência na remoção da DBO e redução de 50% da CA-04.

A combinação das duas hipóteses, 93% de remoção da DBO e remoção de 50% da CA-04, gerou uma condição bastante favorável à manutenção da boa qualidade da água no Ribeirão das Perdizes.

Comparando-se com os dados do cenário 3 (Figura 10) observou-se que a vazão liberada para o sistema aumentou a capacidade de diluição dos poluentes pelo rio reduzindo sua DBO em 39.91%, ou seja, de 6.17 mg.L^{-1} para 4.41 mg.L^{-1} , no ponto de lançamento LA-04. Nesse cenário, a manutenção dos parâmetros OD e DBO na classe do rio (classe 2) foi possível de forma satisfatória.

Cenário 9 - Determinação da eficiência mínima requerida na vazão $Q_{95\%}$ para se manter os parâmetros OD e DBO na classe 2

A Figura 17 mostra a verificação de qual seria a eficiência mínima requerida para que os parâmetros OD e DBO não ultrapassassem os limites da classe 2. Neste cenário também foi utilizada a vazão $Q_{95\%}$.

A determinação de eficiência mínima requerida é uma metodologia bastante utilizada no dimensionamento de estações de tratamento. Sabendo-se a classe do rio, seu regime de vazões, a vazão de esgotos e sua concentração, é possível, através da modelagem no QUAL2E, se aumentar gradativamente a eficiência na remoção da DBO de forma a se alcançar um determinado resultado esperado.

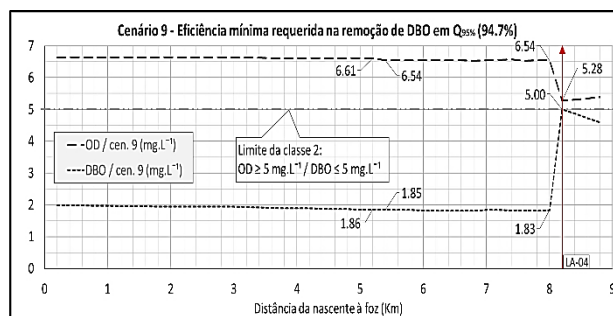


Figura 17 - Determinação da eficiência mínima requerida na vazão $Q_{95\%}$ para se manter os parâmetros OD e DBO na classe 2.

Nos Estados Unidos foi publicado uma série de documentos e guias técnicos que visavam estabelecer uma normativa para a alocação de cargas em corpos hídricos, bem como estabelecer um programa para se determinar as chamadas TMDL (Total Maximum Daily Loads), ou seja, as cargas diárias máximas capazes de serem absorvidas pelos corpos hídricos (USEPA, 1995).

Esse programa foi desenvolvido com a ajuda de modelagem matemática da qualidade da água utilizando-se os modelos QUAL2E e WASP5 (AMBROSE, *et al.*, 1993). Os princípios ali tratados são os mesmos ora discutidos no cenário 9. Buscou-se determinar qual a máxima capacidade de recepção de cargas no Ribeirão das Perdizes para o ponto de lançamento LA-04, no regime de vazão $Q_{95\%}$, de tal forma que a qualidade da água prevista para classe do rio fosse mantida.

Notou-se claramente que o parâmetro DBO foi o que apresentou problemas de não atendimen-

to a classe do rio nas simulações. Rodando o modelo diversas vezes e simulando para cada rodada um aumento gradativo do nível de eficiência na remoção da DBO, estimou-se, para que a DBO no rio não ultrapassasse os limites da classe 2 ($DBO \leq 5 \text{ mg.L}^{-1}$), uma eficiência mínima de 94.7% em termos de remoção da DBO.

Atingindo-se esse nível de eficiência, de acordo com a Figura 17, a DBO alcançaria no máximo os 5 mg.L^{-1} previstos para a classe 2, não fazendo o corpo hídrico ultrapassar os limites da classe no qual o mesmo encontra-se atualmente enquadrado.

Para o OD, como em todos os demais cenários simulados, não houve alteração significativa sendo que o parâmetro se manteve em quase toda a extensão do Ribeirão das Perdizes na classe 1, caindo para a classe 2 a partir do lançamento LA-04 com tendência de recuperação como observado na Figura 17.

A Figura 18 mostra o resumo dos resultados obtidos em todas as simulações realizadas com os 9 cenários propostos. Como um só parâmetro em desacordo com a classe do rio basta para o não atendimento, os resultados mostrados na última coluna da direita observam esse princípio.

Cenário	Classes onde os parâmetros se enquadram								Resultado geral em relação a classe do rio
	Classe 1		Classe 2		Classe 3		Classe 4		
	OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO	OD	DBO	
1			↗					↘	não atende
2			↗					↘	não atende
3			↗			↘			não atende
4	↗							↘	não atende
5	↗					↘			não atende
6	↗	↗							atende
7			↗			↘			não atende
8			↗	↗					atende
9			↗	↗					atende

↗ - pior situação de enquadramento observada no cenário (avaliação positiva do parâmetro)

↘ - pior situação de enquadramento observada no cenário (avaliação negativa do parâmetro)

Figura 18 - Resumo dos resultados das simulações.

Notou-se que somente nos cenários 8 e 9, associados a vazão $Q_{95\%}$, houve atendimento aos padrões de qualidade exigidos para o Ribeirão das Perdizes em relação aos parâmetros OD e DBO. No cenário 8 houve uma redução hipotética na principal captação (CA-04) que na prática pode se mostrar de difícil alcance. No cenário 6 houve atendimento, cabendo lembrar que a vazão Q_m não é uma vazão referencial e em boa parte do tempo essa vazão não

ocorre no corpo hídrico. Pôde-se observar também que os cenários 1, 2 e 4 apresentaram os piores resultados com a DBO enquadrada na classe 4 indicando alto nível de degradação da qualidade das águas para esses cenários.

CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O estudo mostrou que o alcance de objetivos na qualidade de água não dependem exclusivamente de fatores isolados. A modelagem da qualidade da água pode ser uma ferramenta útil no processo de gestão da bacia hidrográfica.

Para um programa de enquadramento é importante ter como foco poucas variáveis. Por esse motivo foram adotados somente os parâmetros OD e DBO nas simulações. Com relação aos parâmetros prioritários, Enderlein *et al.* (1997) mencionam que quanto mais simples for a definição das metas de qualidade, mais eficiente será este instrumento, sendo essencial manter o foco do problema em um número pequeno de variáveis de qualidade da água, o que corresponde a agir com visão prática, fugindo das utopias.

Cabe ressaltar que o enquadramento deve obrigatoriamente observar os aspectos técnicos, econômicos, sociais, políticos, ambientais e ainda outros que sejam relevantes na região onde se objetiva sua implementação.

A falta de dados de monitoramento é fator limitante quando se trabalha com modelos matemáticos de qualidade de água. Nesse sentido recomenda-se ao CBH-SM e órgãos gestores a constituição de uma rede mínima de monitoramento quali-quantitativo a fim se construir séries históricas consistentes que atendam às necessidades de uma modelagem cada vez mais próxima da realidade, imprescindíveis à concepção e execução de um programa de enquadramento de corpos hídricos em uma bacia hidrográfica.

Observou-se, nos diversos cenários simulados, que a DBO foi o parâmetro que mais variou em função dos lançamentos existentes, aliados às retiradas de água do manancial.

As captações excessivas no Ribeirão das Perdizes levaram o corpo hídrico à condição de criticidade e comprometimento integral da vazão referencial.

Desta forma entendeu-se ser recomendável ao Comitê de Bacias e aos demais atores envolvidos na questão, especialmente a concessionária, iniciar discussões sobre novas alternativas para o auxílio no

abastecimento de Campos do Jordão com vistas a recuperação da capacidade autodepuradora do Ribeirão das Perdizes.

Recomenda-se também que os esgotos sejam coletados na bacia e conduzidos para tratamento até outro ponto a jusante com maior capacidade depuradora na bacia do Rio Capivari.

Em relação ao parâmetro OD, observou-se que o rio encontra-se em toda a sua extensão e para todos os cenários simulados, operando entre a classe 1 e 2, estando portanto, de acordo com a classe do rio.

Tendo-se em vista a vocação conservacionista da região e a constatação de que o Ribeirão das Perdizes opera na maior parte de sua extensão na classe 1, em um futuro próximo a sociedade e a comunidade técnica pode se articular para desenvolver estudos mais aprofundados visando o reenquadramento de alguns trechos do Ribeirão das Perdizes com vistas a consolidação de sua preservação, especialmente suas cabeceiras, incluindo-se nesses estudos outros parâmetros significativos.

O grande desafio a ser superado se referiu ao ponto de lançamento LA-04 onde ocorrem os maiores problemas com a DBO. Finalizando, concluiu-se que em relação ao Ribeirão das Perdizes, no regime de vazão referencial preconizado pela Resolução CONAMA 357/05 para fins de efetivação do enquadramento ($Q_{7,10}$ para o Estado de São Paulo), não foi possível simular.

Entretanto nas simulações realizadas com a vazão referencial $Q_{95\%}$, vazão próxima da $Q_{7,10}$, o corpo hídrico somente atendeu satisfatoriamente aos padrões da classe 2 no cenário 9, onde se previu uma eficiência de 94,7% na remoção da DBO e, no cenário 8 onde se previu a redução de 50% na vazão captada em CA-04 associada a eficiência de 93% na remoção da DBO.

No cenário 6 houve atendimento parcial do parâmetro DBO tendo-se em vista que não foi possível garantir que em todo o tempo o rio teria sua classe respeitada devido a possibilidade da ocorrência de menores vazões por certo período de tempo.

Nos demais cenários não houve atendimento quanto ao parâmetro DBO. Os prováveis motivos detectados foram as elevadas concentrações nos esgotos lançados, combinadas com a expressiva retirada de água que hoje encontra-se instalada neste rio.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem a UNESP pela oportunidade concedida.

REFERÊNCIAS

AMBROSE, R.B., T.A. Wool, and J.L. Martin. 1993b. The water quality analysis simulation program, WASP5, Part B: The WASP5 input dataset, Version 5.10. United States Environmental Protection Agency, Environmental Research Laboratory, Athens, GA.

BRASIL. Lei nº 9433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos e cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos. Disponível em: <http://www4.planalto.gov.br/legislacao>.

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

CHAPRA, S.C.; PELLETIER, G.J.; TAO, H. 2008. QUAL2K: A Modeling Framework for Simulating River and Stream Water Quality, Version 2.11: Documentation and Users Manual. Civil and Environmental Engineering Dept., Tufts University, Medford, MA., Steven.Chapra@tufts.edu.

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

CONAMA, Conselho Nacional de Meio Ambiente; Resolução CONAMA 357/2005, fixa as classes de qualidade para as águas doces, salobras e salinas. Disponível em: www.mma.gov.br/port/conama.

COOPERATIVA DE SERVIÇOS E PESQUISAS TECNOLÓGICAS E INDUSTRIAIS-CPTI (2012); Plano das Bacias Hidrográficas da Serra da Mantiqueira - UGRHI-1; Relatório Técnico RT-3 (Final). Campos do Jordão, Novembro de 2012.

DAEE. Departamento de Águas e Energia Elétrica. Manual de Pequenas Obras Hidráulicas, 2005, 112 p. . Disponível em www.daee.sp.gov.br.

DERÍSIO, J.C.; Introdução ao Controle da Poluição Ambiental; CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental, 1992, 186 p. .

- ENDERLEIN, U.S.; ENDERLEIN, R.E.; WILLIAMS, W.P. Water Quality Requirements. In: Helmer, R., Hespanhol, I., eds., Water Pollution Control. E&FN Spon. Londres, Inglaterra; 1997.
- GARCIA, J.I.B.B.; Sistema de suporte a decisão para o lançamento de efluentes. Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária. 2011, 162 p. .
- KNAPIK, H.G.; FERNANDES, C.V.S.; BASSANESI, K.; PORTO, M.F.A.; Qualidade da Água da Bacia do Rio Iguaçu: Diferenças Conceituais entre os Modelos QUAL2E e QUAL2K. RBRH - Revista Brasileira de Recursos Hídricos Volume 16 nº 2 - Abr/Jun 2011, p. 75-88.
- LA LAINA, R.P.; PORTO, M.F.A.; Gestão de Bacias Hidrográficas. Estudos avançados 22 (63), 2008. EPUSP, 60 p. .
- LIAZI, A.; CONEJO, J.G.L; PALOS, J.C.F e CINTRA, P.S.; Regionalização Hidrológica no Estado de São Paulo, Revista Águas e Energia Elétrica, Ano 5, nº14, 1988.
- MONTEIRO, R.C.M.; BORGES, A.K.P.; TAU-K-TORNISIELO, S.M.; DOMINGOS, R.N.; Protótipos de Sistema Construídos em Áreas Alagadas para Tratamento de Efluentes de Piscicultura; Holos Environment, v.8 n.2, 2008, p.119.
- NAHON, I.M.; Sistema de Apoio à Análise de Outorga de Lançamento de Efluentes para a Variável Demanda Bioquímica de Oxigênio: Estudo de Caso da Bacia do Alto Iguaçu, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.
- OPPA, L.F.; Utilização de Modelo Matemático de Qualidade de Água para Análise de Alternativas de Enquadramento do Rio Vacacaí Mirim, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.
- PALMIERI, V.; Calibração do Modelo QUAL2E para o Rio Corumbataí, Dissertação de Mestrado, Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro, 2003.
- PORTO, M.F.A.; Sistemas de gestão da qualidade das águas: uma proposta para o caso brasileiro. Tese de Livre Docência. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, (2002).
- RODRIGUES, R.B.; PORTO, M.F.A.; QUAL2R - Interface para o Modelo QUAL2E - Manual, 2003.
- RODRIGUES, R.B.; Sistema de Suporte a Decisão Proposto para a Gestão Quali-Quantitativa dos Processos de Outorga e Cobrança pelo Uso da Água. Tese de Doutorado. EPUSP, 155 p., 2005.
- SABESP, Estudo Populacional para o Sistema de Esgotamento Sanitário do Município de Campos do Jordão (CONCREMAT/COBRAPE, 2008); EIA-RIMA para licenciamento do Sistema de Esgotamento Sanitário do Município de Campos do Jordão (Consórcio Etep/Enger/Maubertec, 2009).
- SCARIOT, M.R.; Modelagem e Simulação Sistêmica de Rios: Avaliação dos Impactos Ambientais no Rio Mogi-Guaçu/SP. Tese de Doutorado, UNICAMP, 2008.
- SOUZA, R.S.; Simulação Hidrodinâmica da Qualidade da Água. Estudo de Caso: Ajuste do Modelo CE-QUAL-WE à Sub Bacia do Arroio Demétrio, Bacia Hidrográfica do Rio Gravataí/RS, Dissertação de Mestrado, Universidade Federal do Rio Grande do Sul - IPH, Porto Alegre, 2006.
- STREETER, H.W.; PHELPS, E.B.; A study of the natural purification of the Ohio River. Public Health Bulletin 146, U.S. Public Health Service, Washington, 1925.
- TUCCI, C.E.M.; Modelos Hidrológicos - Porto Alegre: Ed. UFRGS/Associação Brasileira de Recursos Hídricos, 1998, 672 p. .
- TYRRELL, H.J.V; The origin and present status of Fick's diffusion law. Journal of Chemical Education 41(7): 397-400 (1964).
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. The Enhanced Stream Water Quality Models QUAL2E and QUAL2E-UNCAS, Documentation and User Model, BROWN & BARNWELL (EPA/600/3-87/007 - May 1987).
- USEPA, United States Environmental Protection Agency. Technical Guidance Manual for Developing Total Maximum Daily Loads, Book II: Streams and Rivers, Part 1: Biochemical Oxygen Demand/Dissolved Oxygen and Nutrients/Eutrophication. EPA 823-B-95-007 September 1995.
- VON SPERLING, M.; Introdução a Qualidade das Águas e ao Tratamento de Esgotos, e Princípios do Tratamento Biológico de Águas Residuárias; 1998 e 2005, UFMG.
- ZANIBONI FILHO, E.; BARBOSA, N.D.C.; GONÇALVES, S.M.R.; Caracterização e Tratamento de Efluente das Estações de Piscicultura - Revista UNIMAR 19(2):537-548, 1997.

Simulation Of Qualitative And Quantitative Modeling For The Preliminary Evaluation Of Water Quality In The Ribeirão Das Perdizes Stream In Campos Do Jordão/SP, To Support Its Classification

ABSTRACT

The purpose of this research was to present the principles for the implementation of a future water body classification program at the UGRHI-1 (Management Unit of Water Resources-1/São Paulo, Brazil) using qualitative and quantitative water modeling. Our study area was in Campos do Jordão, a city in the state of São Paulo, specifically in the Perdizes river watershed, which is included in the UGRHI-1. The water quality assessment used a modeling methodology that can support a future study for the classification of water bodies in the region. The behavior of DO and BOD parameters was assessed in the water quality scenarios, considering the variations of flows, loads, reductions in withdrawals and different efficiencies in sewage treatment. The model used was QUAL2E developed by USEPA (United States Environmental Protection Agency) that received a new graphic interface named QUAL2R model. The reference flows $Q_{7,10}$, $Q_{95\%}$ and Q_m used were obtained through the DAEE (Department of Water and Electric Energy) hydrologic regionalization method. It was noted that of the 9 proposed scenarios, only scenario 6 that was predicted in the flow regime Q_m with the existence of a treatment system capable of removing 93% of the BOD, in the Perdizes River remained 67.5% of the time in class 2. Scenario 8 predicted a 50% reduction in In scenario 8 a reduction of 50% in the flow captured in CA-04, associated with the efficiency of 93% of BOD removal keeping the river in class 2. In scenario 9 the minimum required efficiency in sewage treatment in the flow regime $Q_{95\%}$ for keeping the river in class 2 was also calculated and the value of 94.7% was obtained.

Key-words: *Mathematical modeling of water quality. Classification of water bodies. Model QUAL2E,. Management of quality and of water*