

## Uso combinado de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração como ferramenta para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais

*Combined use of river water quality flow-duration curves and modeling as a tool to support class definition according to conama 357/2005 regulation*

Ana Paula Santos Calmon, Joseline Corrêa Souza, José Antonio Tosta dos Reis e Antonio Sérgio Ferreira Mendonça

Departamento de Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito, Vitória, ES, Brasil

ana.calmon@ufes.br; joseline.correa@gmail.com; jatreis@gmail.com; anserfm@terra.com.br

Recebido: 15/06/15 - Revisado: 21/08/15 - Aceito: 31/08/15

### RESUMO

O presente trabalho teve como objetivo propor metodologia para suporte ao processo de enquadramento de cursos d'água superficiais, fundamentada em análise conjunta de curvas de permanência de qualidade e capacidade de autodepuração de rios. Para composição dos diferentes cenários de simulação da qualidade da água foram estabelecidos três panoramas de tratamento de esgotos associados com distintas eficiências de remoção de demanda bioquímica de oxigênio (DBO), duas condições de abatimento de cargas orgânicas e três horizontes de análise (2014, 2020 e 2030). Foi aplicado o modelo QUAL-UFMG para avaliação da capacidade de autodepuração dos cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Pardo, localizado no sul do estado do Espírito Santo, tendo sido simulados os parâmetros DBO e oxigênio dissolvido (OD), considerando o setor de esgotamento sanitário como única fonte de cargas poluidoras. Foram produzidas curvas de permanência de qualidade para o parâmetro  $DBO_{5,20}$ , associadas aos padrões ambientais estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005 para rios Classes 1, 2 e 3. Os resultados obtidos mostram a relevância da incorporação da modelagem da autodepuração na avaliação da qualidade dos corpos d'água superficiais para a implementação do enquadramento e, adicionalmente, indicam que a visão não determinística oferecida pelas curvas de permanência facilitaria o processo de tomada de decisão acerca do estabelecimento de metas progressivas para a efetivação do enquadramento.

**Palavras Chave:** Enquadramento. Capacidade de autodepuração. Curvas de permanência de qualidade. Esgoto doméstico.

### ABSTRACT

This study aimed to propose a methodology to support the establishment of Brazilian CONAMA 357/2005 rivers water quality classes based on quality parameters Flow-Duration Curves and self-purification analysis. To establish the different simulation water quality scenarios three sewage treatment conditions associated with distinct biochemical oxygen demand (BOD) removal efficiencies, two organic loads conditions and three time horizons (2014, 2020 and 2030) were considered. The QUAL-UFMG model for assessment of the self-purification capacity of the Pardo river, located in the south of Espírito Santo state, Brazil, was applied considering the BOD and dissolved oxygen (DO) parameters. In the simulations only river watershed sewage discharges were considered. BOD Flow-Duration Curves associated with environmental standards established by CONAMA Resolution 357/2005 for classes 1, 2 and 3 rivers were drawn. The results indicate the great importance of using river self-purification modeling for assessment of surface water body quality to establish river water classes. The results also indicate that a non-deterministic approach to water quality Flow-Duration Curves facilitates the decision-making process for the establishment of progressive water quality objectives.

**Keywords:** Classification of surface water rivers self-purification capacity. Quality Flow-Duration Curves. Domestic sewage.

## INTRODUÇÃO

A Política Nacional de Recursos Hídricos (PNRH), instituída pela Lei Nº 9.433, de 08 de janeiro de 1997 (BRASIL, 1997), ao adotar a bacia hidrográfica como unidade territorial de planejamento estabeleceu que o processo de gerenciamento dos recursos hídricos e a implementação da política por meio dos seus instrumentos de gestão devem ocorrer no âmbito dessa unidade territorial, de forma a regular e controlar o uso, a preservação e a recuperação dos recursos hídricos. Dentre os instrumentos estabelecidos pela PNRH, o enquadramento dos corpos d'água em classes, segundo usos preponderantes, apresenta especial relevância, uma vez que, numa concepção de planejamento descentralizado e participativo, figura como ferramenta de integração entre a gestão de quantidade e de qualidade da água na esfera da bacia hidrográfica.

Tucci (2005) observa que o modelo hidrológico é umas das ferramentas desenvolvidas pela ciência para melhor compreender e representar o comportamento da bacia hidrográfica e prever condições diferentes das observadas.

Mendes e Cirilo (2013) e Teodoro et al. (2013) ressaltam que os modelos matemáticos de qualidade das águas vêm se mostrando ferramentas alternativas de grande potencial para suporte à decisão ao gerenciamento dos recursos hídricos, visto que os vieses quantitativo e qualitativo do comportamento dos cursos d'água podem ser estudados conjuntamente.

Trabalhos, como os reportados por Binotto (2012), Gastaldini e Oppa (2011) e Gomes e Simões (2014), aplicaram modelos de qualidade da água como ferramentas de apoio à implantação do enquadramento, empregando-os para análise da capacidade de autodepuração dos corpos d'água. Nessa linha de pesquisa, Andrade (2012), Brites (2010) e Brites, Porto e Fernandes (2007) desenvolveram sistemas computacionais para auxílio à implementação do enquadramento, incorporando aos sistemas modelo de simulação da qualidade de água.

Paralelamente, ferramentas que indiquem o comportamento e o atendimento das concentrações dos parâmetros de qualidade às metas estabelecidas pelo enquadramento, como as chamadas curvas de permanência de qualidade da água, podem ser úteis para o processo de implantação do enquadramento, uma vez que as referidas curvas permitem associar os valores de vazões com os valores de concentrações ou de cargas de parâmetros de qualidade da água e, conseqüentemente, relacionar esses valores à probabilidades de ocorrência (BRITES; PORTO; FERNANDES, 2009; FORMIGONI et al., 2011). Dentro dessa perspectiva metodológica, identificam-se na literatura técnica diversos outros trabalhos como os apresentados por Babbar-Sebens e Karthikeyan (2009), Binotto, (2012), Bonta e Cleland (2003), Bonta e Dick (2003), Calmon et al. (2014), Cleland (2003), Cunha e Calijuri (2010), Cunha, Calijuri e Mediondo (2012), Garcia et al. (2012), Guimarães (2013), EPA (2007a,b, 2008), Johnson, Whiteaker e Maidment (2009), Kim et al. (2012), Machado et al. (2007), Marin et al. (2007), Miller (1951), NDEP (2003), Searcy (1959), Vogel e Fennessey (1995). Entretanto, é relevante observar que nas referidas pesquisas não foram empregados conjuntamente o uso de curvas de permanência de qualidade e modelagem da autodepuração visando suporte

à decisão no processo de enquadramento de cursos d'água.

Nesse contexto, o presente trabalho tem por objetivo principal propor uma metodologia para suporte ao processo de enquadramento dos cursos d'água superficiais, amparada na análise conjunta de curvas de permanência de qualidade e na modelagem da autodepuração em rios. Para que possa ser levada a termo, a metodologia proposta impõe a avaliação de vazões mínimas de referência para o sistema hídrico estudado e sua caracterização fisiográfica, a avaliação das cargas brutas de DBO<sub>5,20</sub> produzidas na bacia, a estimativa de oxidação da matéria orgânica e das cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub> nos cursos d'água, etapas que permitirão avaliação da frequência com que os padrões de qualidade associados às diferentes classes de uso seriam atendidos.

## REGIÃO DO ESTUDO DE CASO

A metodologia proposta é válida, de maneira geral, para diferentes cursos d'água. Para estudo de caso foi escolhida a bacia hidrográfica do rio Pardo (Figura 1), afluente do rio Braço Norte Esquerdo, importante tributário do rio Itapemirim, localizado na porção sul do estado do Espírito Santo.

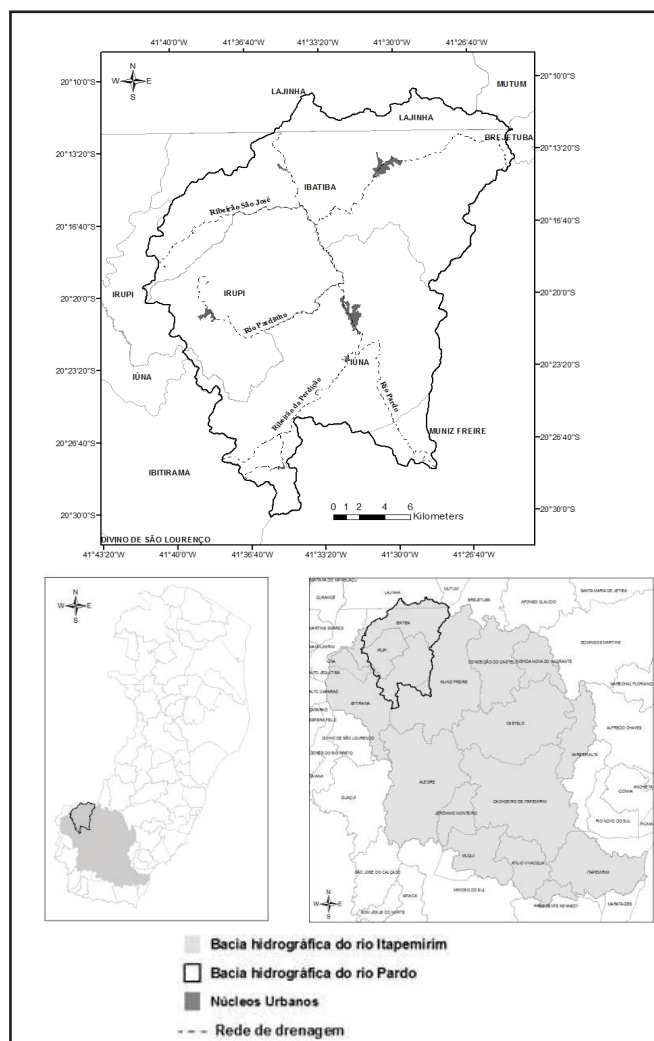


Figura 1– Localização da bacia hidrográfica do rio Pardo

Na bacia do rio Pardo, que compreende área de drenagem de cerca de 611 Km<sup>2</sup>, estão inseridas partes dos municípios de Ibatiba-ES, Irupi-ES, Iúna-ES, Muniz Freire-ES e Lajinha-MG. O rio Pardo, com extensão de 57,9 Km, nasce no município de Ibatiba em altitude aproximada de 1.244 m e apresenta exutório em altitude de cerca de 400 m.

Na bacia do rio Pardo não existem estações de tratamento de esgoto em operação. O rio Pardo apresenta como principais tributários receptores de efluentes domésticos brutos urbanos o rio Pardinho, que recebe o esgoto produzido pelo núcleo urbano de Irupi; e o ribeirão da Perdição, que recebe o esgoto produzido nas localidades de Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças. O rio Pardo é receptor direto dos esgotos produzidos pelos núcleos urbanos de Ibatiba e Iúna.

## MATERIAIS E MÉTODOS

As atividades de avaliação da disponibilidade hídrica superficial, análise de frequência de atendimento de padrões de qualidade relativos ao parâmetro DBO<sub>5,20</sub> e avaliação das cargas de DBO<sub>5,20</sub> a serem tratadas para o estabelecimento de determinada classe de enquadramento foram conduzidas de acordo com procedimentos metodológicos estabelecidos por Calmon et al. (2014).

Esses procedimentos metodológicos, assim como aqueles associados à caracterização fisiográfica da bacia hidrográfica do rio Pardo e à simulação matemática da qualidade de água são sumariamente apresentados nas seções subsequentes.

Para obtenção do Modelo Digital de Elevação Hidrológicamente Consistido (MDE-HC) da bacia do rio Pardo e apropriação de características fisiográficas da região de estudo (como área, variação média de altitude e declividade e extensão dos cursos d'água), foi utilizado o programa ArqGIS 10.1, desenvolvido pela empresa Environmental Systems Research Institute (ESRI), empregando-se metodologias descritas pelo Núcleo de Geotecnologias da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (Labgis) (LABGIS, 2013), Caçavara (2012) e ESRI (2015).

O MDE-HC é gerado por meio de interpolador que se vale do princípio de que a água é a principal força erosiva do relevo, impondo restrições sobre o processo de interpolação que resulta em uma estrutura de drenagem conectada e representação correta de cordilheiras e cursos d'água (ESRI, 2015). Para produção do MDE-HC da bacia do rio Pardo foi empregada a ferramenta Topo to Raster, tendo como dados de entrada para o interpolador o limite da bacia do rio Pardo, rede de drenagem e curvas de nível com equidistância de 20 m. Para finalizar a consistência hidrológica do modelo, foi aplicada a ferramenta Fill para remover as depressões falsas remanescentes e elevações abruptas, geradas equivocadamente pelo interpolador, devido aos erros do processo e dos dados.

### ETAPA 1 – Avaliação da disponibilidade hídrica da bacia do rio Pardo

A avaliação da disponibilidade hídrica superficial da

bacia hidrográfica do rio Pardo foi realizada por meio de curvas de permanência de vazões, estabelecidas a partir de funções regionais propostas por Calmon et al. (2014) (equações 01 e 02).

$$Q_{50R} = 0,0409 \cdot A^{0,8338} \quad (01)$$

$$Q_{95R} = 0,0163 \cdot A^{0,8434} \quad (02)$$

Nas equações (01) e (02), Q<sub>50R</sub> representa a vazão regionalizada com permanência de 50% (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), Q<sub>95R</sub> a vazão regionalizada com permanência de 95% (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) e A representa a área de drenagem (variável independente em Km<sup>2</sup>).

Foram estabelecidas as equações empíricas para construção das curvas de permanência de vazões regionalizadas (com permanências variando entre 50% e 95%) no exutório (seção de controle C) e em duas outras seções fluviométricas do rio Pardo (seções de controle A e B) (Tabela 1). Essas equações empíricas foram determinadas a partir das equações (01) e (02), adotando-se metodologia descrita por Tucci (2002), a partir da qual se ajusta uma função exponencial (equação 03) às vazões com permanência variando entre 50% e 95%.

$$Q_R = e^{[a \cdot P + b]} \quad (03)$$

Na equação (03), Q<sub>R</sub> representa a vazão regionalizada (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), P a probabilidade de ocorrência das vazões (%) e a e b os coeficientes da equação determinados por meio das equações (04) e (05), respectivamente.

$$a = -\frac{\ln(Q_{50R}/Q_{95R})}{0,45} \quad (04)$$

$$b = \ln(Q_{50R}) - (0,5 \cdot a) \quad (05)$$

A figura 2 apresenta a localização espacial das seções de controle, da estação fluviométrica Terra Corrida - Montante e das respectivas bacias de drenagem consideradas na construção das curvas de permanência de vazões.

**Tabela 1 – Equações das curvas de permanência de vazões regionalizadas entre 50% e 95% para cada seção de controle**

Seção de controle	Área de contribuição (Km <sup>2</sup> )	Q <sub>50R</sub> (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Q <sub>95R</sub> (m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Equação empírica
Seção A	127,02	2,32	2,32	e <sup>(-1,94.P + 1,81)</sup>
Seção B	550,32	7,89	3,34	e <sup>(-1,91.P + 3,02)</sup>
Seção C	611,03	8,60	3,65	e <sup>(-1,91.P + 3,11)</sup>

Nota: P: probabilidade de ocorrência das vazões (frequência %).

As curvas de permanência de vazões reunidas na tabela 1 permitiram, adicionalmente, a apropriação da vazão com permanência de 90% (Q<sub>90</sub>), vazão mínima de referência utilizada no processo de outorga no estado do Espírito Santo, que foi empregada nas simulações do processo de autodepuração.

Ressalta-se que as seções de controle foram definidas para verificação, em diferentes pontos da bacia do rio Pardo, da influência do processo de autodepuração no abatimento de parcela da carga orgânica disposta nos cursos d'água estudados

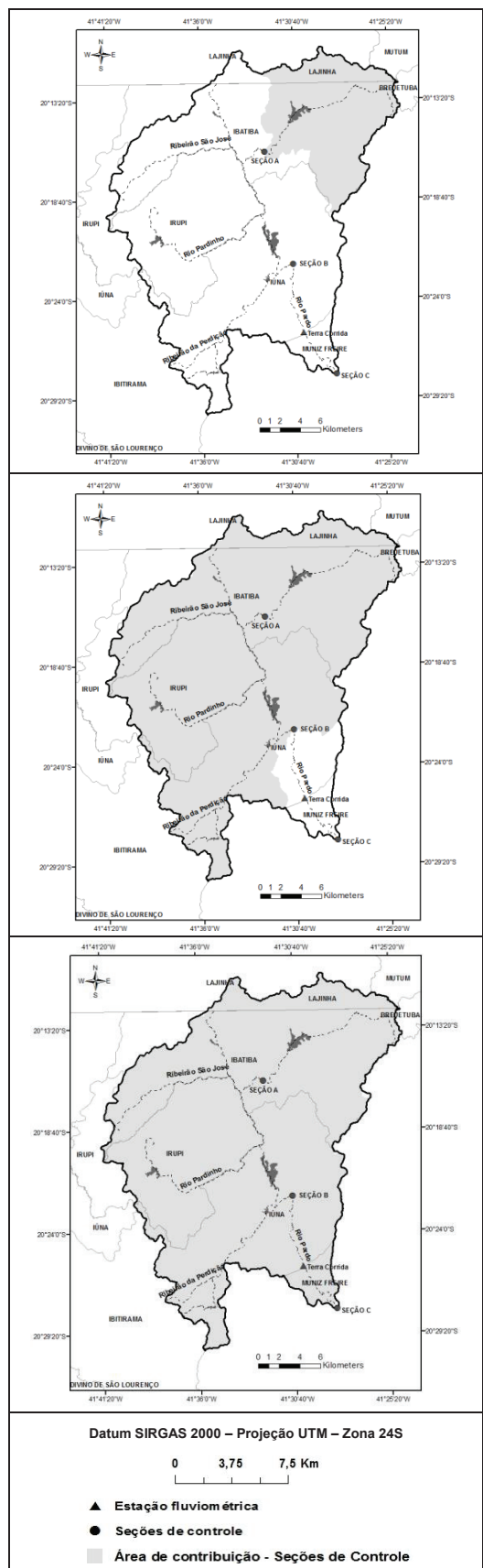


Figura 2 - Localização espacial das seções de controle (A, B e C) e da estação fluviométrica Terra Corrida - Montante e representação das bacias contribuintes consideradas na construção das curvas de permanência nas seções de controle

e, conseqüentemente, nas diferentes perspectivas de enquadramento dos mesmos.

### ETAPA 2 – Determinação das cargas totais de DBO<sub>5,20</sub>

Nesta etapa foram determinadas as cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> produzidas na bacia hidrográfica do rio Pardo, considerando-se apenas aquelas provenientes do esgotamento sanitário. Estas cargas correspondem às cargas domésticas DBO<sub>5,20</sub> produzidas e não coletadas (cargas diretas) e às cargas de DBO<sub>5,20</sub> nos efluentes dos sistemas de tratamento de esgoto.

Foram estabelecidos três panoramas para a determinação das cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> doméstica na região de estudo. Nos panoramas 01, 02 e 03 foram consideradas, respectivamente, eficiências de 0%, 70% e 85% para a remoção de DBO<sub>5,20</sub> associadas às cargas oriundas da população urbana da bacia. O panorama 1 reproduziu a condição atual da bacia do rio Pardo, uma vez que na bacia não há prestação de serviço de tratamento de esgoto. Nos panoramas 2 e 3 foram assumidos que 100% da população urbana seria atendida com serviço de coleta e tratamento de esgoto. Em função da inexistência de informações consistentes sobre o esgotamento sanitário nas áreas rurais da região de estudo, foi assumido, em favor da segurança, que toda carga de DBO<sub>5,20</sub> oriunda do esgoto gerado pela população rural atinge os corpos d'água superficiais, sem abatimento do valor dessa carga a partir de sistemas individuais de tratamento ou em decorrência de disposição de esgotos brutos no solo.

Em todos os panoramas considerados, as estimativas das cargas totais foram realizadas para os horizontes 2014, 2020 e 2030.

A população (urbana e rural) em cada distrito da bacia do rio Pardo foi estimada por meio da sobreposição das imagens correspondentes aos limites dos distritos contidos na bacia de estudo e dos limites dos setores censitários utilizados para levantamento das informações no CENSO 2010 (IBGE, 2010). Os arquivos dessas imagens foram manipulados no programa ArcGIS e, por meio da superposição de imagens, foram identificadas as parcelas dos setores censitários contidos em cada distrito. Posteriormente, foram identificados os distritos contidos nas áreas de contribuição das seções de controle (A, B e C).

Para os casos em que fração do setor censitário não estava contida integralmente na área de contribuição relativa a cada seção de controle, a população rural residente na fração do setor censitário contida na área de contribuição foi estimada pela equação (06):

$$P_{RDist} = \left( \frac{F_{Área}}{Área\ total\ do\ setor\ censitário} \right) \cdot P_{RCen} \quad (06)$$

Na equação (06), P<sub>RDist</sub> indica a população rural residente na fração do setor censitário contida na área de contribuição (hab), F<sub>Área</sub> a área da fração da área do setor censitário contida na área contribuição (m<sup>2</sup>) e P<sub>RCen</sub> a população rural do setor censitário (hab).

As projeções de crescimento populacional para os anos de interesse foram realizadas por meio da aplicação das taxas médias de crescimento geométrico anual (entre os anos

de 2000 e 2010) indicadas pelo Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE) (IBGE, 2011) e apresentadas na tabela 2.

**Tabela 2 – Taxa média geométrica de crescimento anual (entre os anos de 2000 e 2010) relativa aos municípios da região de estudo**

Distrito	Município	Taxa média geométrica de crescimento anual
Ibatiba	Ibatiba/ES	1,53%
Irupi	Irupi/ES	1,25%
Iúna	Iúna/ES	0,46%
Nossa Sra. das Graças		
Santíssima Trindade		
São Pedro	M. Freire/ES	-0,68%
Itaici		
Lajinha	Lajinha/MG	0,04%

Fonte: IBGE, 2011 (adaptado).

Nos itens subsequentes são sumarizados os procedimentos empregados para se estimar as cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> produzidas pelas populações dos distritos contidas na áreas de contribuição relativas a cada seção de controle, considerados os diferentes horizontes de tempo e panoramas de tratamento de esgotos domésticos.

#### Estimativa da vazão média de esgotos domésticos

A vazão média de esgotos domésticos da população (urbana e rural) foi estimada por meio da equação (07), baseada em Von Sperling (2005):

$$Q_{(u,r)} = P_{(u,r)} \cdot QPC \cdot R \quad (07)$$

Na equação (07),  $Q_{(u,r)}$  representa a vazão média de esgotos domésticos inerente à população urbana ou rural (L.d<sup>-1</sup>), a população urbana ou rural (hab), a quota per capita de água (L.hab<sup>-1</sup>.d<sup>-1</sup>) e o coeficiente de retorno esgoto/água.

Assumiu-se coeficiente de retorno 0,8, valor indicado pelas NBR 9649/1986 e 14486/2000 em situações nas quais não há dados locais comprovados oriundos de pesquisas (ABNT, 1986, 2000).

Von Sperling (2005) indica faixas típicas de consumo per capita de água de acordo com a faixa da população (Tabela 3).

**Tabela 3- Faixas típicas de consumo per capita de água**

Porte da comunidade	Faixa de população (hab)	QPC (L.hab <sup>-1</sup> .d <sup>-1</sup> )
Povoado rural	< 5.000	90 - 140
Vila	5.000 -10.000	100 - 160
Pequena localidade	10.000 – 50.000	110 - 180
Cidade média	50.000 – 250.000	120 - 220
Cidade grande	> 250.000	150 - 300

Fonte: Von Sperling, 2005 (adaptado).

Adotaram-se neste estudo os valores médios relativos às faixas típicas, conforme os números de habitantes em cada distrito contidos nas áreas de contribuição relativas às seções de controle e horizontes de tempo analisados.

#### Estimativa da carga direta de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico

Para a estimativa das cargas diretas de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico, relativas à população rural, foi empregada a equação (08) baseada em Von Sperling (2005):

$$CD_{r(DBO_{5,20})} = Q_r \cdot C_{b(DBO_{5,20})} \cdot 10^{-9} \quad (08)$$

Na equação (08),  $CD_{r(DBO_{5,20})}$  indica a carga direta de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico relativa à população rural (t DBO<sub>5,20</sub>.d<sup>-1</sup>) e  $C_{b(DBO_{5,20})}$  a concentração de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico bruto (mg.L<sup>-1</sup>).

Adotou-se o valor de 400 mg.L<sup>-1</sup> para a concentração de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico bruto. Esse valor corresponde ao limite superior da faixa de concentração de DBO<sub>5,20</sub> característica de esgoto doméstico bruto, indicada por Von Sperling (2005) e Jordão e Pessoa (2009).

#### Estimativa da carga de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico tratado

As cargas de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico tratado, relativas à população urbana, foram estimadas utilizando-se a equação (09):

$$CR_{u(DBO_{5,20})} = Q_u \cdot C_{b(DBO_{5,20})} \cdot (1 - \%E_T) \cdot 10^{-9} \quad (09)$$

Na equação (09),  $CD_{u(DBO_{5,20})}$  representa a carga de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico tratado, relativa à população urbana (t DBO<sub>5,20</sub>.d<sup>-1</sup>) e  $\%E_T$  o percentual de eficiência do tratamento de esgoto em relação à remoção de DBO<sub>5,20</sub>.

#### Estimativa da carga total de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico

As cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> de esgoto doméstico nas seções de controle estudadas foram estimadas por meio da equação (10).

$$CT_{(DBO_{5,20})} = CD_{r(DBO_{5,20})} + CR_{u(DBO_{5,20})} \quad (10)$$

Na equação (10),  $CT_{(DBO_{5,20})}$  indica a carga total de DBO<sub>5,20</sub> de esgoto doméstico na seção de controle (t DBO<sub>5,20</sub>.d<sup>-1</sup>).

### ETAPA 3 – Avaliação da capacidade de autodepuração dos cursos de água da bacia hidrográfica do rio pardo

Para avaliação das capacidades de autodepuração dos cursos d'água da bacia do rio Pardo foi aplicado o modelo QUAL-UFMG, modelo detalhadamente apresentado e discutido por Von Sperling (2007).

Com auxílio do modelo QUAL-UFMG foram simulados perfis de DBO<sub>5,20</sub> e OD, assumindo-se sistema hídrico funcionando em regime permanente. Para simulação das concentrações de DBO<sub>5,20</sub> foram considerados os fenômenos de desoxigenação associados à oxidação da matéria orgânica e às contribuições de cargas difusas externas (cargas de DBO oriundas do esgoto doméstico produzido pela população rural). Para simulação das

concentrações de OD foram consideradas a reaeração atmosférica e a desoxigenação produzida pela oxidação da matéria orgânica.

### Caracterização do sistema fluvial simulado

Para simular as capacidades de autodepuração de cursos d'água da bacia hidrográfica do rio Pardo, foi utilizada toda a extensão do rio Pardo, 57,9 Km, desde sua formação até sua foz. A construção do modelo hidráulico envolveu a segmentação do sistema fluvial em elementos computacionais (unidade de integração) com 100 m de comprimento cada.

O trecho simulado foi caracterizado pela contribuição de fontes pontuais e distribuídas. As fontes pontuais foram constituídas pelos tributários do rio Pardo (ribeirão São José, rio Pardinho e ribeirão da Perdição, com extensões, respectivamente, de 17,5 Km, 19,9 Km e 18,5 Km) e os efluentes domésticos de 05 (cinco) núcleos urbanos situados na bacia do rio Pardo (Ibatiba, Irupi, Iúna, Santíssima Trindade e Nossa Senhora das Graças). As fontes distribuídas foram compostas pelas vazões incrementais e cargas de DBO<sub>5,20</sub> decorrentes dos esgotos produzidos pela população rural situada na bacia do rio Pardo.

Na figura 3 apresenta-se o diagrama unifilar para o sistema hídrico em estudo, indicando-se a localização das fontes pontuais e das seções de controle.

### Dados de entrada do modelo

#### Dados iniciais

A concentração de saturação de oxigênio assumiu o valor de 8,11 mg.L<sup>-1</sup>, estimada por meio da fórmula proposta por Popel (1979) a partir dos valores médios de altitude e temperatura na bacia. O valor de altitude média da bacia do rio Pardo foi estimado em 846,36 m. O valor médio adotado

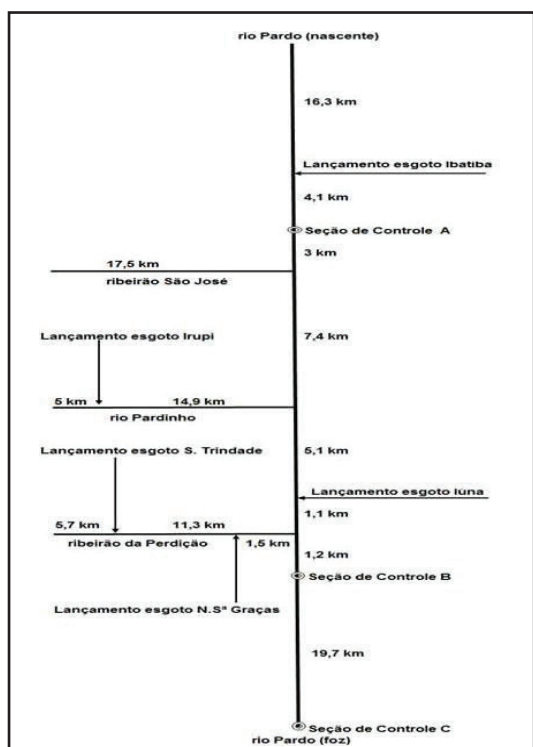


Figura 3 – Diagrama unifilar da bacia do rio Pardo

para a temperatura foi 20,6°C, obtido por meio de média dos valores de temperatura apresentados em relatório produzido pela Companhia Espírito Santense de Saneamento (CESAN), relativo monitoramento na área de estudo realizado durante o período de maio/2006 a junho/2014.

### Características hidráulicas dos cursos d'água

As relações funcionais entre vazão e velocidade e entre vazão e profundidade (funções potenciais no modelo QUAL-UFMG) foram estabelecidas a partir de registros de medições de vazão realizadas na estação fluviométrica de Terra Corrida – Montante, instalada e em operação no rio Pardo.

Foram estabelecidas equações de ajuste da velocidade e da profundidade em função da vazão, equações (11) e (12), baseadas em Thomann e Mueller (1987). Os coeficientes dessas equações foram determinados por meio de análise de regressão, utilizando-se os dados referentes às medições de descarga realizadas na estação fluviométrica de Terra Corrida - Montante, durante os anos de 1996 a 2013.

$$U = 0,1433 \cdot Q^{0,6305} \quad (11)$$

$$H = 0,6076 \cdot Q^{0,2566} \quad (12)$$

Nas equações (11) e (12), U indica a velocidade do curso d'água (m.s<sup>-1</sup>), H a profundidade da lâmina d'água (m) e Q a vazão do curso d'água (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).

O coeficiente K<sub>d</sub>, taxa que regula a oxidação da matéria orgânica, foi avaliado em função de características hidráulicas do corpo d'água (profundidade e vazão), considerando-se a formulação proposta por EPA (1985) e Thomann e Mueller (1987), conforme equação (13).

$$K_d = 0,3 \cdot \left(\frac{H}{2,5}\right)^{-0,434} \quad (\text{para } H \leq 2,5 \text{ m}) \quad (13)$$

Na equação (13), H representa a profundidade do corpo d'água (m) e Q a vazão do corpo d'água (m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>).

Para avaliação do coeficiente K<sub>d</sub>, a partir das informações de medição de vazão realizadas na estação fluviométrica de Terra Corrida - Montante, selecionou-se o valor de vazão associado às condições de estiagem na seção C (foz do rio Pardo) e o valor de profundidade da lâmina d'água associado a essa vazão (4,01 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup> e 0,78 m, respectivamente). Para o coeficiente K<sub>d</sub>, estimado a partir da equação (08), foi assumido valor de 0,5 d<sup>-1</sup>, valor conservador em termos de abatimento da carga orgânica no corpo receptor e condizente com valores típicos de literatura técnica corrente.

A constante cinética que regula o processo de reaeração atmosférica (K<sub>2</sub>) foi estimada a partir do valor de vazão associado às condições de estiagem do rio Pardo (4,01 m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>) e aos valores de profundidade e de velocidade associados a essa vazão (0,78 m e 0,332 m.s<sup>-1</sup>, respectivamente), considerando-se a expressão originalmente estabelecida por O'Connor e Dobbins em 1958, reproduzida por Von Sperling (2007) (equação 14).

$$K_2 = 3,73 \cdot U^{0,5} \cdot H^{-1,5} \quad (\text{para } 0,6 \text{ m} \leq H \leq 4,0 \text{ m e } 0,05 \text{ m.s}^{-1} \leq U \leq 0,8 \text{ m.s}^{-1}) \quad (14)$$

O emprego da formulação proposta por O'Connor e Dobbins em combinação com as equações de ajuste da velocidade e da profundidade em função da vazão (equações 11 e 12) conduziu à equação (15), empregada para apropriação do valor de  $K_2$  em função da vazão em cada segmento dos cursos d'água objetos das simulações realizadas.

$$K_2 = 3,73 (0,1433 \cdot Q^{0,6305})^{0,5} \cdot (0,6076 \cdot Q^{0,2566})^{-1,5} \quad (15)$$

Nas simulações realizadas, para correção dos valores dos coeficientes cinéticos em função da temperatura adotada neste estudo, foram empregados valores típicos do coeficiente de temperatura ( $\theta$ ), indicados na literatura técnica, 1,047 para os coeficientes  $K_1$  e  $K_d$  (THOMANN; MUELLER, 1987) e 1,024 para  $K_2$  (EPA, 1985).

### Vazões dos cursos d'água

Para condução das simulações foram adotadas vazões de referência  $Q_{90}$ , determinada conforme especificado na Etapa 1 e cujos valores, para as seções de controle, estão indicados na tabela 4. A vazão incremental foi estimada por meio de balanço de massa, considerada a diferença entre a vazão na seção final do trecho simulado e a vazão nas cabeceiras do sistema hídrico. Em todas as simulações realizadas, foi assumida a vazão incremental de  $0,035 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1} \cdot \text{Km}^{-2}$ , considerada uniforme para todos os cursos d'água estudados.

Tabela 4 - Valores de vazão  $Q_{90}$  estimados para cada seção de controle

Seção de controle	Curso d'água	Extensão do trecho simulado (km)	$Q_{90} (\text{m}^3 \cdot \text{s}^{-1})$
Seção A	rio Pardo	20,42	1,07
Seção B	rio Pardo	38,22	3,67
Seção C	rio Pardo	57,91	4,01

### Vazões de esgotos domésticos

As vazões médias de esgotos domésticos das populações urbana e rural foram estimadas por meio da equação (02).

### Concentração e carga dos constituintes modelados

Considerando-se os três panoramas (definidos em função das eficiências de remoção da  $\text{DBO}_{5,20}$  do esgoto produzido pelas populações urbanas) e a concentração de  $\text{DBO}_{5,20}$  no esgoto doméstico bruto adotada neste estudo ( $400 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ ), foram determinadas as concentrações de  $\text{DBO}_{5,20}$  no esgoto doméstico tratado, cujos valores são apresentados na tabela 5. Em favor da segurança, a concentração de OD dos efluentes tratados foi assumida como zero nos três panoramas analisados.

Tabela 5 - Concentração de  $\text{DBO}_{5,20}$  no esgoto doméstico tratado relativo à população urbana por localidade da bacia do rio Pardo

Distritos	Concentração de $\text{DBO}_{5,20}$ no esgoto doméstico tratado ( $\text{mg} \cdot \text{L}^{-1}$ )		
	Panorama 1 (Eficiência 0%)	Panorama 2 (Eficiência 70%)	Panorama 3 (Eficiência 85%)
	Ibatiba, Irupí, Iúna, N. Sa das Graças e Santíssima Trindade	400	120

Assumiu-se os valores  $7,5 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$  e  $2,0 \text{ mg} \cdot \text{L}^{-1}$ , respectivamente, para as concentrações de OD e  $\text{DBO}_{5,20}$  na vazão incremental, de acordo com Von Sperling (2007).

A carga direta incremental de  $\text{DBO}_{5,20}$  produzida pela população rural foi estimada por meio da equação (16).

$$\text{CDi}_{\text{DBO}_{5,20}} = \left( \text{CDr}_{\text{DBO}_{5,20}} / \text{Lt} \right) \cdot 10^6 \quad (16)$$

Na equação (16),  $\text{CDi}_{\text{DBO}_{5,20}}$  indica a carga direta incremental de  $\text{DBO}_{5,20}$  relativa à população rural ( $\text{g} \text{ DBO}_{5,20} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ ),  $\text{CDr}_{\text{DBO}_{5,20}}$  a carga direta de  $\text{DBO}_{5,20}$  no esgoto doméstico relativa à população rural ( $\text{t} \text{ DBO}_{5,20} \cdot \text{d}^{-1}$ ) (equação 08) e Lt a extensão total dos cursos d'água (m).

Na tabela 6 são apresentados os valores das cargas diretas incrementais de  $\text{DBO}_{5,20}$  relativas às populações rurais contidas na área de contribuição de cada seção de controle, conforme o horizonte de análise.

Tabela 6 - Valores da carga direta incremental de  $\text{DBO}_{5,20}$  relativos à população rural

Seções de controle	Carga direta incremental ( $\text{g} \text{ DBO}_{5,20} \cdot \text{d}^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$ )		
	2014	2020	2030
Seção A	1,32	1,43	1,65
Seção B	7,61	8,12	9,07
Seção C	7,93	8,44	9,40

### Cenários considerados para a simulação da qualidade das águas

Para a composição de diferentes cenários de simulação foram consideradas duas condições de autodepuração:

a) Condição 01: ausência da oxidação da matéria orgânica, sem abatimento dos compostos orgânicos dispostos nos corpos d'água, reproduzindo-se a perspectiva assumida por Calmon et al. (2014); e

b) Condição 02: presença da oxidação da matéria orgânica, ocorrendo redução de cargas orgânicas despejadas nos cursos d'água. Para a primeira condição,  $K_d$  foi considerado nulo e, para a segunda,  $K_d$  foi estimado por meio da equação (08).

Dessa forma, foram considerados, para cada um dos três panoramas de tratamento de esgoto, 06 (seis) cenários de simulação da qualidade da água, conformados a partir de duas condições de abatimento de cargas orgânicas e três horizontes de análise. O quadro 1 apresenta a matriz que sumariza os cenários analisados, por panorama de tratamento de esgoto e perspectiva de crescimento populacional.

Quadro 1 - Cenários de simulação associados às perspectivas de crescimento populacional e abatimento da carga orgânica

Panoramas	Condições de abatimento de carga orgânica	Horizontes		
		2014	2020	2030
Panoramas 1, 2 e 3	Condição 01 Autodepuração nula ( $K_d$ nulo)	Cenário 1	Cenário 2	Cenário 3
	Condição 02 Autodepuração estimada ( $K_d$ estimado)	Cenário 4	Cenário 5	Cenário 6

É importante ressaltar que as duas condições de análise foram estabelecidas para que fosse possível analisar a influência do processo de autodepuração no abatimento de parcela da carga orgânica disposta nos cursos d'água e, conseqüentemente, na perspectiva de enquadramento dos corpos d'água estudados.

#### **Etapas 4 - Análise da frequência de atendimento dos padrões de qualidade relativos ao parâmetro DBO<sub>5,20</sub> por classe de enquadramento e cenário de simulação assumido**

Para a análise da frequência de atendimento dos padrões de qualidade relativos ao parâmetro DBO<sub>5,20</sub>, por classe de enquadramento e cenário de simulação assumido, foram determinadas, nas seções de controle, as cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> (atividade detalhada na Etapa 2), as cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub> e as curvas de permanência de qualidade para o parâmetro DBO<sub>5,20</sub>. As duas últimas atividades foram conduzidas conforme procedimentos apresentados nos itens subsequentes.

#### **Determinação das cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub>**

As cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub> foram calculadas, para cada seção de controle, com auxílio da equação (17) e dos perfis de concentração de DBO<sub>5,20</sub> simulados com emprego do modelo de qualidade de água. Essas cargas correspondem às cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub>, após abatimento, pelo processo de autodepuração, das cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> despejadas nos cursos d'água da bacia rio Pardo.

$$C_{re(DBO_{5,20})} = Q_{sc} \cdot C_{sc(DBO_{5,20})} \cdot 0,0864 \quad (17)$$

Na equação (17), corresponde a carga remanescente de DBO<sub>5,20</sub> na seção de controle ( $t \text{ DBO}_{5,20} \cdot d^{-1}$ ), a vazão média de esgotos domésticos simulada na seção de controle ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) e  $C_{sc(DBO_{5,20})}$  a concentração de DBO<sub>5,20</sub> simulada para a seção de controle com auxílio do modelo de qualidade de água ( $mg \cdot L^{-1}$ ).

#### **Determinação das curvas de permanência de qualidade para o parâmetro DBO<sub>5,20</sub>**

As curvas de permanência de qualidade para o parâmetro DBO<sub>5,20</sub> da bacia hidrográfica do rio Pardo foram estabelecidas, para cada seção de controle, por meio do produto das vazões das curvas de permanência de vazões regionalizadas pelas concentrações de DBO<sub>5,20</sub> referentes aos padrões ambientais estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005 (BRASIL, 2005) para rios Classes 1, 2 e 3 (3, 5 e 10  $mg \cdot L^{-1}$ , respectivamente) (equação 18). As curvas resultantes correspondem às cargas máximas admissíveis de DBO<sub>5,20</sub> nas seções analisadas para que os padrões ambientais não sejam excedidos. Cabe observar que o parâmetro DBO<sub>5,20</sub> foi escolhido pela sua estreita relação com aportes de esgotos sanitários e com teores de oxigênio dissolvido em corpos receptores e pelo fato de ser o parâmetro mais utilizado por órgãos de controle ambiental na implementação e aplicação de instrumentos de gestão de recursos hídricos.

$$C_{ad(DBO_{5,20})} = Q_{CPV} \cdot C_{pad(DBO_{5,20})} \cdot 0,0864 \quad (18)$$

Na equação (18),  $C_{ad(DBO_{5,20})}$  representa a carga máxima admissível de DBO<sub>5,20</sub> na seção de controle ( $t \text{ DBO}_{5,20} \cdot d^{-1}$ ),  $Q_{CPV}$  as vazões da curva de permanência de vazões relativa à seção de controle ( $m^3 \cdot s^{-1}$ ) e  $C_{pad(DBO_{5,20})}$  a concentração de DBO<sub>5,20</sub> referente aos padrões ambientais estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 357/2005 para rios Classes 1, 2 e 3 (3, 5 e 10  $mg \cdot L^{-1}$ , respectivamente).

Após a determinação das cargas totais e das cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub> e das curvas de permanência de qualidade, foi possível analisar a frequência de atendimento dos padrões de qualidade relativos ao parâmetro de DBO<sub>5,20</sub> em função das diferentes classes de enquadramento nas seções de controle estudadas. Essa frequência de atendimento foi obtida a partir do cruzamento das cargas totais DBO<sub>5,20</sub> (relativas à condição 1, na qual a autodepuração não é considerada) e das cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub> (associadas à condição 2, na qual a autodepuração é considerada) com as curvas de permanência de qualidade para o parâmetro DBO<sub>5,20</sub>, estabelecidas para bacia do rio Pardo.

## **DISCUSSÃO E RESULTADOS**

### **Cargas totais de DBO<sub>5,20</sub>**

Nas tabelas 7, 8 e 9 são apresentadas as cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> produzidas em cada distrito contido na bacia hidrográfica do rio Pardo, tanto de origem direta (sem tratamento) quanto oriundas dos efluentes dos esgotos domésticos, assumindo-se a seção C como a seção de controle e sem considerar os possíveis abatimentos da carga orgânica pelo processo de autodepuração, para os diferentes panoramas de tratamento estabelecidos e horizontes temporais de análise (2014, 2020 e 2030).

A partir da inspeção dos dados reunidos nas tabelas 07, 08 e 09, foi possível a determinação dos percentuais relativos às cargas produzidas em cada distrito. Para o panorama associado à atual condição de tratamento de esgotos (panorama 1), no ano de 2014, os percentuais relativos aos distritos de Ibatiba, Iúna e Irupi (maiores contribuintes para a carga de DBO<sub>5,20</sub>) foram, respectivamente, 42,2, 32,9 e 16,2% de toda carga gerada na região de estudo (2,38 t DBO<sub>5,20</sub> · d<sup>-1</sup>).

### **Capacidade de autodepuração dos cursos d'água da bacia do Rio Pardo**

Na tabela 10 são apresentados valores de concentração de DBO<sub>5,20</sub> nas seções de controle estudadas, considerando-se os cenários associados à condição que contempla o processo de autodepuração.

Os perfis de concentração de DBO<sub>5,20</sub>, referentes a seção C e associados aos panoramas 1, 2 e 3, para o horizonte 2014, são apresentados por meio da figura 4. Foram produzidos perfis semelhantes para as demais seções de controle e horizontes de tempo avaliados.



**Tabela 7 – Cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> produzidas por distrito, relativas à área de contração da seção de controle C, considerando o panorama 1 nos horizontes de tempo propostos**

Distrito	Município	População (hab)						Cargas produzidas (t DBO <sub>5,20</sub> .d <sup>-1</sup> )								
		2014		2020		2030		2014			2020			2030		
		Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	CDr	CTu	Total	CDr	CTu	Total	CDr	CTu	Total
Ibatiba	Ibatiba	8.272	14.216	9.062	15.572	10.547	18.125	0,344	0,660	1,004	0,377	0,723	1,100	0,439	0,841	1,280
Irupi	Irupi	5.681	4.031	6.121	4.343	6.931	4.918	0,236	0,148	0,385	0,255	0,160	0,414	0,288	0,181	0,469
Iúna	Iúna	3.880	13.772	3.988	14.156	4.175	14.821	0,143	0,639	0,782	0,147	0,657	0,804	0,154	0,688	0,841
N. S <sup>a</sup> das Graças	Iúna	1.719	557	1.767	573	1.850	600	0,063	0,020	0,084	0,065	0,021	0,086	0,068	0,022	0,090
Santíssima Trindade	Iúna	2.300	280	2.364	288	2.475	301	0,085	0,010	0,095	0,087	0,011	0,098	0,091	0,011	0,102
São Pedro	M. Freire	128	0	123	0	115	0	0,005	0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	0,004	0,000	0,004
Itaici	M. Freire	64	0	62	0	58	0	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002
Lajinha	Lajinha	628	0	629	0	632	0	0,023	0,000	0,023	0,023	0,000	0,023	0,023	0,000	0,023
<b>TOTAL</b>		<b>22.672</b>	<b>32.856</b>	<b>24.116</b>	<b>34.932</b>	<b>26.783</b>	<b>38.765</b>	<b>0,90</b>	<b>1,48</b>	<b>2,38</b>	<b>0,96</b>	<b>1,57</b>	<b>2,53</b>	<b>1,07</b>	<b>1,74</b>	<b>2,81</b>

Notas: CDr: carga direta de DBO<sub>5,20</sub> referente ao esgoto doméstico da população rural; CTu: carga de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico tratado, relativa à população urbana.

**Tabela 8 – Cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> produzidas por distrito, relativas à área de contração da seção de controle C, considerando o panorama 2 nos horizontes de tempo propostos**

Distrito	Município	População (hab)						Cargas produzidas (t DBO <sub>5,20</sub> .d <sup>-1</sup> )								
		2014		2020		2030		2014			2020			2030		
		Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	CDr	CTu	Total	CDr	CTu	Total	CDr	CTu	Total
Ibatiba	Ibatiba	8.272	14.216	9.062	15.572	10.547	18.125	0,344	0,198	0,542	0,377	0,217	0,594	0,439	0,252	0,691
Irupi	Irupi	5.681	4.031	6.121	4.343	6.931	4.918	0,236	0,045	0,281	0,255	0,048	0,303	0,288	0,054	0,343
Iúna	Iúna	3.880	13.772	3.988	14.156	4.175	14.821	0,143	0,192	0,334	0,147	0,197	0,344	0,154	0,206	0,360
N. S <sup>a</sup> das Graças	Iúna	1.719	557	1.767	573	1.850	600	0,063	0,006	0,069	0,065	0,006	0,071	0,068	0,007	0,075
Santíssima Trindade	Iúna	2.300	280	2.364	288	2.475	301	0,085	0,003	0,088	0,087	0,003	0,090	0,091	0,003	0,094
São Pedro	M. Freire	128	0	123	0	115	0	0,005	0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	0,004	0,000	0,004
Itaici	M. Freire	64	0	62	0	58	0	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002
Lajinha	Lajinha	628	0	629	0	632	0	0,023	0,000	0,023	0,023	0,000	0,023	0,023	0,000	0,023
<b>TOTAL</b>		<b>22.672</b>	<b>32.856</b>	<b>24.116</b>	<b>34.932</b>	<b>26.783</b>	<b>38.765</b>	<b>0,90</b>	<b>0,44</b>	<b>1,34</b>	<b>0,96</b>	<b>0,47</b>	<b>1,43</b>	<b>1,07</b>	<b>0,52</b>	<b>1,59</b>

Notas: CDr: carga direta de DBO<sub>5,20</sub> referente ao esgoto doméstico da população rural; CTu: carga de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico tratado, relativa à população urbana.

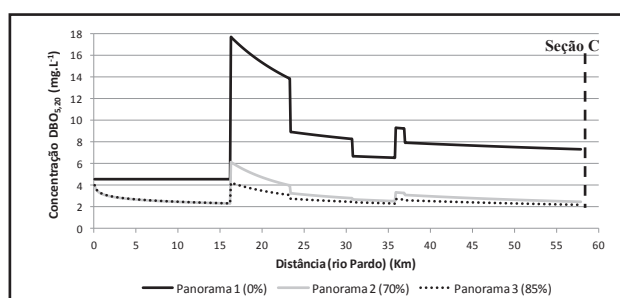
**Tabela 9 – Cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> produzidas por distrito, relativas à área de contração da seção de controle C, considerando o panorama 3 nos horizontes de tempo propostos**

Distrito	Município	População (hab)						Cargas produzidas (t DBO <sub>5,20</sub> .d <sup>-1</sup> )								
		2014		2020		2030		2014			2020			2030		
		Rural	Urbana	Rural	Urbana	Rural	Urbana	CDr	CTu	Total	CDr	CTu	Total	CDr	CTu	Total
Ibatiba	Ibatiba	8.272	14.216	9.062	15.572	10.547	18.125	0,344	0,099	0,443	0,377	0,108	0,485	0,439	0,126	0,565
Irupi	Irupi	5.681	4.031	6.121	4.343	6.931	4.918	0,236	0,022	0,259	0,255	0,024	0,279	0,288	0,027	0,315
Iúna	Iúna	3.880	13.772	3.988	14.156	4.175	14.821	0,143	0,096	0,239	0,147	0,099	0,245	0,154	0,103	0,257
N. S <sup>a</sup> das Graças	Iúna	1.719	557	1.767	573	1.850	600	0,063	0,003	0,066	0,065	0,003	0,068	0,068	0,003	0,071
Santíssima Trindade	Iúna	2.300	280	2.364	288	2.475	301	0,085	0,002	0,086	0,087	0,002	0,089	0,091	0,002	0,093
São Pedro	M. Freire	128	0	123	0	115	0	0,005	0,000	0,005	0,005	0,000	0,005	0,004	0,000	0,004
Itaici	M. Freire	64	0	62	0	58	0	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002	0,002	0,000	0,002
Lajinha	Lajinha	628	0	629	0	632	0	0,023	0,000	0,023	0,023	0,000	0,023	0,023	0,000	0,023
<b>TOTAL</b>		<b>22.672</b>	<b>32.856</b>	<b>24.116</b>	<b>34.932</b>	<b>26.783</b>	<b>38.765</b>	<b>0,90</b>	<b>0,22</b>	<b>1,12</b>	<b>0,96</b>	<b>0,24</b>	<b>1,20</b>	<b>1,07</b>	<b>0,26</b>	<b>1,33</b>

Notas: CDr: carga direta de DBO<sub>5,20</sub> referente ao esgoto doméstico da população rural; CTu: carga de DBO<sub>5,20</sub> no esgoto doméstico tratado, relativa à população urbana.

**Tabela 10 - Valores de concentração de  $DBO_{5,20}$  simulados para as seções de controle estudadas, considerando o processo de autodepuração**

Seção de controle	Panorama	Concentração $DBO_{5,20}$ (mg.L <sup>-1</sup> )		
		2014	2020	2030
Seção A	Panorama 1 (0%)	9,10	9,86	11,27
	Panorama 2 (70%)	3,54	3,78	4,22
	Panorama 3 (85%)	2,35	2,47	2,71
Seção B	Panorama 1 (0%)	5,28	5,52	5,95
	Panorama 2 (70%)	3,00	3,12	3,35
	Panorama 3 (85%)	2,51	2,61	2,79
Seção C	Panorama 1 (0%)	3,82	3,98	4,29
	Panorama 2 (70%)	2,46	2,56	2,74
	Panorama 3 (85%)	2,17	2,25	2,41



**Figura 4 – Perfis de concentração de  $DBO_{5,20}$  simulados para o rio Pardo - resultados associados à seção de controle C, ano de 2014**

A partir da inspeção da tabela 10, da figura 4 (e suas similares associadas aos demais horizontes de análise e seções de controle), apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

- A concentração crítica de  $DBO_{5,20}$  em todas as simulações da qualidade da água do rio Pardo apresentou-se associada ao lançamento do esgoto urbano do distrito mais populoso da bacia do rio Pardo (Ibatiba, 16,3 Km à jusante da nascente do rio Pardo). A maior concentração estimada com auxílio do modelo de qualidade de água para as diferentes seções de controle foi de 19,1 mg.L<sup>-1</sup>, referente à seção de controle C, panorama 3 e ano de 2030. O ribeirão São José apresentou-se como um importante tributário do rio Pardo, induzindo diluição do esgoto doméstico produzido, principalmente, pela população urbana de Ibatiba. Este efeito de diluição foi particularmente mais relevante quando se considerou o panorama 1 (disposição de esgoto bruto), situação na qual observou-se redução de aproximadamente 31% na concentração de  $DBO_{5,20}$  no rio Pardo.
- Apesar do distrito de Irupi estar entre os três distritos que mais contribuem para a geração de carga de  $DBO_{5,20}$  na bacia do rio Pardo, o esgoto produzido pela população desse distrito não produziu aumento da concentração de  $DBO_{5,20}$  no rio Pardo em nenhum dos panoramas ou horizontes de tempo avaliados. É relevante observar que a concentração de  $DBO_{5,20}$  no esgoto do distrito de Irupi é reduzida ao longo do tributário rio Pardinho, por meio de autodepuração, até a sua confluência com o rio Pardo, seção na qual

os valores de  $DBO_{5,20}$  não se apresentaram superiores a 3,2 mg.L<sup>-1</sup> nas simulações realizadas.

- No rio Pardo, decaimentos menos expressivos da concentração de  $DBO_{5,20}$  (abatimentos de 22,2%, 14,6% e 10,9% para os panoramas 1, 2 e 3, respectivamente) ocorreram no trecho entre a seção de afluência do rio Pardinho e o ponto de lançamento de esgoto urbano do distrito de Iúna (lançamento localizado no quilômetro 35,9 do rio Pardo). Na seção de lançamento do esgoto do distrito de Iúna estimou-se aumento na concentração de  $DBO_{5,20}$  no rio Pardo que, quando da disposição de efluentes brutos (panorama 1), assumiu valor médio de 6,8 mg.L<sup>-1</sup> para os horizontes de tempo analisados. Para os panoramas de tratamento 2 e 3, a concentração de  $DBO_{5,20}$  não apresentou valores estimados superiores a 3,7 mg.L<sup>-1</sup>.
- Os lançamentos de esgotos produzidos pelas populações urbanas dos distritos de Nossa Senhora das Graças e Santíssima Trindade, distritos que menos contribuem para geração de carga de  $DBO_{5,20}$  urbana na bacia do rio Pardo, acarretaram pequeno incremento no valor da concentração de  $DBO_{5,20}$  no tributário ribeirão da Perdição, produzindo valores não superiores a 3,5 mg.L<sup>-1</sup>.

Os valores das cargas totais de  $DBO_{5,20}$  estimados para a bacia hidrográfica do rio Pardo (referentes à condição 1, na qual não se considera o processo de autodepuração), das cargas remanescentes de  $DBO_{5,20}$  obtidas a partir dos perfis de concentração de  $DBO_{5,20}$  (referentes à condição 2, com a incorporação do processo de autodepuração) e das cargas assimiladas de  $DBO_{5,20}$  devido ao processo de autodepuração, são apresentados, por panorama de tratamento e horizontes de análise, para as diferentes seções de controle, na tabela 11. Na tabela 12 são apresentadas, em termos percentuais, as reduções da carga total de  $DBO_{5,20}$  em decorrência do processo de autodepuração, considerando-se as diferentes seções de controle, panoramas e horizontes de análise.

A partir da simples inspeção das tabelas 11 e 12, observa-se que, independentemente dos trechos simulados, os valores da carga total de  $DBO_{5,20}$  apresentaram redução média superior a 35% (35,8%, 35,3% e 38,9% para as seções de controle A, B e C, respectivamente), mostrando a relevância do fenômeno de autodepuração em termos de abatimento dos compostos

**Tabela 11 - Valores das cargas de DBO<sub>5,20</sub> (totais, remanescentes e assimiladas) relacionados às seções de controle A, B e C, considerando os cenários de simulação propostos**

Panorama	Tipo de carga DBO <sub>5,20</sub>	Carga DBO <sub>5,20</sub> (t DBO.d <sup>-1</sup> )								
		SEÇÃO A			SEÇÃO B			SEÇÃO C		
		2014	2020	2030	2014	2020	2030	2014	2020	2030
Panorama1 (0%)	Cargas totais (Condição 1)	0,810	0,886	1,028	2,343	2,494	2,775	2,379	2,531	2,812
	Cargas remanescentes (Condição 2)	0,581	0,631	0,725	1,535	1,605	1,734	1,338	1,398	1,507
	Cargas assimiladas	0,229	0,255	0,304	0,808	0,889	1,041	1,041	1,134	1,305
Panorama 2 (70%)	Cargas totais (Condição 1)	0,348	0,380	0,440	1,308	1,395	1,555	1,345	1,432	1,592
	Cargas remanescentes (Condição 2)	0,226	0,242	0,271	0,872	0,908	0,976	0,862	0,898	0,962
	Cargas assimiladas	0,122	0,138	0,168	0,437	0,487	0,579	0,482	0,534	0,630
Panorama 3 (85%)	Cargas totais (Condição 1)	0,249	0,271	0,313	1,087	1,159	1,293	1,123	1,196	1,331
	Cargas remanescentes (Condição 2)	0,150	0,158	0,174	0,729	0,759	0,813	0,760	0,789	0,846
	Cargas assimiladas	0,099	0,113	0,139	0,357	0,400	0,480	0,363	0,407	0,485

Notas: Condição 1 – condição de disposição de efluentes que não se considera o processo autodepuração; Condição 2 – condição de disposição de efluentes que incorpora o processo de autodepuração.

**Tabela 12 - Percentuais de redução da carga total de DBO<sub>5,20</sub> nas seções de controle A, B e C, para os diferentes panoramas e horizontes de análise**

Panoramas	Percentual de redução da carga total de DBO <sub>5,20</sub> obtido por meio da incorporação da autodepuração								
	SEÇÃO A			SEÇÃO B			SEÇÃO C		
	2014	2020	2030	2014	2020	2030	2014	2020	2030
Panorama1 (0%)	28,3%	28,8%	29,5%	34,5%	35,6%	37,5%	43,8%	44,8%	46,4%
Panorama2 (70%)	35,1%	36,4%	38,3%	33,4%	34,9%	37,3%	35,9%	37,3%	39,6%
Panorama3 (85%)	39,9%	41,7%	44,4%	32,9%	34,5%	37,1%	32,3%	34,0%	36,5%

orgânicos eventualmente despejados nos corpos d'água.

### Frequência de atendimento dos padrões de qualidade relativos ao parâmetro de DBO<sub>5,20</sub>

As figuras 5 e 6, associadas respectivamente às condições 1 e 2 de abatimento de cargas orgânicas, apresentam as curvas de permanência de qualidade para a seção de controle C, considerando-se os diferentes panoramas de tratamento e as produções atuais de esgoto

A figura 5 apresenta, para a seção de controle C, os percentuais de permanência correspondentes à intercessão das curvas de permanência de qualidade para o parâmetro de DBO<sub>5,20</sub> (Classes 1, 2 e 3) com as retas correspondentes às cargas totais de DBO<sub>5,20</sub> (cargas totais obtidas sem os abatimentos decorrentes do processo de autodepuração e associadas aos diferentes panoramas de tratamento de esgotos).

A partir da análise das intercessões da reta de carga de DBO<sub>5,20</sub> produzida com a disposição de efluentes brutos (panorama 1) com as curvas de qualidade associadas às diferentes classes de uso, observou-se permanência de aproximadamente 73% na Classe 2. Observou-se, adicionalmente, que a referida reta não toca as curvas de qualidade correspondentes às Classes 1 e 3 no intervalo de análise de permanências (permanências variando entre 50% e 95%). Desta forma, foram observadas permanências inferior a 50% na Classe 1 e superior a 95% na Classe 3.

No caso dos panoramas de tratamento 2 e 3 (remoções

de DBO<sub>5,20</sub> de 70% e 85%, respectivamente), a seção de controle C apresentou permanências de aproximadamente 77% e 86% na Classe 1, respectivamente. Para as Classes 2 e 3, essas permanências foram superiores a 95% para os dois panoramas considerados de tratamento de esgotos.

Realizando-se análise similar das informações reunidas na figura 6, observa-se que, quando da disposição de efluentes brutos (panorama 1), a seção de controle C apresentou permanência aproximada de 77% para condições de qualidade da Classe 1. Para os demais panoramas de tratamento de esgotos, as curvas de permanência de qualidade não foram interceptadas pelas retas correspondentes às cargas remanescentes de DBO<sub>5,20</sub>. Dessa forma, para os diferentes panoramas de tratamento considerados, a inclusão dos efeitos do processo de autodepuração produziu permanências superiores a 95% nas Classes 1, 2 e 3.

Aplicando-se o mesmo princípio de análise para as demais seções de controle e cenários analisados foi elaborada a tabela 13, na qual estão apresentadas as probabilidades de compatibilidade com os padrões de qualidade relativos ao parâmetro de DBO<sub>5,20</sub> para diferentes classes de enquadramento estabelecidas pela Resolução CONAMA N° 357/2005. Para todos os casos, a tabela 13 apresenta, com destaque em negrito, a classe na qual cada seção de controle apresentou maior percentual de permanência. Quando diferentes classes apresentam mesmo percentual de permanência, foi destacada a classe de uso mais nobre. Nas situações em que os percentuais de permanência apresentaram-se fora do intervalo de análise, a permanência correspondente foi representada por “< 50%”

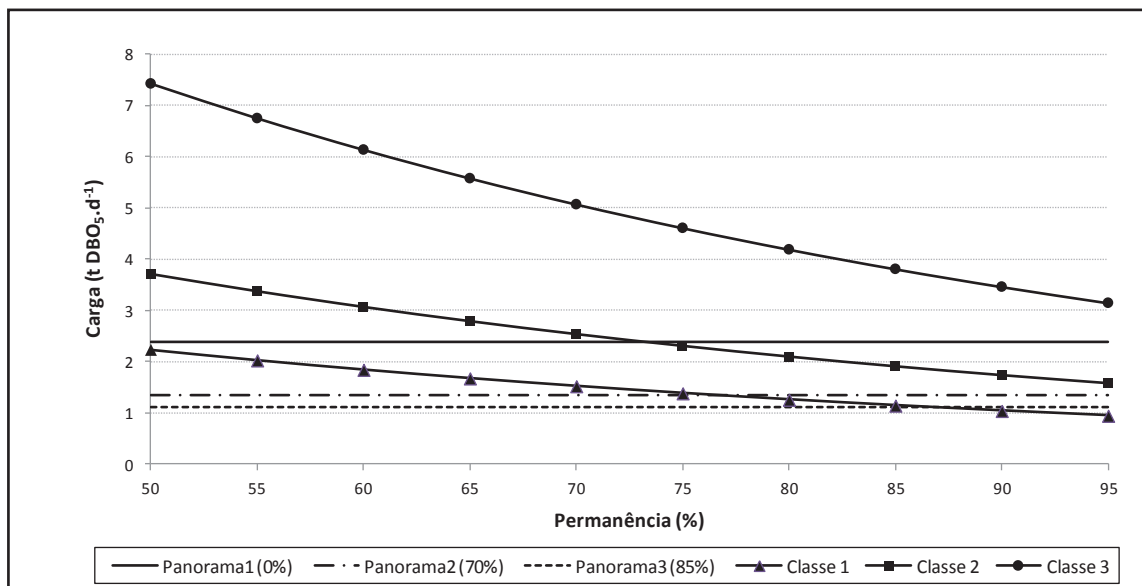


Figura 5 - Permanência nas classes de enquadramento da seção de controle C para o ano de 2014, sem consideração do processo de autodepuração (condição 1)

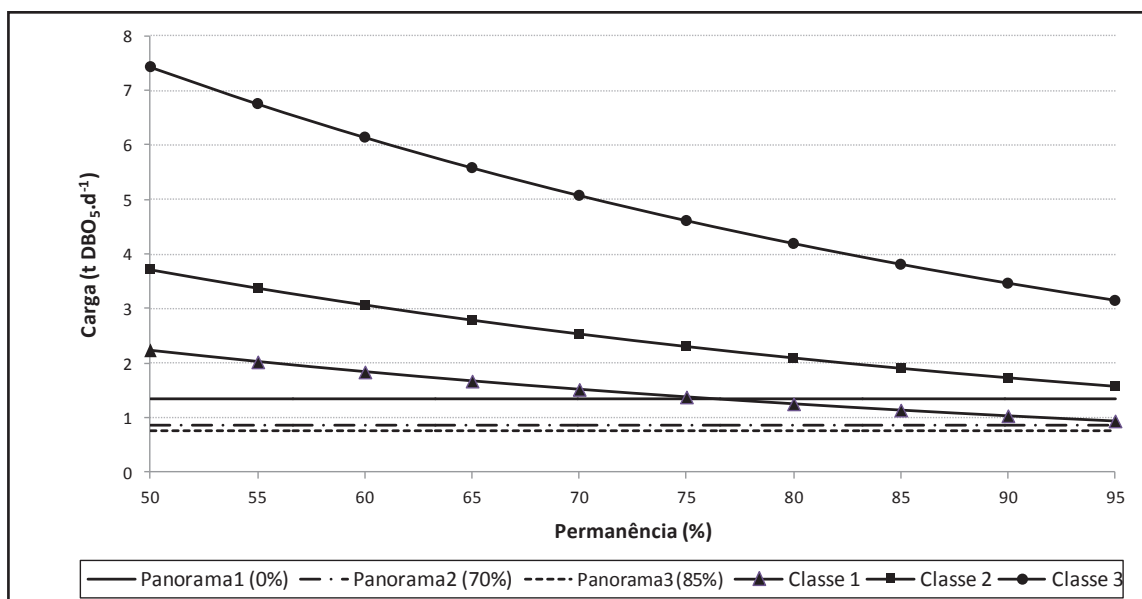


Figura 6 - Permanência nas classes de enquadramento da seção de controle C para o ano de 2014, considerando o processo de autodepuração (condição 2)

(para permanências inferiores a 50%) ou por “> 95%” (para permanências superiores a 95%).

A simples inspeção dos resultados reunidos na tabela 13 permite verificar que o rio Pardo, quando considerada a sua condição atual de ausência de serviços de tratamento de esgotos e sem a incorporação dos efeitos de autodepuração, apresentou, com maior frequência, condições de qualidade compatíveis com a Classe 3 em todas as seções de controle (permanências superiores a 95% na quase totalidade dos cenários analisados). Quando considerados os efeitos de autodepuração, a seção C apresentou maior compatibilidade com os padrões de qualidade estabelecidos para a Classe 2 (permanências superiores a 95%).

As seções A e B, por sua vez, mantiveram condições de qualidade compatíveis com os padrões associados à Classe 3.

Na condição de disposição de esgotos tratados com 70% de remoção da  $DBO_{5,20}$  (panorama 2), independentemente do horizonte analisado, a incorporação dos efeitos da autodepuração conduziu as permanências na Classe 1 superiores a 90% (valores médios de 94%, 92% e 95% nas seções de controle A, B e C, respectivamente).

Quando a eficiência na remoção de carga de  $DBO_{5,20}$  foi elevada para 85% (panorama 3), sem considerar os efeitos da autodepuração, o rio Pardo, nas seções de controle estudadas, para todos os horizontes de análise, excetuando-se a seção A,

Tabela 13 - Probabilidade de compatibilidade com as diferentes classes de enquadramento

Seção de Análise	Ano	Condição de abatimento de carga orgânica	Panorama 1 (%)			Panorama 2 (%)			Panorama 3 (%)		
			Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3	Classe 1	Classe 2	Classe 3
Seção A	2014	Condição 1	<50	61,04	>95	78,22	>95	>95	>95	>95	>95
		Condição 2	51,84	78,16	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95
	2020	Condição 1	<50	56,43	92,14	73,73	>95	>95	91,04	>95	>95
		Condição 2	<50	73,91	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95
	2030	Condição 1	<50	<50	84,44	66,2	92,52	>95	83,63	>95	>95
		Condição 2	<50	66,76	>95	91,06	>95	>95	>95	>95	>95
Seção B	2014	Condição 1	<50	69,6	>95	73,36	>95	>95	83,08	>95	>95
		Condição 2	64,99	91,74	>95	94,64	>95	>95	>95	>95	>95
	2020	Condição 1	<50	66,32	>95	70,01	>95	>95	79,7	>95	>95
		Condição 2	62,65	89,4	>95	92,48	>95	>95	>95	>95	>95
	2030	Condição 1	<50	60,75	>95	64,33	91,08	>95	73,97	>95	>95
		Condição 2	58,61	85,36	>95	88,73	>95	>95	>95	>95	>95
Seção C	2014	Condição 1	<50	73,4	>95	76,53	>95	>95	85,97	>95	>95
		Condição 2	76,78	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95
	2020	Condição 1	<50	70,15	>95	73,24	>95	>95	82,67	>95	>95
		Condição 2	74,5	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95	>95
	2030	Condição 1	<50	64,63	>95	67,66	94,44	>95	77,07	>95	>95
		Condição 2	70,55	>95	>95	94,06	>95	>95	>95	>95	>95

no ano de 2014, apresentou condições de qualidade compatíveis com o enquadramento na Classe 2. Considerados os efeitos de autodepuração, o rio Pardo, para todas as seções de controle e horizontes analisados, apresentou condições de qualidade compatíveis com o enquadramento na Classe 1. Essas perspectivas de enquadramento apresentaram permanências nas referidas classes de uso superiores a 95%.

## CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

A aplicação da metodologia permitiu estimativa das probabilidades de compatibilidade entre as condições de qualidade do rio Pardo, nas diferentes seções de controle consideradas, e os padrões ambientais

Verificou-se que a incorporação das capacidades de autodepuração dos rios da bacia hidrográfica do rio Pardo produziu significativos abatimentos de parcelas da carga orgânica em níveis que influenciaram a frequência de atendimento de padrões de qualidade relativos ao parâmetro de  $DBO_{5,20}$ .

De maneira geral, a incorporação dos efeitos de autodepuração na avaliação diagnóstica e prognóstica em bacias hidrográficas pode influenciar significativamente as perspectivas de enquadramento de seus cursos d'água.

Adicionalmente, o estudo realizado na bacia do rio Pardo indicou que o emprego de curvas de permanência de qualidade pode constituir importante ferramenta de apoio a processos de enquadramento, uma vez que permite avaliar não apenas se o padrão de qualidade da classe foi atendido, mas com que permanência o padrão foi respeitado.

A visão não determinística oferecida pelas curvas de permanência pode, para qualquer curso d'água, facilitar o processo de tomada de decisão acerca do estabelecimento de metas progressivas para a efetivação do enquadramento, a partir da

definição de probabilidades mínimas de permanência desejadas. Além disso, a metodologia permite que os cenários de não conformidade com o padrão ambiental sejam considerados dentro dos horizontes de tempo definidos para cumprimento de metas intermediárias até a efetivação do enquadramento.

Consideram-se como recomendações para trabalhos futuro:

Incorporar, na metodologia estabelecida para a condução do presente trabalho, Análise de Incerteza à modelagem de qualidade de água;

Incorporar, na metodologia estabelecida para a condução do presente trabalho, avaliação das cargas de  $DBO_{5,20}$  a serem tratadas para o estabelecimento de classes de enquadramento.

## AGRADECIMENTO

À Companhia Espírito Santense de Saneamento pela disponibilização de informações utilizadas na condução do presente estudo.

## REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 9649* - projeto de Redes coletoras de esgoto sanitário. Rio de Janeiro, 1986.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. *NBR 14486* - sistemas enterrados para condução de esgoto sanitário. Projeto de redes coletoras com tubos de PVC. Rio de Janeiro, 2000.

ANDRADE, L. N. *Modelo de otimização multiobjetivo para outorga de diluição de efluentes e enquadramento de corpos d'água*. 2012. 157 f.

Tese (Doutorado em Engenharia Ambiental) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2012.

BABBAR-SEBENS, M.; KARTHIKEYAN, R. Consideration of sample size for estimating contaminant load reductions using load duration curves. *J. Hydrol.*, v. 372, n. 1-4, p. 118-123, June 2009.

BRASIL. Lei Nº 9.433, de 8 de janeiro de 1997. Institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos, regulamenta o inciso XIX do art. 21 da Constituição Federal, e altera o art. 1º da Lei Nº 8.001, de 13 de março de 1990, que modificou a Lei nº 7.990, de 28 de dezembro de 1989. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 9 jan. 1997.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. CONAMA - Conselho Nacional do Meio Ambiente., de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 18 mar. 2005.

BINOTTO, D. *Proposta de enquadramento para a bacia hidrográfica do Arroio Jacutinga, município de Ivorá-RS*. 2012. 133 f. Dissertação (Engenharia Civil e Ambiental) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2012.

BONTA, J. V.; CLELAND, B. Incorporating natural variability, uncertainty, and risk into water quality evaluations using duration curves. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 39, n. 6, p. 1481-1496, Dec. 2003.

BONTA, J. V.; DICK, W. A. Impact of coal surface mining and reclamation on surface water chemical concentrations and load rates in three Ohio watersheds. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 39, n. 4, p. 793-815, Aug. 2003.

BRITES, A. P. Z. *Enquadramento dos corpos de água através de metas progressivas: probabilidade de ocorrência e custos de despoluição hídrica*. 2010. 177 f. Tese (Doutorado) – Escola Politécnica, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2010.

BRITES, A. P. Z.; PORTO, M. F. do A.; FERNANDES, C. S. Proposta de uma ferramenta de auxílio para a aplicação do enquadramento dos corpos d'água. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17, 2007, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2007. CD-ROM.

BRITES, A. P. Z.; PORTO, M. F. do A.; FERNANDES, C. S. Enquadramento dos corpos d'água: uma nova visão. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 18, 2009, Campo Grande. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2009. CD-ROM.

CALÇAVARA, R. A. Uso de Sistemas de Informação Geográfica e Modelo Digital de Elevação para Obtenção de Variáveis

Morfométricas da Bacia Hidrográfica do Córrego São Vicente, Cachoeiro de Itapemirim (ES). *Rev. GEONORTE*, v. 2, n. 4, p. 1788-1800, 2012.

CALMON, A. P. S.; SOUZA, J. C.; REIS, J. A. T. dos; MENDONÇA, A. S. F. Subsídios para o enquadramento dos cursos de água da bacia hidrográfica do rio Itapemirim considerando aportes de esgotos sanitários. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 19, n. 1, p. 255-270, jan.-mar. 2014.

CLELAND, B. R. TMDL Development from the “Bottom Up” Part III: Duration Curves and Wet-Weather Assessments. In: NATIONAL TMDL SCIENCE AND POLICY CONFERENCE, 2003, Chicago. *Anais...* Chicago: Water Environment Federation, 2003.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C. Análise probabilística de ocorrência de incompatibilidade da qualidade da água com o enquadramento legal de sistemas aquáticos – estudo de caso do rio Pariquera-Açu (SP). *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 15, n. 4, p. 337-346, out./dez. 2010.

CUNHA, D. G. F.; CALIJURI, M. C.; MEDIONDO, E. M. Integração entre curvas de permanência de quantidade e qualidade da água como uma ferramenta para a gestão eficiente dos recursos hídricos. *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 17, n. 4, p. 369-376, out./dez. 2012.

EPA - United States Environmental Protection Agency. *Rates, Constants and Kinetics Formulations in Surface Water Quality Modeling*. Athens, 1985.

EPA - United States Environmental Protection Agency. *An Approach for Using Load Duration Curves in the Development of TMDLs*. Washington, DC, 2007a.

EPA - United States Environmental Protection Agency. *Fecal Coliform TMDL for Horseshoe Creek (WBID 1436)*. Atlanta, GA, 2007b.

EPA - United States Environmental Protection Agency. *Development of Duration-Curve Based Methods for Quantifying Variability and Change in Watershed Hydrology and Water Quality*. Cincinnati, OH, 2008.

ESRI - Environmental Systems Research Institute. *Help on line*. 2015. Disponível em: <<http://resources.arcgis.com/en/help/main/10.1>>. Acesso em: 13 fev. 2015.

FORMIGONI, Y.; BRITES, A. P. Z.; FERNANDES, C. S.; PORTO, M. F. do A. Análise Crítica da curva de Permanência de Qualidade da Água com Base em Dados Históricos. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 19., 2011, Maceió. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2011. CD-ROM.

GARCIA, S. G.; LOPARDO, N.; ANDREALI, C. V.;

- GONÇALVES, R. C. Instrumentos de Gestão de Recursos Hídricos no Saneamento Básico. In: PHILIPPI JR., A. (Ed.). *Gestão do Saneamento Básico - Abastecimento de Água e Esgotamento Sanitário*. Barueri, SP: Manole, 2012. cap. 16, p. 436-462.
- GASTALDINI, M. C. C.; OPPA, L. F. Análise de Alternativas de Enquadramento do Rio Vacacaí Mirim Utilizando Modelo Matemático de Qualidade da Água. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 16, n. 1, p. 17-27, jan./mar. 2011.
- GOMES, F. C.; SIMÕES, S. J. C. Simulação de Modelagem Qualitativa para Avaliação Preliminar da Qualidade da Água na Bacia do Ribeirão das Perdizes em Campos do Jordão/SP, como Subsídio ao Enquadramento. *RBRH: revista brasileira de recursos hídricos*, v. 19, n. 3, p. 309-326, jul./set. 2014.
- GUIMARAES, B. O. *Análise Probabilística de Incompatibilidade entre a Qualidade da Água de Rios do Estado do Espírito Santo e os Padrões de Enquadramento Legal*. 2013. 127 f. Dissertação (Mestrado de Engenharia de Saúde Pública e Desenvolvimento Sustentável) – Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2013.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. *Sinopse do Censo Demográfico 2010*. Rio de Janeiro, 2011.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística.. *Bases e referências – bases cartográficas – malhas digitais*. Rio de Janeiro, 2010. Disponível em: <<http://mapas.ibge.gov.br/bases-e-referenciais/bases-cartograficas/malhas-digitais>>. Acesso em: 23 maio 2014.
- JOHNSON, S. L.; WHITEAKER, T.; MAIDMENT, D. R. A Tool for Automated Load Duration Curve Creation. *J. Am. Water Resour. Assoc.*, v. 45, n. 3, p. 654-663, June 2009.
- JORDÃO, E. P.; PESSÔA C. A. *Tratamento de Esgotos Domésticos*. Rio de Janeiro, RJ: ABES, 2009.
- KIM, J.; ENGEL, B. A.; PARK, Y. S.; THELLER, L.; CHAUBEY, I.; KONG, D. S.; LIM, K. J. Development of Web-based Load Duration Curve system for analysis of total maximum daily load and water quality characteristics in a waterbody. *J. Environ. Manage.*, v. 97, p. 46-55, Apr. 2012.
- LABGIS. Núcleo de Geotecnologias da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. *Análise Espacial de Bacias Hidrográficas*. Rio de Janeiro, RJ, 2013.
- MACHADO, F. W.; SCHMIDT, F. A.; FERREIRA, T. do N.; FERNANDES, C. V. S.; PORTO, M. F. do A. Método Simplificado para Relacionar Concentração de DBO, Vazão e os Conceitos de Permanência e Risco. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., 2007, São Paulo. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2007. CD-ROM.
- MARIN, M. C. F. C.; SCUISSATO, C.; FERNANDES, C. V. S.; PORTO, M. F. do A. Proposta Preliminar de Reenquadramento dos Corpos D'água em Classes e Avaliação do seu Risco de não Atendimento: estudo de caso da bacia do Alto Iguaçu. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 17., São Paulo, 2007. *Anais...* Porto Alegre: ABRH, 2007. CD-ROM.
- MENDES, C. A. B.; CIRILO, J. A. *Geoprocessamento em recursos hídricos: princípios, integração e aplicação*. Porto Alegre, RS: ABRH, 2013.
- MILLER, C. R. *Analysis of flow-duration, sediment-rating curve method of computing sediment yield*. Denver, CO: United States Department of Interior, Bureau of Reclamation, 1951.
- NDEP - Nevada Division of Environmental Protection. *Load Duration Curve Methodology for Assessment and TMDL Development*. Carson City, NV, 2003.
- POPEL, H.J. *Aeration and gas transfer*. Delft: Delft University of Technology, 1979.
- SEARCY, J. K. *Flow-Duration Curves - Manual of Hydrology: Part 2. Low-Flow Techniques*. Washington, DC: United States Government Printing Office, 1959.
- TEODORO, A.; IDE, C. N.; RIBEIRO, M. L.; BROCH, A. O.; SILVA, J.B. da. Implementação do conceito Capacidade de Diluição de Efluentes no modelo de qualidade da água QUAL-UFMG: estudo de caso no Rio Taquarizinho (MS). *Eng. Sanit. Ambient.*, v. 18, n. 3, p. 275-288, July/Sept. 2013.
- THOMANN, R. V.; MUELLER, J. A. *Principles of surface water quality modeling and control*. New York: Harper & Row, 1987.
- TUCCI, C. E. M. *Modelos hidrológicos*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2005.
- TUCCI, C. E. M. *Regionalização de vazões*. Porto Alegre: Editora da UFRGS, 2002.
- VOGEL, R. M.; FENNESSEY, N. M. Flow duration curves II: a review of application in water resources planning. *Water Resour. Bul.*, v. 31, n. 6, p. 1029-1039, Dec. 1995.
- VON SPERLING, M. *Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2005.
- VON SPERLING, M. *Estudos e modelagem da qualidade da água de rios*. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG, 2007.

### Contribuição dos autores:

Ana Paula Santos Calmon: caracterização fisiográfica da área de estudo, estimativa das vazões dos cursos d'água, desenvolvimento e aplicação da metodologia, análise e discussão dos resultados.

Joseline Corrêa Souza: desenvolvimento da metodologia, análise e discussão dos resultados.

José Antonio Tosta dos Reis: desenvolvimento da metodologia, análise e discussão dos resultados.

Antônio Sérgio Ferreira Mendonça: desenvolvimento da metodologia, análise e discussão dos resultados.