
Seleção de eficiências de tratamento de esgotos a partir da manutenção de equidade entre sistemas de tratamento - uma abordagem para o gerenciamento de bacias hidrográficas

Selection of sewage treatment efficiencies to maintain equity between systems - an approach to watershed management

José Antonio Tosta dos Reis, Juliana Louzada Pereira Valory e Antonio Sérgio Ferreira Mendonça

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

jatreis@gmail.com; julianaplouzada@gmail.com.; anserfm@terra.com.br.

Recebido: 09/04/15 - Revisado: 27/05/15 - Aceito: 18/08/15

RESUMO

Os cursos d'água superficiais constituem, usualmente, o principal destino final dos esgotos tratados. Desta forma, o planejamento e projeto de sistemas de tratamento de efluentes devem considerar, obrigatoriamente, a capacidade de assimilação dos rios. No âmbito de bacias hidrográficas, a avaliação desta capacidade é geralmente complexa, tanto em função da existência de múltiplos lançamentos com diferentes cargas, como da variabilidade da capacidade de autodepuração dos diferentes corpos d'água. Neste contexto, o objetivo do presente trabalho é estudar o processo de seleção de eficiências para estações de tratamento de esgotos no âmbito de uma bacia hidrográfica a partir da aplicação combinada de técnica de otimização e de modelo matemático de qualidade de água, incorporando condição de equidade entre estações de tratamento de esgotos. O estudo foi conduzido a partir de possíveis cenários de disposição de efluentes na porção superior da bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória, curso d'água de domínio do estado do Espírito Santo responsável por grande parte do abastecimento de água da Região Metropolitana da Grande Vitória. Os resultados indicaram que a incorporação da equidade, nos moldes propostos, reduziu a variabilidade das cargas orgânicas associadas aos diferentes pontos de disposição final de efluentes, impondo maiores níveis de tratamento às estações que receberam as maiores cargas orgânicas.

Palavras Chave: Otimização. Modelagem de qualidade de água. Esgoto doméstico. Equidade.

ABSTRACT

Rivers are usually the destination of treated sewage. Thus, planning and designing wastewater treatment systems must take the water depuration capacity of the rivers into account. Within a watershed the evaluation of depuration capacities becomes more complex due to the multiple effluent discharges presenting different loads and the variability of different water body self-depuration capacities. In this context, the aim of this study is to define wastewater treatment plants efficiencies within a watershed, by combined application of an optimization technique and mathematical modeling of water quality, considering a restriction related to equity among wastewater treatment plants. The study was developed considering possible effluent disposal in the upper part of the Santa Maria da Vitória river watershed. This watercourse, located in the Espírito Santo state, Brazil, is one of the most important water sources for the Grande Vitória Metropolitan Region. The results indicate that the incorporation of equity reduces the variability associated with organic waste loads at different disposal points by requiring higher treatment levels for stations which receive larger organic loads.

Keywords: Optimization. Water quality mathematical modeling. Wastewater. Equity.

INTRODUÇÃO

A seleção de sistemas de tratamento de esgotos sanitários envolve a avaliação de diferentes aspectos ambientais, econômicos e sociais.

Do ponto de vista ambiental, a capacidade de suporte dos corpos d'água constitui aspecto central para o processo de seleção. Sempre que adequadamente considerada, a capacidade de assimilação de corpos d'água permite a seleção de plantas de tratamento mais simples (construtiva e operacionalmente) e economicamente mais acessíveis.

Dois outros relevantes aspectos devem ser considerados quando da seleção de sistemas de tratamento de esgotos: 10) ainda que no Brasil comece a ganhar forma o estabelecimento das parcerias entre poder público e iniciativa privada e a privatização de sistemas de esgotamento sanitário, a oferta dos serviços de saneamento constitui obrigação fundamental do poder público. Neste sentido, quaisquer economias geradas com a implantação ou operação dos sistemas de tratamento de esgotos pode permitir que outros serviços públicos tenham sua oferta ampliada ou melhorada em decorrência de eventuais remanejamentos de recursos; 20) pelo princípio do usuário-pagador, aqueles lançamentos que estabelecerem maior pressão sobre os recursos hídricos devem exigir maiores esforços de tratamento.

Neste contexto, o estabelecimento de metodologias que tenham como foco a avaliação sistêmica da bacia hidrográfica, considerando simultaneamente os atuais e futuros investimentos em sistemas de tratamento de esgotos, constitui importante ferramenta para a atuação dos órgãos gestores e, em particular, para os comitês de bacias hidrográficas, quando da elaboração e implementação de planos de bacia.

O emprego de modelos matemáticos de qualidade constitui abordagem usual para a simulação dos efeitos da disposição final de efluentes. Constituem exemplos de modelos matemáticos de qualidade de água como suporte às atividades de planejamento no âmbito de bacias hidrográficas os trabalhos de Albertin, Mauad e Daniel (2006), Gastaldine e Oppa (2011), Gomes e Simões (2014) e Salla et al. (2014).

As técnicas de otimização, por sua vez, constituem ferramentas tecnológicas que oferecem suporte às atividades de planejamento e aos processos decisórios relacionados com o gerenciamento de recursos hídricos. Os trabalhos de Machado, Kaviski e Porto (2012), Souza et al. (2002), Voutchkov e Boulos (1993) e Zhu e Reville (1988), ilustram o emprego de diferentes técnicas de otimização quando da avaliação da implementação de sistemas regionais de tratamento de esgotos.

Os trabalhos de Andrade, Mauri e Mendonça (2013), Aras, Togan e Berkun (2007), Burn e Yuliant (2001), Carvalho e Kaviski (2009), Cho e Lee (2014), Cho, Sung e Ha (2004), Sadatpour e Afshar (2007) e Yandamuri, Srinivasan e Bhallamudi (2006), por sua vez, utilizaram metodologia amparada no emprego combinado de modelos de otimização e de qualidade de água em processo de seleção de sistemas de tratamento de esgotos no âmbito de bacias hidrográficas. Os modelos de otimização propostos pelos referidos autores, a partir da combinação de diferentes funções objetivo e restrições, foram estabelecidos com a incorporação de aspectos como minimização dos custos

de tratamento, maximização das cargas lançadas, minimização do número de violações dos padrões de qualidade ambiental e/ou minimização da magnitude das violações. Adicionalmente, avaliaram a incorporação, nas funções objetivo, de um termo para a minimização da inequidade entre sistemas de tratamento de esgotos. É relevante observar, no entanto, que não existem, no arcabouço legal brasileiro voltado para regulação da qualidade dos corpos d'água superficiais, limites aceitáveis para o número de violação dos padrões de qualidade ambiental ou para a magnitude das violações destes padrões.

O trabalho proposto por Louzada, Reis e Mendonça (2013) buscou estabelecer, a partir de modelos de otimização definidos por diferentes grupos de restrições, os conjuntos de mínimas eficiências de tratamento de esgotos que, no âmbito de uma bacia, atenderiam aos padrões de qualidade de corpos d'água e efluentes definidos pela Resolução no 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) (BRASIL, 2005). O trabalho proposto por Louzada, Reis e Mendonça (2013), no entanto, não incorporou a perspectiva de equidade entre os diferentes sistemas de tratamento.

O principal objetivo deste trabalho é estudar o emprego combinado de uma técnica de otimização e um modelo de qualidade de água no processo de seleção de eficiências de remoção de matéria orgânica em sistemas de tratamento de esgotos sanitários no âmbito de uma bacia hidrográfica, incorporando uma função de equidade entre sistemas de tratamento como restrição do problema de otimização. A medida de equidade empregada está baseada na perspectiva de que sistemas de tratamento que recebem maiores cargas orgânicas deverão apresentar maiores eficiências de remoção de matéria orgânica. O processo de seleção proposto foi avaliado para diferentes condições de disposição de efluentes sanitários na porção superior da bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória, curso d'água de domínio do estado do Espírito Santo, responsável por significativa parcela do abastecimento de água para a Região Metropolitana da Grande Vitória.

MATERIAIS E MÉTODOS

Pressupostos fundamentais

A metodologia estabelecida no presente trabalho foi estabelecida a partir dos seguintes pressupostos:

1^o) No âmbito de uma bacia hidrográfica deverão ser selecionados os menores somatórios possíveis para os níveis de eficiência associados à remoção de Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO). Este pressuposto parte da perspectiva de que os sistemas de tratamento de esgotos que apresentarem menores níveis de remoção de DBO são aqueles que tenderão a também apresentarem os menores custos de implantação e operação;

2^o) Os padrões de qualidade ambiental referentes aos corpos d'água deverão ser atendidos em todo o sistema hídrico, constituindo restrições do modelo de otimização;

3^o) Não serão consideradas eficiências de remoção de DBO superiores a 90% (noventa por cento), ainda que determinadas plantas de tratamento de esgoto ofereçam eficiências

maiores de remoção de DBO quando do funcionamento em condições de máximas eficiências operacionais;

4º) Os diferentes sistemas de tratamento deverão manter uma relação de equidade entre si, relação que induzirá maiores níveis de tratamento de esgotos para os pontos de disposição final associados às maiores cargas de esgotos brutos. As inequidades entre sistemas de tratamento somente serão admitidas naquelas situações em que os limites mínimos ou máximos de eficiência forem superados (para menos ou para mais) em decorrência da aplicação do modelo de otimização.

5º) Admite-se a possibilidade de disposição final de efluentes brutos, ignorando-se o valor máximo para a DBO no esgoto tratado (120 mg.L^{-1}) e o valor mínimo para eficiência de remoção de DBO (60%) sugeridos pela Resolução CONAMA no 430 (BRASIL, 2011). Assume-se, desta forma, que toda a carga de DBO lançada poderia ser assimilada em decorrência da capacidade de autodepuração do curso d'água. Como a manutenção dos padrões de qualidade de água estabelecidos para rios constitui restrição do modelo de otimização (segundo pressuposto), a utilização da capacidade de autodepuração dos rios tende a reduzir os esforços de tratamento sem o comprometimento dos usos estabelecidos para o curso d'água.

Modelo de Otimização

O modelo de otimização empregado para a seleção de eficiências de tratamento de esgotos foi definido pelas equações de (01) e (06) e inequações de (02) a (05).

$$\text{Minimizar } f(E) = \sum_{i=1}^n E_i \quad (01)$$

Sujeito à:

$$E_i \geq 0 \quad (02)$$

$$E_i \leq 90\% \quad (03)$$

$$OD_{\text{Rio}} \geq 5 \text{ mg.L}^{-1} \quad (04)$$

$$DBO_{\text{Rio}} \leq 5 \text{ mg.L}^{-1} \quad (05)$$

$$\frac{\text{Carga}_{\text{Lançamento } i}}{E_i} = \frac{\text{Carga}_{\text{Lançamento } n}}{E_n}, \forall i \text{ e } \forall n \quad (06)$$

Nas expressões de (01) a (06):

E_i : eficiência de tratamento associada ao lançamento i ;

E_n : eficiência de tratamento associada ao lançamento n ;

OD_{Rio} : concentração de oxigênio dissolvido no curso d'água;

DBO_{Rio} : concentração de demanda bioquímica de oxigênio no curso d'água;

$\text{Carga}_{\text{Lançamento } i}$: carga orgânica do esgoto bruto associada ao lançamento i ;

$\text{Carga}_{\text{Lançamento } n}$: carga orgânica do esgoto bruto associada ao lançamento n ;

O modelo de otimização envolveu, adicionalmente, uma restrição de não negatividade associada à DBO do esgoto tratado ($DBO_{\text{Esgoto Tratado}} \geq 0$).

A equação (06) tem por objetivo garantir a equidade entre lançamentos. Seu emprego consubstancia a perspectiva de que a manutenção de equidades entre lançamentos exige que sistemas que recebem maiores cargas orgânicas de esgotos devem apresentar maiores eficiências de remoção de matéria orgânica nas suas plantas de tratamento.

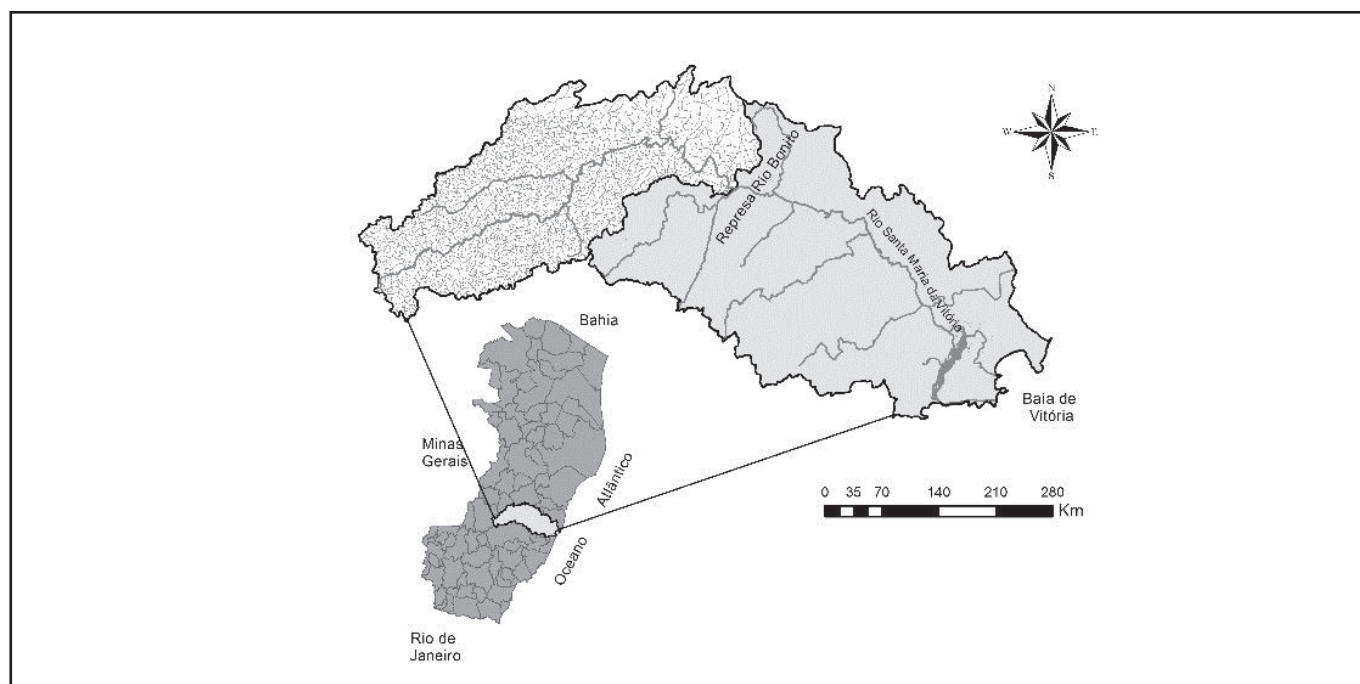


Figura 1 – Porção superior da bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória objeto do estudo demonstrativo
Fonte: Zamprogno (1999)

Os limites impostos pelas inequações (04) e (05) foram estabelecidos a partir dos padrões ambientais associados aos rios classe 2. O emprego do modelo de otimização estabelecido, quando empregado para rios enquadrados em outras classes de uso, exigirá a simples substituição do padrão de qualidade ambiental considerado para a conformação das referidas inequações.

Estudo de caso

Para a aplicação da metodologia proposta neste trabalho foi considerado um dos cenários de disposição de esgotos domésticos avaliados por Louzada, Reis e Mendonça (2013), quando do emprego combinado de técnica de otimização e modelo de qualidade de água para a seleção de eficiências de sistemas de tratamento de esgotos para a porção superior da bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória. Esta bacia constitui importante manancial para o abastecimento da Região Metropolitana da Grande Vitória, região que abrange Vitória (a capital do estado do Espírito Santo) e os municípios de Fundão, Serra, Cariacica, Viana, Vila Velha e Guarapari.

Foram considerados os primeiros quarenta e dois quilômetros do rio Santa Maria da Vitória. Neste trecho, limitado à jusante pelo reservatório de Rio Bonito, o rio Santa Maria da Vitória possui dois afluentes de maior expressão para o sistema hídrico: o rio Alto Possmoser (afluente no quilômetro 24 do rio Santa Maria da Vitória) e o rio São Luiz (afluente no quilômetro 36).

A figura 1 apresenta, em destaque, o trecho do rio Santa Maria da Vitória objeto deste estudo. A figura 2, por sua vez, apresenta um diagrama unifilar do sistema hídrico, incluindo as informações referentes aos rios Alto Possmoser e São Luiz.

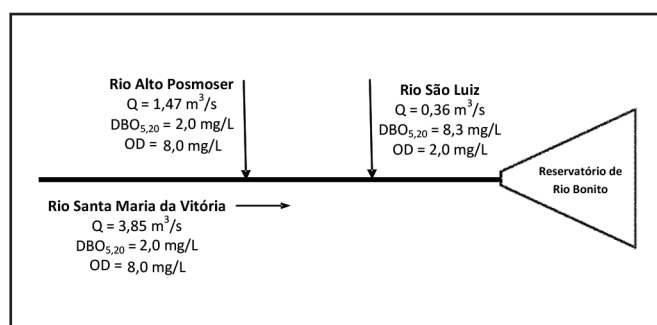


Figura 2 – Diagrama unifilar do sistema hídrico objeto do estudo

Assim como apresentado por Louzada, Reis e Mendonça (2013), as simulações de qualidade de água foram conduzidas com auxílio do modelo de qualidade de água Qual-UFMG (modelo detalhadamente apresentado e discutido por von Sperling (2007) e a técnica de otimização empregada foi a Programação Não Linear (PNL). Para aplicação da PNL foi utilizado o programa SOLVER, disponível pela planilha eletrônica Microsoft Excel. É relevante registrar, no entanto, que a metodologia proposta no presente estudo pode ser empregada por meio da combinação de outros modelos de qualidade de água e técnicas de otimização.

Dentre os diferentes cenários analisados por Louzada, Reis e Mendonça (2013), selecionou-se aquele no qual as cargas associadas aos pontos de disposição de esgoto doméstico

apresentavam maior variação ao longo da bacia hidrográfica. Considerou-se o cenário estabelecido a partir da disposição final de cinco efluentes, com vazões de 60 L.s⁻¹, 50 L.s⁻¹, 40 L.s⁻¹, 30 L.s⁻¹ e 20 L.s⁻¹, dispostos no rio Santa Maria da Vitória nos quilômetros 8, 16, 25, 32 e 40, respectivamente. Para todos os efluentes considerou-se que o esgoto bruto apresentava DBO_{5,20} de 350 mg.L⁻¹ e concentração nula de OD.

Para a avaliação dos efeitos da incorporação da equidade em diferentes condições de disposição final de efluentes, uma variação no cenário de disposição analisado por Louzada, Reis e Mendonça (2013) foi estabelecida com a inversão das vazões dos efluentes dispostos no curso d'água. Em novo grupo de simulações assumiu-se, do primeiro para o quinto lançamentos, vazões de 20 L.s⁻¹, 30 L.s⁻¹, 40 L.s⁻¹, 50 L.s⁻¹ e 60 L.s⁻¹, respectivamente.

As constantes cinéticas, informações hidrodinâmicas e de qualidade de água consideradas neste estudo foram baseadas em Mendonça e Almeida (2005) e Salim (2004), quando da análise de problema de disposição de efluentes domésticos no mesmo sistema hídrico. Conforme observa Louzada, Reis e Mendonça (2013), os referidos autores conduziram suas simulações de qualidade de água a partir de dados das campanhas de campo referentes ao “Diagnóstico e Plano Diretor das bacias dos rios Santa Maria da Vitória e Jucu”. As constantes cinéticas que regularam os processos de desoxigenação (K_1) e reaeração atmosférica (K_2) assumiram os valores 0,24 dia⁻¹ e 0,98 dia⁻¹, respectivamente. A concentração de saturação de oxigênio dissolvido, por sua vez, assumiu o valor de 8,00 mg.L⁻¹, estimado com emprego da expressão proposta por Pöpel (1979) a partir da altitude média (900 m) e temperatura média da água (21°C) da área de estudo.

É relevante registrar que a bacia hidrográfica do rio Santa Maria da Vitória não passou por um processo de enquadramento dos seus cursos d'água. Neste contexto, conforme estabelecido pela Resolução CONAMA n° 357 (BRASIL, 2005), todos os seus cursos d'água são considerados pertencentes à classe 2. Este aspecto estabeleceu as restrições incorporadas ao modelo de otimização por meio das inequações (04) e (05).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na tabela 1 estão apresentados os valores de carga orgânica dos esgotos brutos, carga orgânica nos esgotos tratados e as concentrações de DBO no esgoto tratado, obtidas a partir de simulação computacional na qual não se considerou equidade entre os sistemas de tratamento. As eficiências de tratamento de esgotos indicadas na referida tabela reproduzem àquelas obtidas por Louzada, Reis e Mendonça (2013).

A tabela 2, por sua vez, reúne as cargas orgânicas associadas aos esgotos brutos e esgotos tratados, as concentrações de DBO no esgoto tratado e o valor da variável equidade, valores obtidos por meio de simulação computacional na qual foi imposta a obrigatoriedade de equidade entre os sistemas de tratamento.

Nas figuras 3 e 4 são apresentados os perfis de OD e DBO, respectivamente, considerados três cenários de disposição de efluentes: a) lançamento de esgotos brutos, b) disposição final de efluentes tratados com a definição das eficiências de

Tabela 1 - Cargas orgânicas e concentrações de DBO no esgoto tratado, obtidas a partir de simulação computacional sem equidade entre os sistemas de tratamento de esgoto

Efluentes	Eficiências (%)	DBO Esgoto Tratado(mg.L ⁻¹)	Carga(kg.dia ⁻¹)	
			Esgoto Bruto	Esgoto Tratado
1	90	35	1814	181
2	90	35	1512	151
3	90	35	1210	121
4	5	335	907	867
5	0	350	605	605
Somatório	275		6048	1926

Tabela 2 - Cargas orgânicas e concentrações de DBO no esgoto tratado, obtidas a partir de simulação computacional com equidade entre os sistemas de tratamento de esgoto

Efluentes	Eficiências (%)	DBO Esgoto Tratado(mg.L ⁻¹)	Carga(kg.dia ⁻¹)		Equidade*
			Esgoto Bruto	Esgoto Tratado	
1	88	41	1814	210	20,52
2	74	92	1512	398	20,52
3	59	144	1210	497	20,52
4	44	195	907	506	20,52
5	30	247	605	427	20,52
Somatório	295	-	6048	2038	-

*Nota: valores de equidade expressos em kg/dia por unidade percentual de remoção de DBO

tratamento ignorando-se a equidade entre sistemas de tratamento de esgotos e c) disposição de efluentes tratados num nível de eficiência estabelecido após a incorporação da obrigatoriedade de equidade entre sistemas de tratamento esgotos.

A figura 5 permite a comparação das cargas orgânicas associadas à disposição de esgotos brutos, esgotos tratados em níveis de eficiência determinados sem a incorporação da equidade e em níveis de tratamento selecionados após a imposição de equidade entre sistemas de tratamento de esgotos. A figura 6, por sua vez, indica os níveis de tratamento estimados para os diferentes sistemas de tratamento com e sem a incorporação da condição de equidade entre os sistemas de tratamento de esgotos.

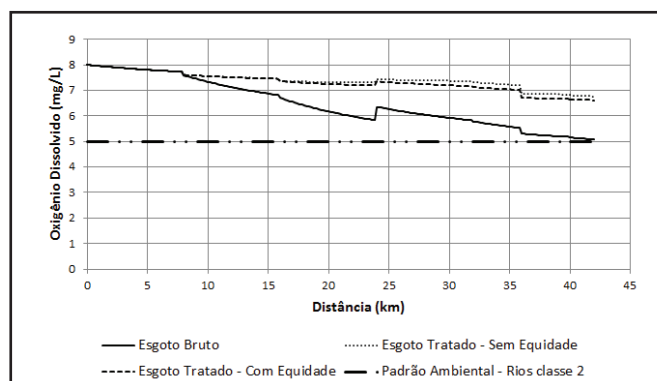


Figura 3 – Variação espacial das concentrações de OD para o trecho simulado, considerando-se a disposição de cargas orgânicas decrescentes

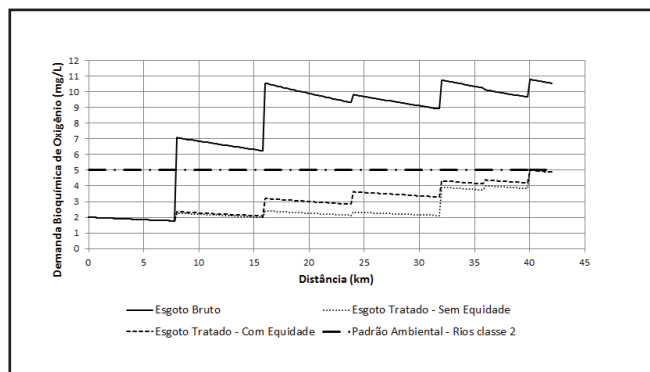


Figura 4 – Variação espacial das concentrações de DBO para o trecho simulado, considerando-se a disposição de cargas orgânicas decrescentes

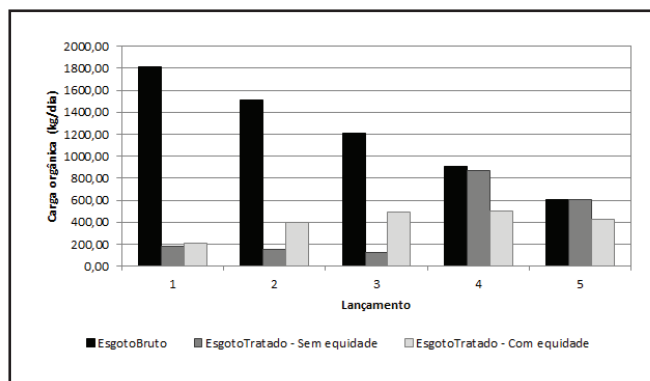


Figura 5 – Cargas orgânicas associadas aos diferentes pontos de disposição final considerando-se o lançamento de esgotos brutos, tratados sem equidade e tratados com equidade – Resultados associados à disposição de cargas orgânicas decrescentes

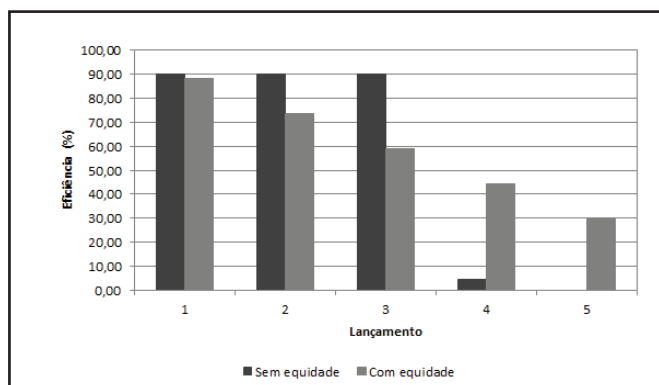


Figura 6 – Eficiências estimadas para os diferentes possíveis sistemas de tratamento com e sem incorporação da equidade – Resultados associados à disposição de cargas orgânicas decrescentes

A partir da inspeção dos resultados reunidos nas tabelas 1 e 2 e nas figuras de 1 a 4 apresentam-se como relevantes as seguintes considerações:

A disposição de esgotos brutos, conforme cenário de simulação assumido, produziu o decréscimo dos níveis de OD sem que o padrão de qualidade ambiental fosse superado. No entanto, as concentrações de DBO, para este cenário de simulação, apresentaram-se superiores ao correspondente ao padrão de qualidade ambiental já a partir do primeiro ponto de disposição de efluentes, assim se mantendo até o limite do trecho simulado;

Os níveis de tratamento, selecionados com ou sem a incorporação da equidade entre os sistemas de tratamento, permitiram os atendimentos dos padrões de qualidade ambiental;

A seleção dos níveis de tratamento sem a incorporação da equidade produziu a concentração dos esforços de tratamento de esgotos nos três primeiros pontos de disposição de efluentes. Nos dois últimos pontos de disposição de efluentes, para os quais se indicou a disposição de esgotos brutos ou submetidos a tratamento preliminar, seriam lançadas as maiores cargas orgânicas no rio Santa Maria da Vitória, ainda que estes pontos de disposição estejam associados às menores cargas orgânicas de esgotos brutos.

A incorporação da equidade aumentou o nível de tratamento no âmbito da bacia. O somatório das eficiências seria ampliado de 275% (Tabela 1) para 295% (Tabela 2). No entanto,

como nessas condições seriam reduzidos os níveis de tratamento nos primeiros pontos de disposição de esgotos (pontos nos quais estão as maiores vazões e, por consequência, as maiores cargas), em benefício da incorporação de sistemas de tratamento associados aos dois últimos pontos de disposição de efluentes, a carga orgânica total disposta na bacia foi ligeiramente aumentada, variando de 1926 kg.dia⁻¹ (Tabela 1) para 2038 kg.dia⁻¹ (Tabela 2). Este aspecto, no entanto, é fundamentalmente condicionado pela conformação das cargas de efluentes brutos existentes na bacia e pelos seus pontos de disposição no sistema hídrico.

A incorporação da equidade reduziu, de maneira significativa, a variação das cargas orgânicas associadas aos esgotos tratados e a variação dos níveis de tratamento de esgotos. Sem a equidade, as cargas orgânicas no esgoto tratado flutuaram entre 121 kg.dia⁻¹ (terceiro lançamento) e 867 kg.dia⁻¹ (quarto lançamento). Com a incorporação da equidade, as referidas cargas variaram entre 210 kg.dia⁻¹ (primeiro lançamento) e 506 kg.dia⁻¹ (quarto lançamento). As eficiências de tratamento, que variaram entre zero e 90% sem o emprego da equidade no modelo de otimização, passariam a variar entre 30% e 88%.

Os níveis de eficiência escolhidos com a incorporação da equidade decresceram na mesma proporção que as cargas de esgotos brutos associados a cada ponto de disposição de efluentes, em decorrência da função linear que, neste trabalho, estabeleceu a forma da variável equidade.

É relevante observar que a perspectiva de manutenção da equidade entre sistemas de tratamento, no modelo de otimização proposto, não seria necessariamente atendida com a imposição dos limites estabelecidos pela Resolução CONAMA n.º 430 (BRASIL, 2011), uma vez que a eficiência mínima de remoção ou a concentração máxima de DBO deveriam ser assumidas, independentemente da carga orgânica presente no efluente bruto.

A tabela 3 reúne as eficiências de tratamento de esgotos estabelecidas pelo modelo de otimização, quando da imposição de uma concentração de DBO de 120 mg.L⁻¹. A tabela 4, por sua vez, apresenta as referidas eficiências, quando da imposição de uma eficiência mínima de 60% para a remoção da matéria orgânica. Ainda que a equidade não tenha sido considerada no processo de seleção das eficiências, o seu valor, apropriado com auxílio da expressão (06), é também apresentado nas tabelas 3 e 4.

Os resultados reunidos nas tabelas 3 e 4, similares àqueles obtidos por Louzada, Reis e Mendonça (2013), permitem observar que a imposição dos limites estabelecidos pela

Tabela 3 - Cargas orgânicas e concentrações de DBO no esgoto tratado, obtidas a partir de simulação computacional com imposição de uma DBO_{5,20} máxima no efluente tratado de 120 mg.L⁻¹

Efluentes	Eficiências (%)	DBO Esgoto Tratado(mg.L ⁻¹)	Carga(kg.dia ⁻¹)		Equidade*
			Esgoto Bruto	Esgoto Tratado	
1	66	120	1814	622	27,61
2	66	120	1512	518	23,01
3	66	120	1210	415	18,41
4	66	120	907	311	13,81
5	66	120	605	207	9,20
Somatório	330		6048	2074	

*Nota: valores de equidade expressos em kg/dia por unidade percentual de remoção de DBO

Tabela 4 - Cargas orgânicas e concentrações de DBO no esgoto tratado, obtidas a partir de simulação computacional com imposição de uma eficiência mínima de 60% para a remoção da matéria orgânica

Efluentes	Eficiências (%)	DBO Esgoto Tratado(mg.L ⁻¹)	Carga(kg.dia ⁻¹)		Equidade*
			Esgoto Bruto	Esgoto Tratado	
1	75	94	1814	486	24,78
2	60	140	1512	605	25,20
3	60	140	1210	484	20,16
4	60	140	907	363	15,12
5	60	140	605	242	10,08
Somatório	315		6048	2179	

*Nota: valores de equidade expressos em kg/dia por unidade percentual de remoção de DBO.

Resolução CONAMA n° 430 (BRASIL, 2011) conduzem a maiores somatórios de eficiências de tratamento no âmbito da bacia que aqueles estimados com auxílio do modelo otimização, considerando-se ou não a equidade no processo de seleção de eficiência. Adicionalmente indicam, pela variabilidade dos valores associados a variável equidade, que não existe, nestas condições, relação entre cargas orgânicas afluentes aos sistemas de tratamento de esgotos e os níveis de eficiência estimados com auxílio do modelo de otimização. É relevante observar que a imposição de padrões de qualidade para efluentes, nos modelos propostos pela referida Resolução, pode produzir aumentos nos investimentos associados às plantas de tratamento de esgotos, sem benefícios ambientais tangíveis para a bacia como um todo.

As tabelas 5 e 6 apresentam os valores de carga orgânica dos esgotos brutos, carga orgânica nos esgotos tratados e as concentrações de DBO no esgoto tratado para o mesmo siste-

ma hídrico, considerada a inversão dos valores de carga entre os diferentes pontos de disposição de efluentes. Neste caso, as cargas orgânicas de esgotos brutos cresceriam de montante para jusante. Os valores das referidas variáveis, com a perspectiva de manutenção da equidade, estão apresentadas na tabela 06.

As figuras 7 e 8 apresentam, respectivamente, os perfis de OD e DBO que seriam obtidos para esta nova condição de disposição de efluentes. A figura 9, por sua vez, permite a confrontação das cargas orgânicas associadas à disposição de esgotos brutos, esgotos tratados nos níveis de eficiência determinados sem a incorporação da equidade e nos níveis de tratamento selecionados após a imposição de equidade entre sistemas de tratamento de esgotos. Já a figura 10 reúne os níveis de tratamento estimados com e sem a imposição da condição de equidade entre os sistemas de tratamento de esgotos.

Tabela 5 - Cargas orgânicas e concentrações de DBO no esgoto tratado, obtidas a partir de simulação computacional sem a equidade entre os sistemas de tratamento de esgoto

Efluentes	Eficiências (%)	DBO Esgoto Tratado(mg.L ⁻¹)	Carga(kg.dia ⁻¹)	
			Esgoto Bruto	Esgoto Tratado
1	6	328	605	566
2	25	261	907	678
3	50	174	1210	602
4	86	50	1512	214
5	90	35	1814	181
Somatório	258		6048	2241

Tabela 6 - Cargas orgânicas e concentrações de DBO no esgoto tratado, obtidas a partir de simulação computacional com equidade entre os sistemas de tratamento de esgoto

Efluentes	Eficiências (%)	DBO Esgoto Tratado(mg.L ⁻¹)	Carga(kg.dia ⁻¹)		Equidade*
			Esgoto Bruto	Esgoto Tratado	
1	29	250	605	432	21,13
2	43	200	907	518	21,13
3	57	150	1210	517	21,13
4	72	100	1512	430	21,13
5	86	49	1814	256	21,13
Somatório	288		6048	2125	

Nota: valores de equidade expressos em kg/dia por unidade percentual de remoção de DBO

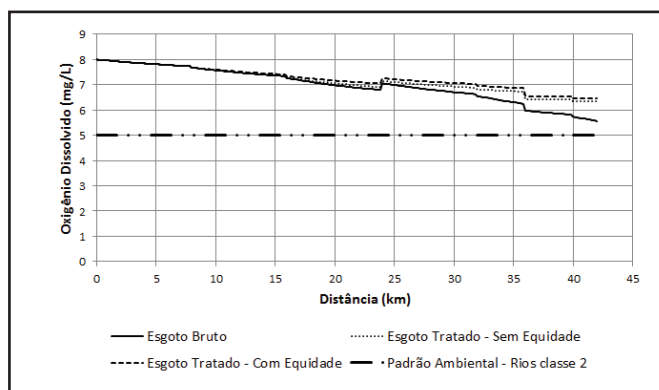


Figura 7 – Variação espacial das concentrações de OD para o trecho simulado, considerando-se a disposição de cargas orgânicas crescentes

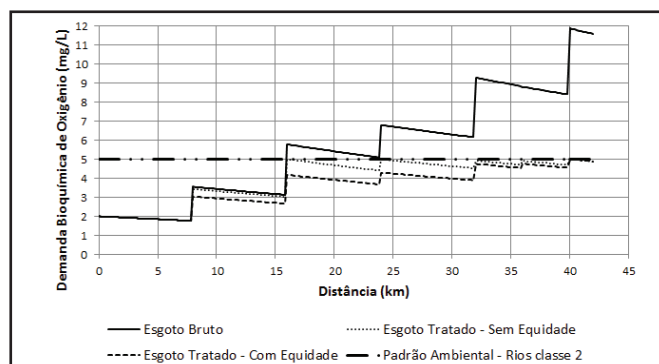


Figura 8 – Variação espacial das concentrações de DBO para o trecho simulado, considerando-se a disposição de cargas orgânicas crescentes

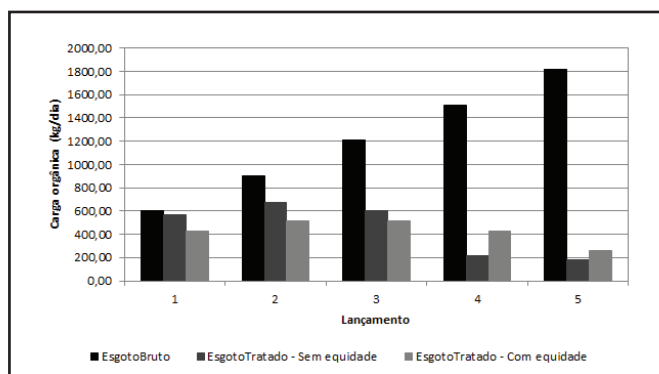


Figura 9 – Cargas orgânicas associadas aos diferentes pontos de disposição final considerando-se o lançamento de esgotos brutos, tratados sem e com equidade – Resultados associados à disposição de cargas orgânicas crescentes

Nesta condição de disposição de efluentes, o sistema hídrico seria menos pressionado, uma vez que a disposição crescente de cargas orgânica seria acompanhada do aumento da capacidade de diluição e de autodepuração do curso d'água. No entanto, ainda que o padrão de qualidade associado ao OD tenha sido respeitado, mesmo para a condição de disposição final de efluentes brutos, as concentrações de DBO excederam o limite máximo (padrão de qualidade ambiental) a partir do segundo ponto de disposição de efluentes.

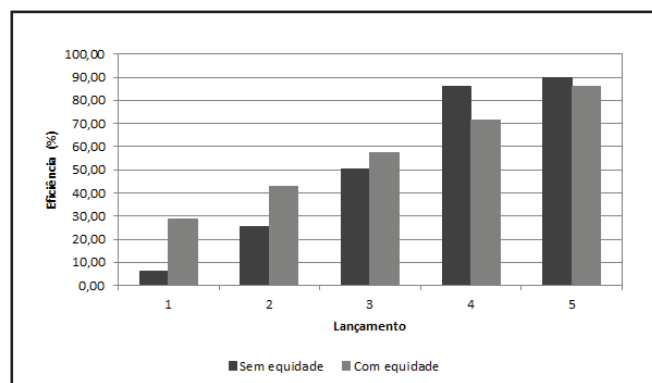


Figura 10 – Eficiências estimadas para os diferentes possíveis sistemas de tratamento com e sem incorporação da equidade – Resultados associados à disposição de cargas orgânicas crescentes

Também neste cenário de disposição de efluentes, a incorporação da equidade diminuiu a amplitude de variação dos níveis de eficiência selecionados (Figura 09). Sem a equidade as cargas orgânicas associadas ao esgoto tratado oscilaram entre 181 kg.dia⁻¹ (quinto lançamento) e 678 kg.dia⁻¹ (segundo lançamento). Após a incorporação da equidade, as cargas variaram entre 256 kg.dia⁻¹ (quinto lançamento) e 518 kg.dia⁻¹ (segundo lançamento).

Ainda que a disposição de cargas orgânicas crescente produza progressiva ampliação dos níveis de tratamento, independentemente da incorporação da equidade entre os lançamentos (Figura 10), apenas com a equidade os níveis de tratamento cresceram na mesma proporção da ampliação da carga orgânica bruta associada a cada ponto de disposição de efluente. Sem a equidade, as eficiências de tratamento variaram entre 6% e 90%. Incorporando-se a equidade ao modelo de otimização, as eficiências variaram entre 29% e 86%, limites muito próximos daqueles obtidos para o cenário de disposição de cargas decrescentes.

CONCLUSÕES

Nos moldes propostos neste trabalho, a equidade permitiu estabelecer uma relação linear entre aumento de cargas orgânicas brutas e níveis de tratamento, impondo-se aos maiores poluidores de uma bacia hidrográfica os maiores esforços de tratamento de seus efluentes.

A incorporação da equidade entre sistemas de tratamento de esgotos, quando do emprego combinado de técnica de otimização e modelo de qualidade de água para a seleção de eficiências de tratamento, não produziu os menores somatórios de eficiências no âmbito da bacia hidrográfica. No entanto, com emprego da equidade, houve redução na amplitude da variação das cargas orgânicas de esgotos tratados dispostos na bacia.

A imposição de padrões de qualidade para efluentes, nos modelos propostos pela Resolução CONAMA n.º 430 (BRASIL, 2011), conduziu ao aumento dos níveis de tratamento associados aos pontos de disposição final de efluentes.

REFERÊNCIAS

- ALBERTIN, L. L.; MAUAD, F. F.; DANIEL, L. A. Uso de Simulação Computacional para Planejamento de um Sistema Hídrico: Estudo de Caso Qualitativo e Quantitativo. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 11, n. 4, p. 209-219, out./dez. 2006.
- ANDRADE, L. N.; MAURI, R. G.; MENDONÇA, A. S. F. A General Multiobjective model and a Simulated Annealing Algorithm for Waste-load Allocation. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, v. 139, n. 3, p. 339-344, May/June 2013.
- ARAS, E.; TOGAN, V.; BERKUN, M. River water quality management model using genetic algorithm. *Environ. Fluidic Mech.*, v. 7, n. 5, p. 439-450, Oct. 2007.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 357, de 17 de março de 2005. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 17 mar. 2005.
- BRASIL. Resolução CONAMA nº 430, de 13 de maio de 2011. *Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil*, Brasília, DF, 13 maio 2011.
- BURN, D. H.; YULIANTI, J. S. Waste-load allocation using genetic algorithms. *J. Water Resour. Plan. Manag.*, v. 127, n. 2, p. 121-129, Apr. 2001.
- CARVALHO, R. C.; KAVISKI, E. Modelo de Auxílio à Tomada de Decisões em Processos de Despoluição de Bacias Hidrográficas. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v.14, n. 4, p. 17-27, out./dez. 2009.
- CHO, J. H.; LEE, J. H. Multi-objective waste load allocation model for optimizing waste load abatement and inequality among waste dischargers. *Water, Air, Soil Pollut.*, v. 225, n. 3, p. 1-17, Mar. 2014.
- CHO, J. H.; SUNG, K. S.; HA, S. R. A river water quality management model for optimising regional wastewater treatment using a genetic algorithm. *J. Environ. Manage.*, v. 73, n. 3, p. 229-242, Nov. 2004.
- 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. 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.
- LOUZADA, J. P.; REIS, J. A. T.; MENDONÇA, A. S. F. Uso de otimização e modelagem de qualidade de água no planejamento de implantação de sistemas de tratamento de esgotos sanitários em bacias hidrográficas. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 18, n. 1, p. 277-286, jan./mar. 2013.
- MACHADO, E. S.; KAVISKI, E.; PORTO, M. Otimização do Planejamento de Sistemas Regionais de Tratamento de Efluentes Através de Simulação Monte Carlo e da Metaheurística do Recozimento Simulado. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 17, n. 3, p. 29-38, jul./out. 2012.
- MENDONÇA, A. S. F.; ALMEIDA, M. M. Definição de alternativas de eficiências de tratamento de efluentes para manutenção de padrões ambientais. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO DE RECURSOS HÍDRICOS, 16., 2005, João Pessoa. *Anais...* João Pessoa: Associação Brasileira de Recursos hídricos, 2005. p. 501-510.
- PÖPEL, H. J. *Aeration and gastransfer*. Delft: Delft University of Technology, 1979.
- SAADATPOUR, M.; AFSHAR, A. Waste load allocation modeling with fuzzy goals; simulation- optimization approach. *Water Resour. Manage.*, v. 21, n. 7, p. 1207-1224, July 2007.
- SALIM, F. P. C. *Desenvolvimento de sistema de suporte a decisão para o gerenciamento da qualidade das águas em rios considerando múltiplas fontes de poluição pontual*. 2004. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 2004.
- SALLA, M. R.; ARQUIOLA, J. P.; SOLERA, A.; ALVARÉZ, J. A.; PEREIRA, C. E.; ALAMY FILHO, J. E.; OLIVEIRA, A. L. Sistema de Suporte à Decisão em Recursos Hídricos na Bacia Hidrográfica do Rio Uberabinha, Minas Gerais. *RBRH: Revista Brasileira de Recursos Hídricos*, v. 19, n. 1, p. 189-204, jan./mar. 2014.
- SOUZA, J.; RIBEIRO, A.; CUNHA, M. C.; ANTUNES, A. An optimization approach to wastewater systems planning at the regional level. *J. Hydroinformatics*, v. 4, n. 2, p. 115-123, 2002.
- VON SPERLING, M. *Princípios do tratamento biológico de águas residuárias: estudos e modelagem da qualidade da água em rios*. Belo Horizonte: DESA/UFGM, 2007.
- VOUTCHKOV, N. S.; BOULOS, P. F. Heuristic screening methodology for regional wastewater-treatment planning. *J. Environ. Eng. Div.*, v. 119, n. 4, p. 603-614, July 1993.
- YANDAMURI, S. R. M.; SRINIVASAN, K.; BHALLAMUDI, S. M. Multiobjective optimal waste load allocation models for rivers using nondominated sorting genetic algorithm-II. *J. Water Resour. Plann. Manag.*, v. 132, n. 3, p. 133-143, May/June 2006.
- ZAMPROGNO, D. P. *Subsídio para a definição de locais apropriados para a implantação de reservatórios de regularização de vazões: refinamento e aplicação de procedimento metodológico*. 1999. Dissertação (Mestrado

em Engenharia Ambiental) - Centro Tecnológico, Universidade Federal do Espírito Santo, Vitória, 1999.

ZHU, Z.; REVELLE, C. A siting model for regional wastewater treatment systems: the chain configuration case. *Water Resour. Res.*, v. 24, n. 1, p. 137-144, 1988.

Contribuição dos autores:

José Antonio Tosta dos Reis: Estabelecimento do modelo de equidade, condução das simulações computacionais, que envolveram o uso combinado de um modelo de qualidade de água e de uma técnica de otimização, análise dos resultados e estabelecimento das conclusões.

Juliana Pereira Louzada Valory: Condução das simulações computacionais, que envolveram o uso combinado de um modelo de qualidade de água e de uma técnica de otimização, reunião de informações hidrológicas e a caracterização hidrodinâmica dos cursos d'água objeto de simulações, análise dos resultados e estabelecimento das conclusões.

Antonio Sérgio Ferreira Mendonça: Estabelecimento do modelo de equidade, análise dos resultados e estabelecimento das conclusões.