

# Metodologia de priorização de investimento para melhoria da qualidade das águas: caso da bacia do Rio Itajaí, SC

Pétrick Anderson Soares  
Markus Zinkhahn  
Beate Frank  
Odirlei Fistarol

**RESUMO:** Neste trabalho é apresentada uma metodologia para a priorização de investimentos com o objetivo de alcançar a melhoria na qualidade das águas superficiais. Sendo desenvolvido e aplicado na bacia do rio Itajaí, no estado de Santa Catarina, Brasil, o método é baseado em cenários de simulação e considera a espacialização dos investimentos prioritários e os benefícios gerados em termos de qualidade das águas. A partir dos resultados apresentados, de previsão de investimentos e benefícios gerados por estes, é caracterizada a relação de otimização do uso dos recursos financeiros perante os resultados na qualidade da água. Os resultados obtidos revelam a potencialidade da metodologia, utilizada para desenvolver uma política de investimentos em esgotamento sanitário no âmbito da bacia.

**PALAVRAS-CHAVE:** Priorização de investimentos em saneamento, modelos de qualidade de água, esgotamento sanitário.

**ABSTRACT:** This paper presents a methodology for prioritization of investments in order to achieve better quality of surface waters. Being developed and applied in the basin of the river Itajaí, state of Santa Catarina, Brazil, the method is based on simulation of scenarios and it considers the spatial distribution of investment priorities and the benefits generated in terms of water quality. From these results, the estimative of investments and benefits generated by them, the relationship between optimal use of financial resources and the results on water quality can be characterized. The results show the potentiality of this methodology which was used to develop a policy for investment in sanitation as part of the basin.

**KEY WORDS:** Prioritizing investments in sanitation, models of water quality, wastewater disposal.

## INTRODUÇÃO

Assegurar a necessária disponibilidade de água, em padrões de qualidade adequados aos respectivos usos, é um dos objetivos da Política Nacional de Recursos Hídricos (BRASIL, 1997). Entre os desafios enfrentados no cumprimento desse objetivo destaca-se o de suprir a falta de tratamento dos esgotos na maioria dos municípios, pois este é muitas vezes o principal responsável pela qualidade insatisfatória das águas. Como instrumento para gerenciar a qualidade da água, a Lei 9.433/97 definiu o enquadramento dos corpos de água, que expressa as metas de qualidade a serem atingidas, e é proposto, em cada bacia hidrográfica, pelo respectivo comitê.

A Lei 11.445/2007 (BRASIL, 2007), que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico,

regulamenta a coleta e o tratamento dos esgotos como parte dos serviços de saneamento básico, cuja titularidade é dos municípios. O objetivo da política de saneamento é atingir a universalidade, ou seja, atender toda a população com os serviços de saneamento básico. Esta lei também estabelece que o plano municipal que define as ações de saneamento deve se pautar pelo enquadramento dos corpos d'água acima mencionado.

Os objetivos das duas políticas – recursos hídricos e saneamento – são compatíveis entre si: qualidade de água compatível para todos os usos e universalidade no tratamento de esgotos. Enquanto a meta de melhoria da qualidade de água é definida pelo comitê de bacia, o cumprimento dessa meta cabe aos setores usuários de água, sobretudo ao setor de saneamento. À medida que o município busca a universalidade do

saneamento, ele colabora no cumprimento da meta de qualidade. Esta é, em princípio, a articulação entre as duas políticas. A dificuldade reside na oferta de recursos financeiros, que em geral não é suficiente para que a universalidade do saneamento e as metas de qualidade da água sejam atingidas em curto prazo. É por isso que a priorização de investimentos, visando à melhoria da qualidade que se deseja para os corpos hídricos, expressos pelo enquadramento, é uma questão importante para a gestão de recursos hídricos.

O enquadramento, mesmo sendo importante ferramenta de gestão, ainda é pouco aplicado no Brasil, tanto é que somente alguns estados apresentam rios de seu domínio enquadrados (AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS, 2009). As metodologias empregadas no enquadramento dos corpos de águas superficiais envolvem a participação pública (Haase; Silva, 1998; Camargos, 2005; Christofidis, 2006), análise da qualidade observada nos corpos de água (Leite et al., 1998), a geração de cenários através de simulações matemáticas (Oppa, 2007) e cenários produzidos em modelos associados com os resultados de consultas públicas (Jungblut et al., 2008). Algumas metodologias são apresentadas na literatura científica, não tendo ainda sido transferidas para a aplicação pelos gestores de bacias hidrográficas.

Na geração de cenários são utilizados modelos matemáticos de simulação da qualidade das águas (Carvalho; Kaviski, 2009). Diferentes estratégias ou alternativas de intervenção são consideradas. Tais alternativas consistem de investimentos que devem ser ou não realizados, perante análises técnicas, econômicas e políticas sobre a bacia investigada. Silva e Ribeiro (2006), discutindo o sistema de cobrança pelo uso da água na bacia do rio Pirapama, determinaram, através de simulações, os custos necessários para modificar a qualidade atual do rio, para que esta entre em conformidade com a qualidade exigida em seu enquadramento. Schwartzman et al. (2002) quantificaram os investimentos necessários para atingir a qualidade requerida no enquadramento, e com isso estimaram a necessidade de eficiência mínima no tratamento de esgotos de 85% para  $\text{DBO}_{5,20^\circ\text{C}}$  e 90% para coliformes termotolerantes. Utilizando o modelo QUAL2K para simular o oxigênio dissolvido, Sardinha et al. (2008) identificaram a necessidade de tratamento dos esgotos sanitários da cidade do Leme com, no mínimo, 76% de eficiência na remoção de  $\text{DBO}_{5,20^\circ\text{C}}$ , com

o objetivo de que as águas dos corpos receptores permanecessem com a qualidade mínima indicada pelo seu enquadramento.

Jungblut et al. (2008) descrevem que o Comitê da Bacia do Rio Caí - RS analisou a relação entre os níveis de tratamento necessários e a qualidade de água resultante, permitindo definir as ações prioritárias para a mitigação das cargas orgânicas. Foram formuladas alternativas para o esgotamento sanitário na bacia, em que os percentuais de atendimento e de eficiência na remoção de cargas eram diferenciados segundo o cenário proposto.

A priorização de investimentos no setor de saneamento tem privilegiado critérios empíricos e demandas políticas, nem sempre legítimas, em detrimento da utilização de critérios socialmente relevantes para o estabelecimento de prioridades (Teixeira; Heller, 2001). Segundo Yony Sampaio et al. (2008), a natureza multidisciplinar da gestão de recursos hídricos requer a integração de aspectos técnicos, econômicos, ambientais, sociais e legais em uma mesma plataforma e ação. No processo de gestão de bacias, os recursos financeiros devem ser utilizados da melhor forma possível. Eles devem atender a critérios previamente especificados, de modo a se obter o máximo de benefícios, representados por uma remoção eficaz das cargas poluentes e obtenção da qualidade das águas nos horizontes de planejamento estabelecidos pelos planos de bacias (Carvalho; Kaviski, 2009). Contudo, observa-se a existência de dificuldade no processo de tomada de decisão no que tange o gerenciamento financeiro dos planos de bacias.

Dentro desse contexto, este trabalho visa propor uma metodologia baseada em cenários de simulação, capaz de otimizar a relação entre a melhoria na qualidade de água e a aplicação de recursos financeiros, com enfoque ao desenvolvimento de políticas públicas voltadas à solução do problema do esgotamento sanitário no âmbito da bacia. A metodologia considera a espacialização dos investimentos prioritários e os benefícios gerados em termos de qualidade das águas no conjunto da bacia hidrográfica do rio Itajaí<sup>1</sup>.

<sup>1</sup> Esse trabalho foi desenvolvido em associação à elaboração do Plano de Recursos Hídricos da Bacia do Itajaí, no âmbito do Projeto Piava, que integra o Programa Petrobras Ambiental, e cujo objetivo é consolidar uma política de proteção da água na bacia do Itajaí.

## METODOLOGIA

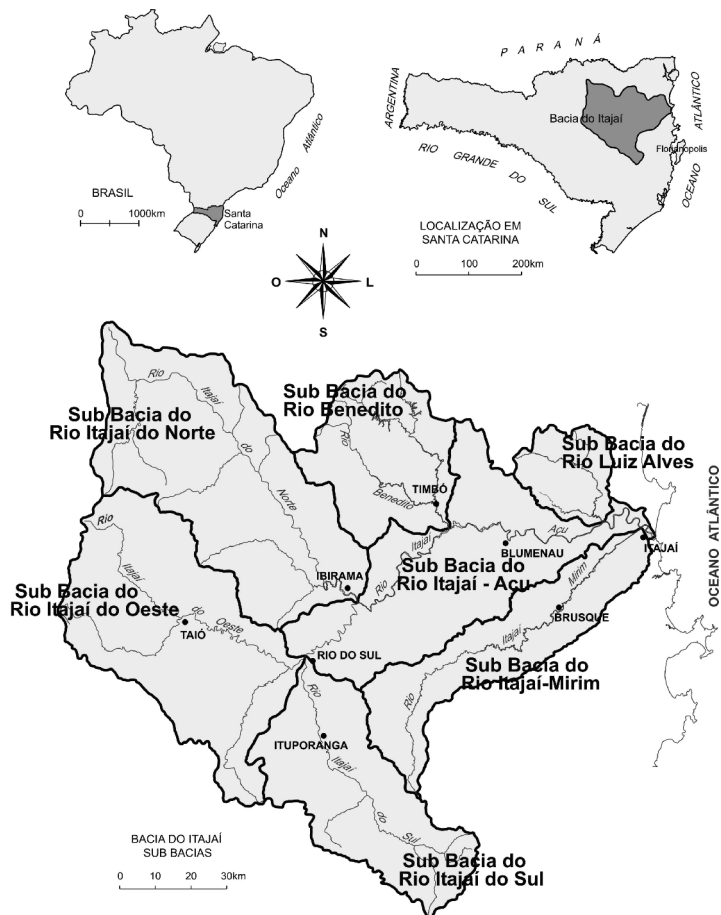
O estudo foi desenvolvido na bacia hidrográfica do rio Itajaí, figura 1. Esta é a maior bacia da vertente atlântica do estado de Santa Catarina, possui uma área de drenagem de 15.000 km<sup>2</sup>, compreende 49 municípios, dos quais 47 têm sua sede dentro da bacia. A população total é de cerca de 1,1 milhões de habitantes.

## Modelo utilizado

Foi utilizado o modelo de qualidade de água QUAL-UFMG (VON SPERLING, 2007), que

foi alimentado com as seguintes informações de entrada:

1) dados do cadastro de usuários de água, da Secretaria de Estado do Desenvolvimento Sustentável de Santa Catarina (FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ, 2010), considerando os usos irrigação, indústria, abastecimento urbano, dessedentação animal, aquicultura e outros usos (que não se enquadram em nenhuma classificação anterior). A Tabela 1 apresenta a distribuição de usos por sub-bacias consideradas.



**FIGURA 1: Bacia do rio Itajaí.**

TABELA 1

Usuários cadastrados e incluídos na simulação. Fonte: Fundação Agência de Água do Vale do Itajaí (2010)

USOS/SUB-BACIA	Benedito	Luiz Alves	Itajaí do Sul	Itajaí do Oeste	Itajaí Açú	Itajaí do Norte	Itajaí Mirim
Abastecimento humano	6	2	7	9	10	11	20
Aquicultura	76	16	115	214	74	5	30
Indústria	18	1	5	41	99	11	101
Dessedentação animal	4	11	74	241	44	18	17
Irrigação	449	37	57	1.789	588	34	110
Outros usos	2	5	45	83	43	4	32
TOTAL	555	72	303	2.377	858	83	310

2) Como o cadastro de usuários não contém ainda as características físico-químicas dos efluentes, foram utilizadas diversas publicações com estimativas de cargas para os tipos de uso da água (MATOS, 2002; Arceivala, 1981; Von Sperling, 2005; Metcalf; Eddy, 2003; Gonçalves, 2003; Bastos et al., 2003).

3) Para alimentar o modelo com as vazões de referência, foi utilizado o estudo regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais do estado de Santa Catarina (SANTA CATARINA, 2006). A calibração foi feita com a vazão média de longo termo ( $Q_{mlt}$ ), pois esta é, estatisticamente, a vazão representativa dos escoamentos nos corpos de água. Na construção dos cenários foi utilizada a vazão  $Q_{95\%}$ . Este valor foi escolhido pelos proponentes do Plano de Bacia como de referência para os estudos de diluição e cargas. Os dados referentes à qualidade das águas foram provenientes de estudos realizados por diversos autores, condensados no Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí (FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ, 2010), como também foram selecionados dados dos monitoramentos das empresas responsáveis pelo saneamento e pela pesquisa agropecuária.

O processo de simulação foi desenvolvido para os constituintes:  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  e coliformes termotolerantes. A escolha pelo parâmetro  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  justifica-se por ser representativo da poluição orgânica biodegradável e principal constituinte dos esgotos sanitários (Von Sperling, 2005). Quanto aos coliformes termotolerantes, sua escolha origina-se da representatividade no contexto “esgoto sanitário”, podendo servir como indicador de contaminação fecal.

A calibração foi efetuada por sub-bacias e englobou os coeficientes de desoxigenação ( $k_1$ ), de decaimento de coliformes ( $k_b$ ) e de decomposição ( $k_d$ ), pois estes se mostraram mais sensíveis para os constituintes simulados. Nesse processo, a ferramenta SOLVER do Excel foi utilizada a fim de analisar e quantificar o coeficiente de determinação (CD), expresso pela equação 1.

$$CD = 1 - \frac{\sum(Y_{obs} - Y_{est})^2}{\sum(Y_{obs} - Y_{obsméd})^2} \quad (1)$$

Onde:

$Y_{obs}$ : valor observado;

$Y_{est}$ : valor estimado e

$Y_{obsméd}$ : média dos valores observados.

O CD pode adquirir valores que variam desde - infinito até +1, contudo o valor desejado para se obter é de +1, ou seja, quanto mais perto de +1 o CD estiver, melhor o procedimento de calibração (Von Sperling, 2007).

### Definição dos Cenários

#### *Cenário atual*

Um cenário foi construído com a finalidade de evidenciar a realidade atual na bacia, caracterizada pelo reduzido percentual de tratamento de esgoto sanitário. Os efluentes industriais, contudo, sofrem uma redução média de 80% na concentração de  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  antes de serem lançados aos rios, atendendo a Lei Estadual 14.675/2009 (SANTA CATARINA,

2009). O desenvolvimento desse cenário consiste em produzir um cenário “branco”, ou seja, produzir dados que posteriormente serão comparados com os resultados dos cenários propostos.

### *Cenários propostos*

Partindo do pressuposto de que cada município é, basicamente, composto de dois tipos de assentamento, um rural e um urbano, aqui denominadas “regiões habitacionais”, os cenários foram idealizados tomando cada município da bacia composto por duas regiões habitacionais separadas, resultando em duas formas de contribuições por esgoto. Considerando que a bacia do rio Itajaí abriga 49 municípios, o total de regiões habitacionais é de 96, pois os municípios de Itaiópolis e Papanduva possuem suas áreas urbanas localizadas em outra bacia hidrográfica.

O pressuposto da cenarização se justifica, pois para cada tipo de assentamento (rural ou urbano), diferentes medidas para a promoção de tratamento do esgoto devem ser adotadas. Em uma região urbanizada o esgoto sanitário é transportado para sistemas coletivos de tratamento, enquanto que nas áreas rurais o esgoto normalmente é tratado em sistemas individuais, de acordo com a NBR 7229/93 e a NBR 13969/97. Neste caso, em geral, adota-se sistema tanque séptico e filtro anaeróbio.

Para o tratamento de esgoto em áreas rurais, a eficiência simulada para a remoção de  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  e de coliformes termotolerantes foi, respectivamente de 30 a 60% (adotado 45%) e 99% para sistemas individuais, seguidos de um processo de desinfecção. Para o tratamento de esgoto em áreas urbanas, a eficiência simulada para remoção de  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  e de coliformes termotolerantes foi respectivamente de 70 a 90% (adotado 80%) e 99% para estações de tratamento de esgoto (por exemplo com lodos ativados), seguidos de um processo de desinfecção (Von Sperling; Chernicharo, 2002; Von Sperling, 2005; Gonçalves, 2003).

Sendo assim, 96 cenários foram desenvolvidos a partir das simulações da qualidade de água dos rios. Para cada região habitacional existe um cenário considerando o tratamento de 100% do volume de esgoto, e um cenário em que nenhum tratamento é realizado (cenário “branco”).

### *Benefícios*

Os benefícios gerados pela implantação de cada conjunto de medidas de despoluição devem levar em

conta a importância do uso dos recursos (Carvalho; Kaviski, 2009). Contudo, grande dificuldade reside em quantificar a importância que os usos destes recursos acarretam. Ou seja, no processo de gestão de recursos hídricos, a relação entre os benefícios gerados com medidas de despoluição devem estar em consonância com os custos envolvidos no processo, de maneira a aperfeiçoar o papel do gestor e gerar melhoria na qualidade na água da bacia.

Como resultado das simulações realizadas, considerando os cenários de esgotamento com e sem tratamento para cada região habitacional, foram obtidas duas curvas de concentração, que representam a evolução da concentração de  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  ou de coliformes termotolerantes para os dois cenários. A distância entre as duas curvas em cada ponto do rio representa a melhoria da qualidade de água alcançada naquele ponto, para cada parâmetro, devido ao tratamento de esgoto. A curva obtida com a simulação do cenário branco é a curva de referência para todas as outras simulações, ou seja, o comportamento que foi considerado ser hoje o existente na bacia.

Em seguida, para cada região habitacional, foi calculada a soma das diferenças de concentração - a cada quilômetro de rio - obtidas pelo tratamento do esgoto, quantificando a melhoria na qualidade das águas em todos os rios afetados pelo lançamento do esgoto, obtida quando for realizado o tratamento do esgoto na respectiva região habitacional. São obtidas, assim, as melhorias de qualidade  $\Sigma_{\Delta}$  (soma das diferenças para cada trecho de rio, desde a região habitacional até a foz) para as 96 regiões habitacionais identificadas. Uma consideração especial foi feita nos trechos dos rios em que existem captações de água para consumo humano, pois é um dos princípios da política nacional de recursos hídricos que, em situação de escassez, o uso para abastecimento humano é prioritário a outros usos (BRASIL, 1997). Sendo assim, foi dado peso “2” para estes trechos, enquanto os trechos em que não existe captação ficaram com peso “1”.

### *Custos*

A fim de estabelecer a priorização dos investimentos, busca-se construir a relação entre os benefícios produzidos pela implantação de tratamento de esgoto e os custos associados. A equação 2 estabelece a relação “benefício/custo”.

$$B/C = \frac{\Sigma_{\Delta} r}{(hab_r * \text{Custo específico}_r)} \quad (2)$$

Onde:

$B/C$  = relação “benefício/custo” para cada região habitacional, calculada em termos de melhoria da qualidade de água (unidades de qualidade de água) por valor (R\$) investido;

$\Sigma_{\Delta r}$  = soma das diferenças de concentração, mg/L ou NMP/100mL;

$hab_r$  = número de habitantes residentes em cada região habitacional;

Custo específico  $c_r$  = custo de implantação de tratamento de esgoto para cada habitante da região habitacional, em R\$.

A importância de um custo específico por habitante é derivada da consideração de que existe diferença na concepção da coleta e do tratamento de esgoto para cada forma de assentamento. Ou seja, o processo de implantação de redes de esgoto e tratamento ocorre de forma diferenciada em áreas urbanas e rurais. Foram utilizados os valores de R\$ 246,98, como custo per capita para implantação de tratamento de esgoto em área rural e, R\$ 1028,57 para implantar o tratamento em área urbana, conforme estudo preliminar (PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO ITAJAÍ, 2010). A diferença entre os valores é consequência da própria concepção do tratamento, ou seja, para áreas rurais não existem custos para coletar e conduzir os esgotos até uma estação, já para áreas urbanas eles existem e correspondem à significativa parte do custo total (Tsutiya; Alem Sobrinho, 1999).

### Indicador

Utilizando a equação 2, foi obtido um valor para a relação benefício/custo, tanto no que tange à melhoria da  $DBO_{5, 20^\circ C}$  como também para a melhoria ocorrida em termos de coliformes termotolerantes. Contudo, considerando a necessidade de se obter um indicador único e a importância de cada um dos parâmetros simulados, foi realizada a multiplicação das relações “benefício/custo” de cada constituinte, conforme a equação 3.

$$ID_r = (B/C)_{DBO_{5,20^\circ C}} * (B/C)_{coliformes} \quad (3)$$

Onde:

$(B/C)_{DBO_{5,20^\circ C}}$  = relação benefício/custo de tratar o esgoto da região habitacional  $r$ , considerando a  $DBO_{5,20^\circ C}$ ;

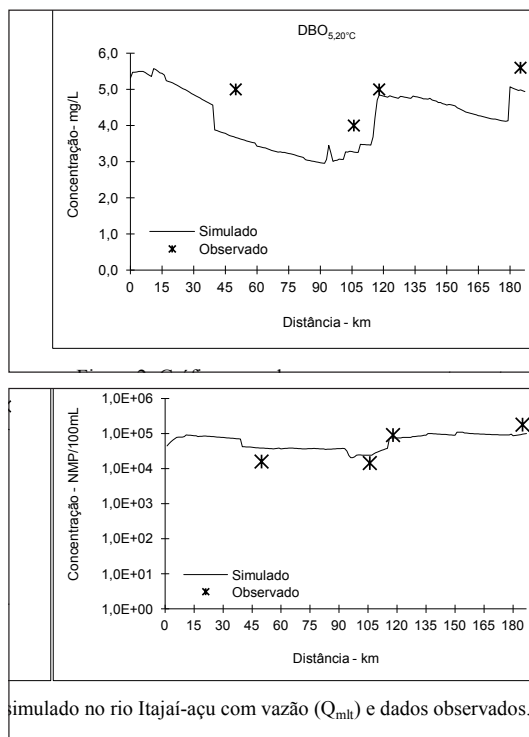
$(B/C)_{coliformes}$  = relação benefício/custo de tratar o esgoto da região habitacional  $r$ , considerando coliformes fecais;

$ID_r$  = Indicador global da região habitacional  $r$ , adimensional.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Cenário branco

O cenário “branco” consiste na realidade atual da bacia estudada. Neste cenário os efluentes produzidos pela empresas são tratados, com redução da carga orgânica em taxa superior ou igual a 80%. Esta condição foi considerada para todas as empresas constantes no cadastro de usuários de águas da bacia do rio Itajaí. As simulações foram realizadas para a vazão média de longo termo ( $Q_{mlt}$ ) obtida do estudo de regionalização. Na figura 2 são apresentadas as evoluções das concentrações da  $DBO_{5,20^\circ C}$  e coli-



**FIGURA 2.** Gráficos que descrevem o comportamento simulado no rio Itajaí-açu com vazão ( $Q_{mlt}$ ) e dados observados.



formas termotolerantes observadas e simuladas na sub-bacia do rio Itajaí-açu. A concentração máxima simulada da  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  no rio Itajaí-açu foi de 5,6 mg/L e na bacia toda, a concentração máxima foi de 21,3 mg/L no rio Itajaí do Norte. Em relação aos coliformes termotolerantes, a concentração máxima simulada foi de  $1,8 \times 10^5$  NMP/100 mL na sub-bacia do rio Itajaí-açu.

Pela Resolução CERH 02/2008 todos os cursos d'água do Estado foram enquadrados em classe 2, até que sejam reenquadrados com base em propostas dos comitês de bacia hidrográfica. No âmbito do plano diretor da bacia (PLANO DE RECURSOS HÍDRICOS DA BACIA HIDROGRÁFICA DO RIO ITAJAÍ, 2010), o Comitê do Itajaí propôs um re-enquadramento que declara alguns trechos de rios como classe 1 e define os rios em unidades de conservação como classe especial.

### Cenários desenvolvidos

Na figura 3 são apresentadas as evoluções das concentrações simuladas para a  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  e para os coliformes termotolerantes ao longo dos cursos de água principais nas sub-bacias consideradas, nas condições de cenário branco e de cenário com tratamento dos esgotos sanitários para as 96 regiões habitacionais. São apresentadas igualmente as localizações das sedes municipais ao longo dos cursos de águas principais. Observa-se que próximos dos centros urbanos as concentrações aumentam, decaindo para jusante, quando os lançamentos de esgotos sanitários diminuem.

Pela análise da evolução das concentrações dos parâmetros de qualidade das águas considerados, constata-se a importância do esgotamento sanitário para a bacia. Nota-se reduções significativas nas concentrações, tanto de  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  quanto de coliformes termotolerantes, principalmente nos rios Itajaí do Norte, Itajaí do Sul e no Itajaí-açu. As maiores diferenças são observadas nas concentrações de coliformes termotolerantes.

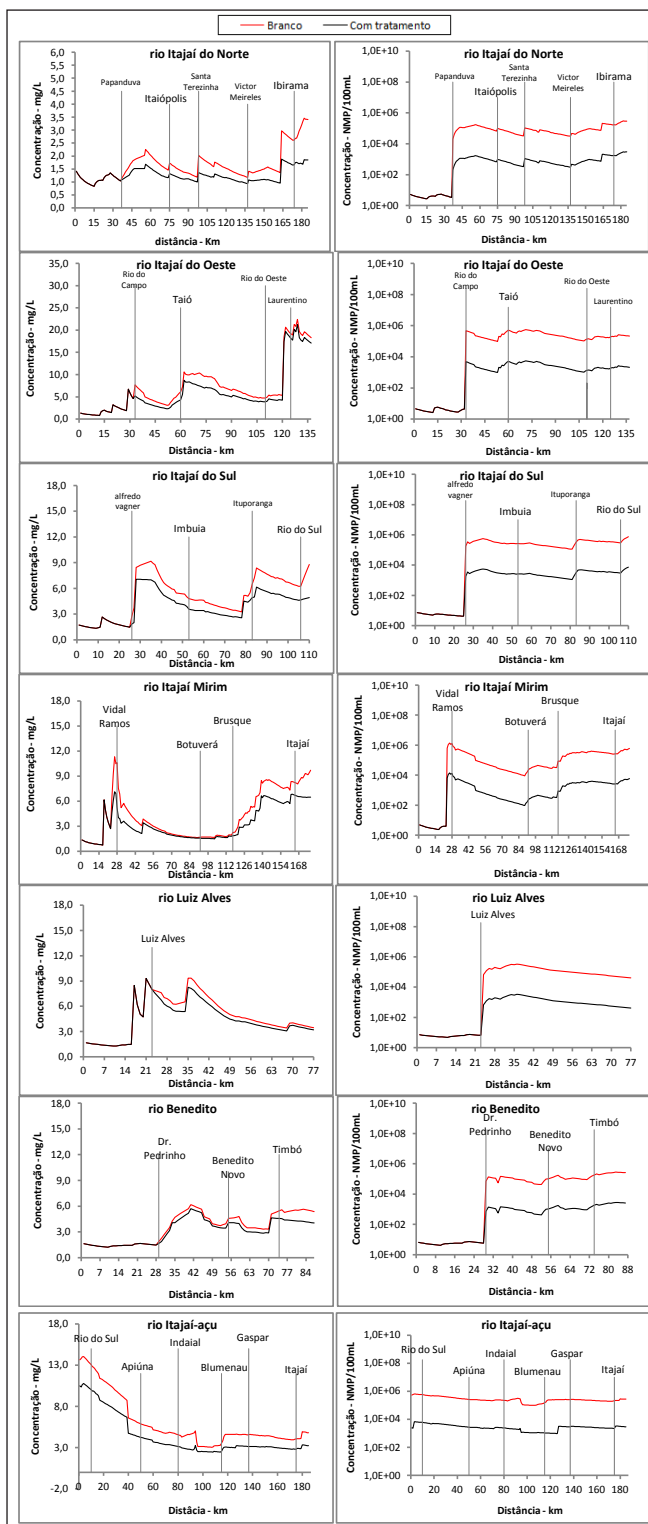
### Resultados para a relação benefício-custo

Utilizando-se as curvas de concentração produzidas nos cenários branco e com tratamento, obtém-se o valor de somatório  $\sum_{\Delta r}$  para cada região habitacional, o qual representa os benefícios do tratamento do esgoto para a qualidade da água na bacia. O somatório representa a influência que cada região populacional exerce sobre a qualidade da água ao longo dos cursos d'água a jusante.

O investimento necessário possui significativa importância no processo de gestão dos recursos. Em áreas rurais onde são adotadas soluções individuais, sem a implantação de sistema de esgotamento sanitário, os investimentos necessários são inferiores aqueles das áreas urbanas. Na figura 4 são apresentadas as evoluções dos custos, dos benefícios e dos indicadores nas regiões habitacionais da bacia. Os indicadores estão colocados em ordem decrescente. Nota-se que os maiores valores do indicador ocorrem para as regiões habitacionais rurais próximos às cabeceiras, ou em pontos mais distantes do exutório da bacia, onde os custos per capita da redução da degradação das águas por esgotos domésticos é mais baixo. Este resultado demonstra que as ações com maior abrangência espacial produzem maiores impactos sobre a totalidade da bacia.

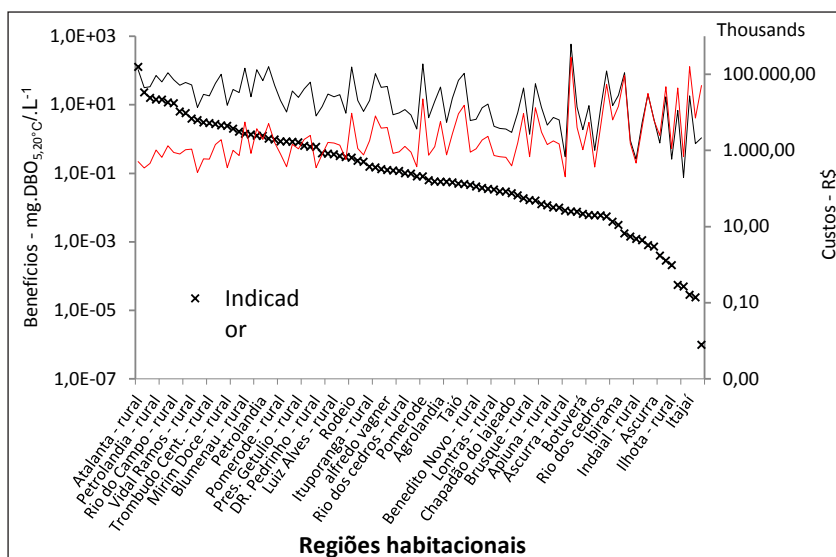
O valor do indicador obtido pela equação 3 considera o produto entre as relações benefícios/custos dos parâmetros de qualidade da água adotados nas simulações. Na tabela 2 são apresentados os cinco maiores e os cinco menores municípios, em termos de população urbana. Observa-se que os municípios com maior população resultaram em indicador baixo. Em geral, os municípios com maior população estão situados mais próximos do exutório da bacia. Devido a esta localização, as contribuições na melhoria da qualidade das águas sobre o conjunto da bacia são mais reduzidas e os custos mais elevados. Em sentido contrário, os municípios com menores populações têm maior área rural e estão mais distantes do exutório, e suas contribuições à qualidade da bacia são mais significativas. Quanto mais longe da foz e próximas das nascentes, a vazão disponível para ocorrer a diluição dos esgotos é menor. Assim, a redução da carga lançada implica em redução significativa nas concentrações do corpo receptor. Além disto, quanto menor for a região habitacional, menor é o custo de investimento. Estes resultados corroboram com o trabalho apresentado por Kondageski et al. (2009) que, utilizando critérios ambientais, sociais e econômicos para a promoção de esgotamento básico, relatam que os municípios com baixa população apresentam, em média, maiores índices de prioridade do que os municípios mais populosos. Contudo, ressalta-se que em ambos os trabalhos, os indicadores não consideraram de forma direta os impactos do saneamento na saúde da população.

Essa tendência é exemplificada ao comparar dois municípios com características distintas na tabela 2:



**FIGURA 3.** Variação espacial de  $DBO_{5,20^{\circ}C}$  (esquerda) e de coliformes termotolerantes (direita) na bacia do rio Itajaí.





**FIGURA 4.** Relação entre os custos de investimento e os benefícios gerados (DBO<sub>5,20°C</sub>) para a bacia do rio Itajaí, resultando o indicador proposto.

**TABELA 2**

Ordem decrescente da população (P), custos (C), benefícios (B), relação benefício/custo em termos de DBO<sub>5,20°C</sub> (B/C) e indicador (ID), para os cinco maiores e cinco menores municípios em população urbana

Município	Região Urbana					Região Rural				
	P	C	B	B/C	ID	P	C	B	B/C	ID
Blumenau	1	1	1	72	74	9	21	5	23	19
Itajaí	2	2	42	93	94	23	45	89	87	84
Brusque	3	3	9	83	83	61	78	87	73	67
Rio do Sul	4	4	8	75	80	48	65	77	60	57
Navegantes	5	5	88	96	96	60	77	96	94	93
Mirim Doce	90	54	48	35	38	86	93	53	19	16
Botuverá	92	59	85	77	76	57	73	79	58	53
Presidente Nereu	94	74	73	52	50	82	90	65	28	26
Witmarsum	95	75	35	15	18	63	80	18	4	5
Chapadão do Lajeado	96	88	86	59	64	69	84	68	40	36

áreas urbanas de Blumenau e Witmarsum. Enquanto o primeiro é o mais populoso, apresentando os maiores benefícios, o segundo é pequeno (95º lugar em população na bacia), mas apresenta quantidade de benefícios relativamente alta. O resultado dessas características é um baixo indicador para Blumenau e um alto indicador para Witmarsum, 74º e 18º lugar respectivamente no ranking de prioridades, respectivamente.

Em geral busca-se investir nas grandes cidades, geralmente situadas mais próximas do exutório das bacias. Segundo Teixeira; Heller (2001), a priorização dos investimentos no setor de saneamento tem privilegiado critérios empíricos e demandas políticas. Considerando que os recursos financeiros muitas vezes são escassos, a problemática pode ser agravada por más escolhas dos gestores.

Os investimentos em esgotamento sanitário normalmente são direcionados às populações urbanas. Tem-se a impressão de que a problemática está no esgoto proveniente das cidades, contudo, na tabela 2 é possível visualizar que o processo de investimentos deve ocorrer de forma inversa, priorizando as áreas rurais da bacia. Dos 46 municípios analisados com áreas urbanas e rurais, apenas o município de Rodeio teve indicador maior para sua área urbana em relação à sua área rural. No restante, as áreas rurais apresentaram indicadores superiores quando comparadas com as áreas urbanas de seus municípios. Isto se deve, principalmente, ao fato de que os custos envolvidos para a promoção de esgotamento sanitário é mais baixo em áreas rurais do que em áreas urbanas.

Interessante ressaltar que neste trabalho somente foram quantificados os benefícios através da melhoria na qualidade das águas, contudo, outras variáveis poderiam ser incluídas, como por exemplo, a saúde pública (Neves; Neves, 2003; Teixeira; Heller, 2003; Libânio et al., 2005), a ecologia aquática (Romera; Silva, 2000), os indicadores ambientais (Silva et al., 2008) e outras que englobam diversos critérios (Teixeira; Heller, 2001).

### Regiões prioritárias

Os custos estimados para implantação de sistemas de esgotamento sanitário nos municípios localizados na bacia do rio Itajaí são da ordem de um bilhão de reais (FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ, 2010). Eles devem ser distribuídos ao longo do horizonte de planejamento, para alcance

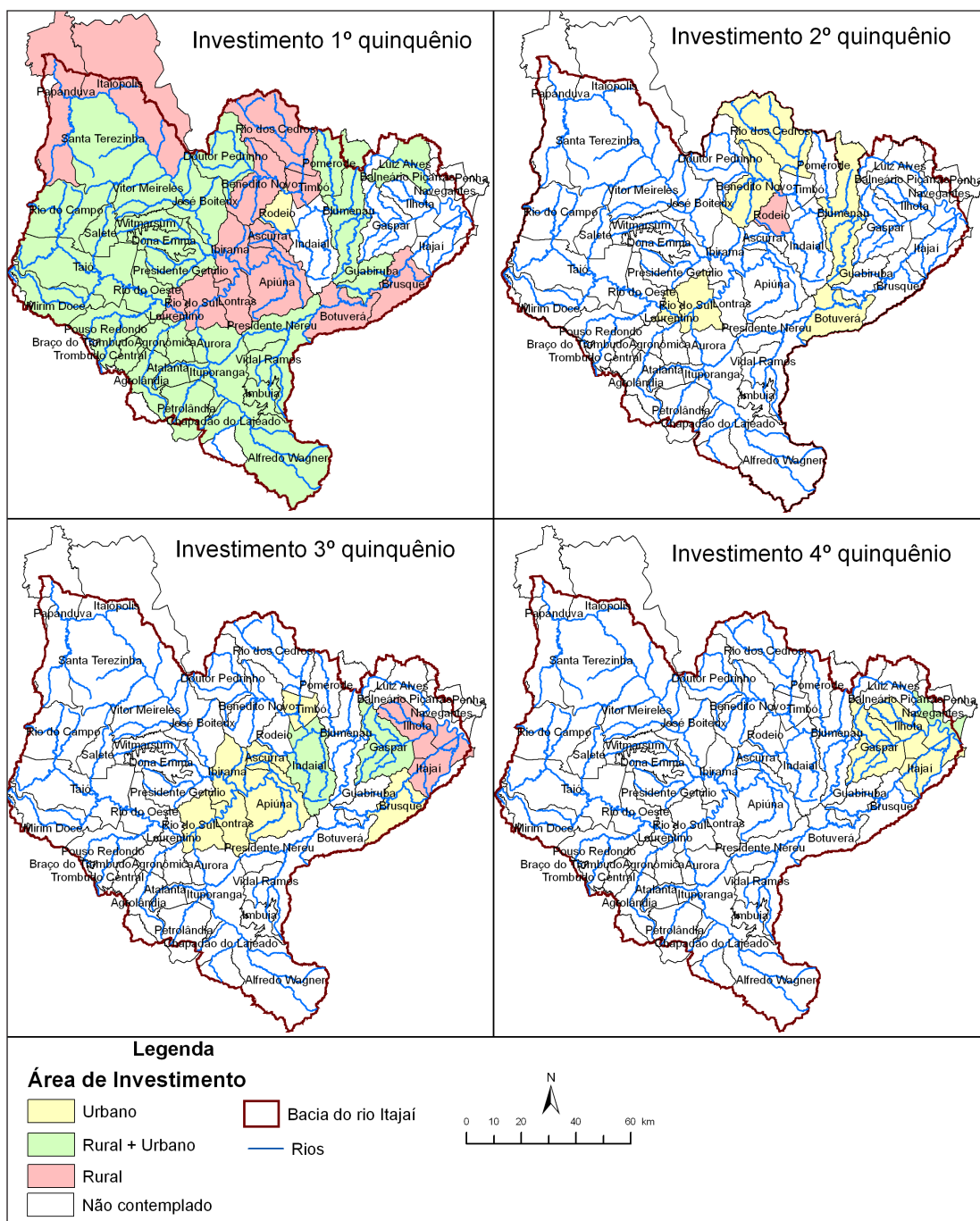
progressivo da qualidade das águas. O horizonte de investimento foi fixado em vinte anos, com aplicação de valores iguais em cada quinquênio. Na figura 5 são apresentadas as distribuições dos investimentos ao longo da bacia nos quatro quinquênios. Nota-se que no primeiro quinquênio os investimentos deverão ser realizados nos municípios situados no trecho superior da bacia. Eles abrangem os pequenos municípios, tanto as regiões habitacionais urbanas quanto as rurais. Para Papanduva e Itaiópolis, localizados no extremo norte da bacia, foram consideradas apenas as regiões habitacionais rurais, porque as áreas urbanas situam-se em outra bacia. No trecho intermediário da bacia, no primeiro quinquênio são efetuados investimentos nas regiões habitacionais rurais dos municípios de Brusque e Botuverá.

No segundo quinquênio iniciam-se os investimentos em esgotamento sanitário de dois grandes municípios: Rio do Sul, situado no trecho superior da bacia, e Blumenau, situado no trecho médio da bacia. O primeiro município é o quarto em termos populacionais, mas é o 80º no valor do indicador, enquanto o segundo município é o primeiro em tamanho da população e o 74º no indicador da região populacional urbana. No quarto quinquênio, os investimentos serão concentrados nos municípios de Gaspar (6ª população), Ilhota (16ª população), Itajaí (2ª população) e Navegantes (5ª população) situados mais próximos do exutório da bacia.

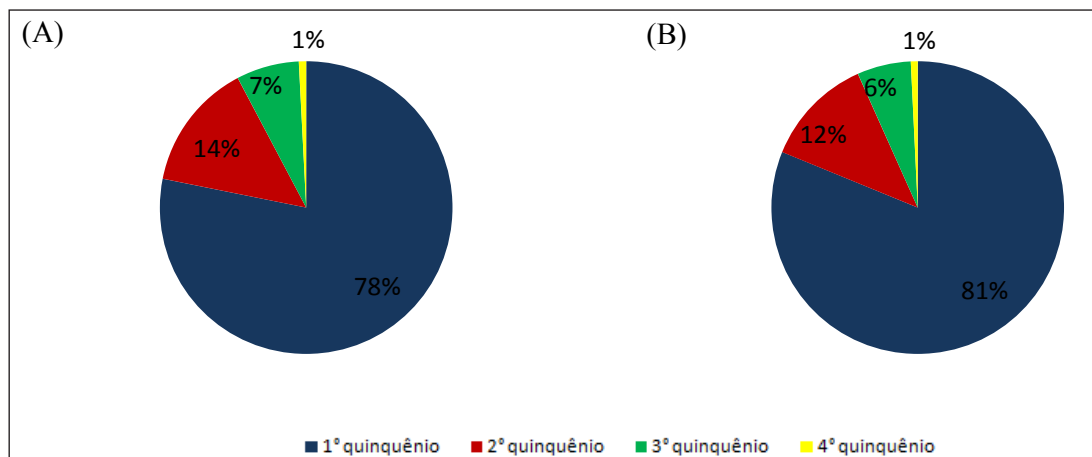
### Eficiência da priorização de investimentos proposta

Foi testada a hipótese de que a priorização nos investimentos seja respeitada na íntegra. Quando são comparados os percentuais de melhoria atingida na qualidade de água em termos de concentração da DBO<sub>5,20°C</sub>, constata-se que nos cinco primeiros anos (25% do investimento total) ocorrerá uma redução da ordem 78% do valor total a reduzir. Para as concentrações de coliformes termotolerantes a redução alcançada é de 81% do total a reduzir. A distribuição das melhorias de qualidade das águas na bacia, com os investimentos realizados em cada quinquênio, são apresentados na figura 6.

Silva et al (2008), estudando priorização de investimentos em saneamento básico, com base em um indicador de salubridade ambiental, constataram que investindo 36,68% do valor total disponível, três das cinco comunidades estudadas alcançam a situação de “Salubridade Aceitável”. Eles demonstraram que



**FIGURA 5. Proposta de investimento por quinquênio na bacia do rio Itajaí.**



**FIGURA 6.** Percentual de abatimento da concentração de DBO5,20°(A) e coliformes termotolerantes (B), em relação ao total possível de abatimento em 20 anos.

o modelo de priorização de investimentos proposto é eficiente e interessante para maximização dos benefícios gerados ao conjunto da bacia e da sociedade envolvida.

Vale ressaltar que os investimentos analisados estão relacionados às melhorias da qualidade das águas proporcionadas pelo tratamento dos esgotos sanitários. Mas estes investimentos não são suficientes para atendimento dos padrões de qualidade estabelecidos pelo enquadramento. Além disso, é necessário lembrar que duas importantes fontes de degradação da qualidade das águas, os resíduos orgânicos gerados pelas atividades agropecuárias e a poluição de origem difusa, não foram consideradas (Carpenter et al., 1998).

## CONCLUSÕES

Com o objetivo de propor uma metodologia baseada em cenários de simulação, este trabalho, buscando otimizar a relação entre a melhoria na qualidade de água e a aplicação de recursos financeiros, desenvolveu a espacialização de investimentos prioritários em esgotamento sanitário para a bacia do rio Itajaí.

O método proposto pode apontar as áreas prioritárias para receber investimento, de maneira a auxiliar no processo de gestão da melhoria da qualidade das águas. Os resultados obtidos revelam a potencialidade

da metodologia, sendo possível a sua utilização na construção de uma política de investimentos em esgotamento sanitário no âmbito da bacia.

É importante considerar que os valores adotados no levantamento de custos influenciaram os resultados finais, pois a diferença existente entre os custos envolvidos na coleta e no tratamento de esgotos em áreas rurais e urbanas é significativa. Desta maneira, estudos posteriores devem considerar dados mais precisos e específicos quanto ao custeio das obras de saneamento, possibilitando, assim, a obtenção de resultados igualmente satisfatórios.

Por fim, o método aqui concebido estabelece uma política de investimentos e consequente promoção do tratamento de esgoto na bacia do rio Itajaí, pautada na maximização da relação benefício/custo, tendo como principal objetivo a melhoria na qualidade da água em toda bacia.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Câmara Técnica de Planejamento do Comitê do rio Itajaí pela atenção, apoio e sugestões prestadas. Aos engenheiros Cristiano Galvão e Evelyn Zucco pelo apoio técnico fornecido. E ao prof. Dr Adilson Pinheiro pelo acompanhamento e orientação. Todos tiveram contribuição fundamental para o desenvolvimento da pesquisa.

## Referências

- AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS (BRASIL). 2009. **Implementação do enquadramento em bacias hidrográficas no Brasil; Sistema nacional de informações sobre recursos hídricos – Snirh no Brasil: arquitetura computacional e sistêmica**. Brasília: ANA, 2009.
- ARCEIVALA, S. J. 1981. **Wastewater Treatment and Disposal**. New York: Marcel Dekker Inc, 292p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1997. **NBR 13969: tanques sépticos – unidades de tratamento complementar e disposição final dos efluentes líquidos – Projeto, construção e operação**. Rio de Janeiro.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. 1993. **NBR 7229: projeto, construção e operação de sistemas de tanques sépticos**. Rio de Janeiro.
- BASTOS, R. K. X.; BEVILACQUA, P. D.; KELLER, R. 2003. **Organismos patogênicos e efeitos sobre a saúde humana**. In: GONÇALVES, R. F. (coord.). **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, projeto PROSAB/FINEP. p. 27-88.
- BRASIL. 1997. **Lei Federal nº9.433, de 8 de janeiro de 1997 que institui a Política Nacional de Recursos Hídricos, cria o Sistema Nacional de Gerenciamento de Recursos Hídricos**. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/Leis/L9433.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/Leis/L9433.htm). Acesso em: 12 jan. 2010.
- BRASIL. 2007. **Lei Federal nº11.445, de 5 de janeiro de 2007 que estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico**. Disponível em [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/\\_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm). Acesso em: 10 fev. 2010.
- CAMARGOS, L. M. M. (coord.). 2004. **Plano diretor de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio das Velhas: resumo executivo**. Belo Horizonte: Instituto Mineiro de Gestão das Águas, Comitê da Bacia Hidrográfica do Rio das Velhas, 2005.
- CARPENTER, S. R.; CARACO, N. F.; CORRELL, D. L.; HOWARTH, R. W.; SHARPLEY, A. N.; SMITH, V. H. 1998. **Nonpoint pollution of surface waters with phosphorus and nitrogen**. *Ecological Applications*. Vol. 8, n.3, p.559-568. Ecological Society of America.
- CARVALHO R. C.; KAVISKI E. 2009. **Modelo de Auxílio à Tomada de Decisões em Processos de Despoluição de Bacias Hidrográficas**. *Revista Brasileira de Recursos Hídricos*. Vol. 14, n.4, p.17-27. Associação Brasileira de Recursos hídricos. [www.abrh.org.br](http://www.abrh.org.br).
- CHRISTOFIDIS, M. 2006. **O enquadramento participativo de corpos d'água como instrumento da gestão de recursos hídricos com aplicação na bacia do rio Cubatão Sul – SC**. Florianópolis: Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, 2006. 176 p. (Dissertação de Mestrado).
- FUNDAÇÃO AGÊNCIA DE ÁGUA DO VALE DO ITAJAÍ. 2010. **Plano de Recursos Hídricos da Bacia Hidrográfica do Rio Itajaí**. Disponível em: <http://www.comiteitajai.org.br/index.php/plano/recursos/hidricos/resumo-do-plano.html>. Acesso em 20 mai. 2010.
- GONÇALVES, R. F. (coord.). 2003. **Desinfecção de efluentes sanitários**. Rio de Janeiro: ABES, projeto PROSAB/FINEP. 422p.
- HAASE, J.; SILVA, M. L. C. 1998. **Participação da sociedade no processo de enquadramento dos recursos hídricos: experiência no Rio Grande do Sul, Brasil**. In: Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos, 1998, Gramado, 5 a 8/out/1998. CD-ROM.
- JUNGBLUT, M. (coord.). 2008. **Relatório temático B.2 – Proposta de enquadramento dos recursos hídricos superficiais da bacia do rio Caí**. Disponível em [http://www.comitecai.com.br/plano/down\\_RTb2.html](http://www.comitecai.com.br/plano/down_RTb2.html). Acesso em: 20 jan. 2010.
- KONDAGESKI, J. H.; GOLÇALVES R. C.; GARCIA, C. S.; ANDREOLI N. L. C. V. 2009. **Seleção de municípios candidatos a receber investimento em saneamento, segundo critérios ambientais, sociais e econômicos – estudo de caso: Unidades Hidrográficas do Alto Ivai e Baixo Ivai/Paraná 1**. In: XVIII Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2009, Campo Grande. Anais. Campo Grande: ABRH, 22 a 26/Nov/2009, CD-ROM.
- LEITE, E. H.; HAASE, J.; PINEDA, M. D.; SILVA, M. L. C.; COBALCHINI, M. S. 1998. **Qualidade dos recursos hídricos superficiais da bacia do Guaíba – subsídio para o processo de enquadramento**. In: Simpósio Internacional sobre Gestão de Recursos Hídricos, 1998, Gramado, 5 a 8/out/1998. CD-ROM.
- LIBÂNIO, P. A. C.; CHERNICHARO, C. A. L.; NASCIMENTO, N. O. 2005. **A dimensão da qualidade de água: avaliação da relação entre indicadores sociais, de disponibilidade hídrica, de saneamento e de saúde pública**. *Revista Engenharia Sanitária e Ambiental*. Vol. 10, n.3, p.219-228. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. [www.abes-dn.org.br](http://www.abes-dn.org.br).
- MATOS, A. 2002. **Tratamento de resíduos agroindustriais**. In: Encontro de preservação de mananciais da Zona da Mata Mineira, Viçosa 2002. Anais cursos pré-encontro, ABES-MG. p.105-157.
- METCALF & EDDY. 2003. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4 ed. Boston: McGraw-Hill, 1819p.
- NEVES, C.; NEVES, M. S. 2003. **Proposta Metodológica para Seleção e Hierarquização de Projetos de Saneamento**. In: X Simpósio em Engenharia de Produção, 2003, Bauru. Anais.... Bauru: UNESP, p.1-10.
- OPPA, L. F. 2007. **Utilização de modelo matemático de qualidade da água para análise de alternativas de enquadramento do rio Vacacaí Mirim**. Santa Maria: Curso de Pós –graduação em Engenharia Civil, Universidade Federal de Santa Maria, 2007, 130p. (Dissertação de Mestrado).
- ROMERA e SILVA, P. A. 2000. **Contribuição para o Estabelecimento de Metodologia de Suporte à Decisão em Políticas de Saneamento**. 192 f. Rio Claro: Curso de Pós-graduação em Geociência e meio Ambiente. Instituto de Geociências e Ciências Exatas, Universidade Estadual de Paulista, 2000, 192p. (Tese de doutorado).
- SANTA CATARINA. 2006. **Regionalização de vazões das bacias hidrográficas estaduais do estado de Santa Catarina, volume 1 – texto**. Disponível em <http://www.aguas.sc.gov.br/>. Acesso em 10 dez. 2009.

- SANTA CATARINA. 2009. **Lei estadual nº 14.675, de 13 de abril de 2009 que institui o Código Estadual do Meio Ambiente e estabelece outras providências**. Disponível em [http://www.sc.gov.br/downloads/Lei\\_14675.pdf](http://www.sc.gov.br/downloads/Lei_14675.pdf). Acesso em: 30 jan. 2010.
- SARDINHA, D. S.; CONCEIÇÃO, F. T.; SOUZA, A. D. G.; SILVEIRA, A.; JULIO, M.; GONÇALVES, J. C. S. I. 2008. **Avaliação da qualidade da água e autodepuração do ribeirão do Meio, Leme (SP)**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.13, n.3, p.329-338. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. [www.abes-dn.org.br](http://www.abes-dn.org.br).
- SCHVARTZMAN, A. S.; NASCIMENTO, N. O.; VON SPERLING, M. 2002. **Outorga e Cobrança pelo Uso de Recursos Hídricos: Aplicação à Bacia do Rio Paraopeba, MG**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 7, n.1, p.103-122. Associação Brasileira de Recursos hídricos. [www.abrh.org.br](http://www.abrh.org.br).
- SILVA, N. V. S.; NASCIMENTO, R. Q.; SILVA, T. C. 2008. **Modelo de priorização de investimentos em saneamento básico utilizando programação linear com base em indicadores ambientais**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.13, n.2, p.171-180. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. [www.abes-dn.org.br](http://www.abes-dn.org.br).
- SILVA, S. C.; RIBEIRO, M. M. R. 2006. **Enquadramento dos corpos d'água e cobrança pelo uso da água na bacia do rio Pirapama – PE**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.11, n.4, p.371-379. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. [www.abes-dn.org.br](http://www.abes-dn.org.br).
- TEIXEIRA, J. C.; HELLER, L. 2001. **Modelo de Priorização de Investimentos em Saneamento com ênfase em Indicadores de Saúde: Desenvolvimento e Aplicação em uma Companhia Estadual**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.6, n.3, p.138-146. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. [www.abes-dn.org.br](http://www.abes-dn.org.br).
- TEIXEIRA, J. C.; HELLER, L. 2003. **Priorização de Investimentos em Saneamento baseada em Indicadores Epidemiológicos e Financeiros**. Revista Engenharia Sanitária e Ambiental. Vol.8, n.3, p.187-195, 2003. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. [www.abes-dn.org.br](http://www.abes-dn.org.br).
- TSUTIYA, M. T.; ALEM SOBRINHO, P. 1999. **Coleta e transporte de esgoto sanitário**. São Paulo: Escola Politécnica da USP, 547p.
- VON SPERLING, M. 2005. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos**. 3 ed. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG: Belo Horizonte - MG, 452 p.
- VON SPERLING, M. 2007. **Estudos e modelagem da qualidade da água de rios**. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental – UFMG: Belo Horizonte - MG, 588 p.
- VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A. L. 2002. **Urban wastewater treatment technologies and implementation of discharge standards in developing countries**. Urban Water. Vol.4, n.1, p. 105-114, mar/ 2002.
- YONY SAMPAIO, M. M. A. M; CIRILO, J. A.; CAI, X. 2008. **Modelo Econômico-hidrológico Integrado para gestão de bacias hidrográficas: Abordagem Piece-by-Peice para incorporar a capacidade de autodepuração dos rios e limites de trofia dos reservatórios**. Revista Brasileira de Recursos Hídricos. Vol. 13, n.1, p.43-55. Associação Brasileira de Recursos hídricos. [www.abrh.org.br](http://www.abrh.org.br).

**Pétrick Anderson Soares** Engenheiro Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental (FURB). Bolsista CAPES. e-mail: [petrickps@gmail.com](mailto:petrickps@gmail.com)

**Markus Zinkhahn** Acadêmico do curso de Engenharia Ambiental, Universidade de Stuttgart, Alemanha. e-mail: [markus.zinkhahn@gmail.com](mailto:markus.zinkhahn@gmail.com)

**Beate Frank** Física. Doutora em Engenharia de Produção pela Universidade Federal de Santa Catarina. e-mail: [frank.beate@gmail.com](mailto:frank.beate@gmail.com)

**Odirllei Fistarol** Engenheiro Florestal. Mestre em Engenharia Ambiental. e-mail: [engfistarol@gmail.com](mailto:engfistarol@gmail.com)