



ARTIGO

Avaliação de sistema de leito cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl. para tratamento de águas urbanas poluídas

Denise Teixeira Bregunce¹, Bruno Vitor Veiga², Leila Teresinha Maranhão³ e Selma Aparecida Cubas^{4*}

Recebido: 16 de novembro de 2009

Recebido após revisão: 02 de agosto de 2010

Aceito: 25 de novembro de 2010

Disponível on-line em <http://www.ufrgs.br/seerbio/ojs/index.php/rbb/article/view/1430>

RESUMO: (Avaliação de sistema de leito cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl. para tratamento de águas urbanas poluídas). Este trabalho teve como objetivo avaliar um sistema de tratamento de água de leito cultivado, para tratamento de águas poluídas com água residuária urbana, como é o caso do Ribeirão dos Müller (Curitiba, PR). No sistema usou-se a macrófita *Sagittaria montevidensis* para remoção de matéria orgânica e coliformes. Inicialmente foi feita uma avaliação da água do Ribeirão dos Müller, que atualmente apresenta características semelhantes a de esgoto doméstico, com DQO igual a $250,82 \pm 186,48 \text{ mg.L}^{-1}$, OD igual a $1,14 \pm 0,94 \text{ mg.L}^{-1}$ e com valores máximos de 16.10^6 para e coliforme totais e 10.10^6 para coliforme termotolerantes, com presença de *Escherichia coli*. O sistema foi monitorado e operado em duas etapas e constituiu-se basicamente de captação, poço de sucção e recalque, reservatório de distribuição e o leito cultivado. O filtro, que constituiu o leito cultivado, era de fluxo ascendente, composto por camadas de pedra brita 5, pedra brita 2, porcelana e areia média, que serviu de suporte para a planta. O tempo de detenção hidráulica (TDH) do sistema foi de 10h e a vazão de 3.600 L.d^{-1} . O pH apresentou variação de 5,8 a 8,9, com estabilidade para alcalinidade e ácidos voláteis. A eficiência global no sistema em DQO foi correspondente a $63,76 \pm 14,30\%$, na primeira etapa e $62,93 \pm 15,57\%$ na segunda etapa. Enfim, o sistema mostrou-se indicado para o tratamento de águas urbanas poluídas, por apresentar características de um ambiente natural, além de ser considerado um sistema com baixo custo de implantação e operação.

Palavras-chave: Tratamento, águas residuárias, qualidade da água, águas urbanas poluídas.

ABSTRACT: (Evaluation of wetland system with macrophyte *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl. for polluted urban water treatment). This work aimed to evaluate a bed cultivated water treatment system, designed for the treatment of water polluted by urban wastewater, such as Ribeirão dos Müller (Curitiba – PR). The system used the macrophyte *Sagittaria montevidensis* for both organic matter and coliforms removal. An initial evaluation of the water from the Ribeirão dos Müller, who currently presents similar characteristics to domestic wastewater, with average COD equal $250.82 \pm 186.48 \text{ mg.L}^{-1}$, OD of $1.14 \pm 0.94 \text{ mg.L}^{-1}$ and average number of 16.10^6 for total coli forms (CT) and 10.10^6 for thermo-tolerant coli forms (CF), with *Escherichia coli*. The system was monitored and operated during two different periods of time. The main components of the system are water intake, transfer pump, distribution reservoir and the vegetated (cultivated) bed. The filter, that constitutes the cultivated bed, was composed by layers of 5-crushed stone, 2-crushed stone, porcelain and medium sand, and was also used to support the plants. The system hydraulic detention time (HDT) resulted about 10 hours for a 3.600 L.d^{-1} flow. The pH values ranged from 5.8 to 8.9 with stability for alkalinity and volatile acids. The average COD removal efficiency was $63.76 \pm 14.30\%$ for the first monitoring period and $62.93 \pm 15.57\%$ for the second one. In short, the results indicated for the polluted urban water treatment for presenting characteristics of a natural environment, beyond being considered a system with low cost of implantation and operation.

Key words: Treatment, wastewater, water quality, polluted urban water.

INTRODUÇÃO

A má utilização dos recursos naturais pela população resulta em poluição ambiental, que vem a ser uma alteração ocorrida nas características físicas, químicas ou biológicas do ar, do solo ou da água, podendo gerar prejuízo à saúde, à sobrevivência ou às atividades dos seres humanos. No Brasil, entre os principais impactos à água, principalmente superficiais, está o lançamento de esgotos sanitários e industriais sem tratamento, resultado do elevado grau de urbanização, que gera sérios proble-

mas de degradação ambiental e coloca em risco a saúde da população (Tundisi 2005).

O Ribeirão dos Müller situa-se na região oeste do município de Curitiba, PR, é um dos mais importantes afluentes do Rio Barigui, que pertence à Bacia Hidrográfica do Alto Iguaçu. Corta vários bairros da cidade e atravessa todo o Campus da Universidade Positivo. Está enquadrado, segundo a Portaria Nº 92, de 20 de setembro de 1992, da antiga Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente do Estado do Paraná

1. Bióloga pela Universidade do Grande Rio (UNIGRANRIO). Mestre em Gestão Ambiental pela Universidade Positivo (UP).

2. Professor Titular do Curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo (UP). Engenheiro civil pela Universidade de Brasília (UNB). Mestre em Engenharia de Recursos Hídricos e Ambiental pela Universidade Federal do Paraná (UFPR).

3. Professora Titular do Curso de Mestrado Profissional em Gestão Ambiental e do Curso de Ciências Biológicas da Universidade Positivo (UP). Bióloga pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná (PUC-PR). Mestre em Botânica pela Universidade Federal do Paraná (UFPR). Doutora em Ciências Florestais pela UFPR.

4. Professora Titular do Mestrado Profissional em Gestão Ambiental e do Curso de Engenharia Civil da Universidade Positivo (UP). Engenheira Civil pela Pontifícia Universidade Católica do Paraná e Doutora em Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos (EESC, USP). Rua Professor Viriato Parigot de Souza, 5300, Campo Comprido, CEP 81280-330, Curitiba, PR, Brasil.

* Autor para contato. E-mail: selmacubas@up.edu.br

(SUREHMA 1992), artigo 1º, inciso VII, como classe 3, pois localiza-se a jusante do Parque Barigui e atravessa áreas industriais e de grandes centros urbanos. Atualmente, apresenta elevado grau de poluição, situação comum na maioria dos rios urbanos.

Tundisi (2003) realizou um levantamento de dados e identificou que entre várias metodologias empregadas para a recuperação de bacias hidrográficas urbanas com a capacidade de auto-sustentação destaca-se a fitorremediação.

Esta técnica já é utilizada em vários países (Pegorini *et al* 2006; Pompêo 2008) e consiste na descontaminação de água ao utilizar como agentes de despoluição plantas e microbiota associada às suas raízes. Dessa forma, buscou-se, no presente estudo, uma forma para tratamento de água urbana poluída, como é o caso do Ribeirão dos Müller, por meio da construção de um sistema piloto de leito cultivado (wetland construída) de fluxo vertical ascendente, utilizando a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schldtl., comum nos banhados do Município de Curitiba, PR, Brasil.

O sistema de tratamento com macrófitas pode ser desenvolvido de forma natural ou artificial. Sistema natural é um termo utilizado para definir grandes áreas (habitats) úmidas, conhecidas por várias denominações: banhados, pântanos, brejos, zonas alagadiças. Nessas áreas, podem ocorrer inundações periódicas ou permanentes, assim o solo saturado propicia um ambiente favorável para o desenvolvimento de plantas aquáticas, microrganismos e animais (Anjos 2003). O sistema construído é uma alternativa para tratamento de águas residuárias de origem doméstica, agrícola e industrial (Dias 2006). Esse sistema é, geralmente, composto por filtro de pedra e areia plantado com macrófitas, com controle no tempo

de retenção hidráulica (TDH) (Meyer *et al* 2006). A utilização de sistema plantado de fluxo vertical construído constitui uma alternativa eficiente na prática da infiltração da água residuária no solo, gerando melhoria do efluente para liberação no meio aquático (Brix & Arias 2005).

MATERIAL E MÉTODOS

Construção e operação do sistema

O sistema piloto (Fig. 1) foi constituído de captação, poço de sucção, recalque, reservatório de distribuição e sistema construído cultivado. A captação da água do Ribeirão foi feita por uma tubulação de PVC, com diâmetro nominal de 100 mm e 15 m de comprimento. Para o poço de sucção, foi adotada uma manilha de concreto, com diâmetro de 1,20 m, com assentamento vertical e com embasamento de rocha local, localizado à margem esquerda do Ribeirão dos Müller. A linha de recalque que conduziu a água do Ribeirão até as caixas de água foi de constituída por uma mangueira de PVC flexível preta de 45mm de diâmetro. A bomba de recalque usada foi da marca Schneider modelo BCS-C5. Foram dois reservatórios de armazenamento de água de 500 L cada um.

O leito cultivado foi construído em uma piscina em fibra de vidro de 2,80 m de diâmetro e 0,85 m de altura. A ligação entre o reservatório e o sistema cultivado foi feita por uma tubulação de PVC flexível de diâmetro nominal (DN) de 40 mm. A distribuição do fluxo dentro do sistema cultivado foi ascendente, através de tubulações de PVC rígido com DN 40 mm, colocadas em forma de um retângulo. Para o retorno da água do sistema cultivado para o Ribeirão dos Müller foi utilizada uma tubulação de PVC flexível com DN de 100 mm.

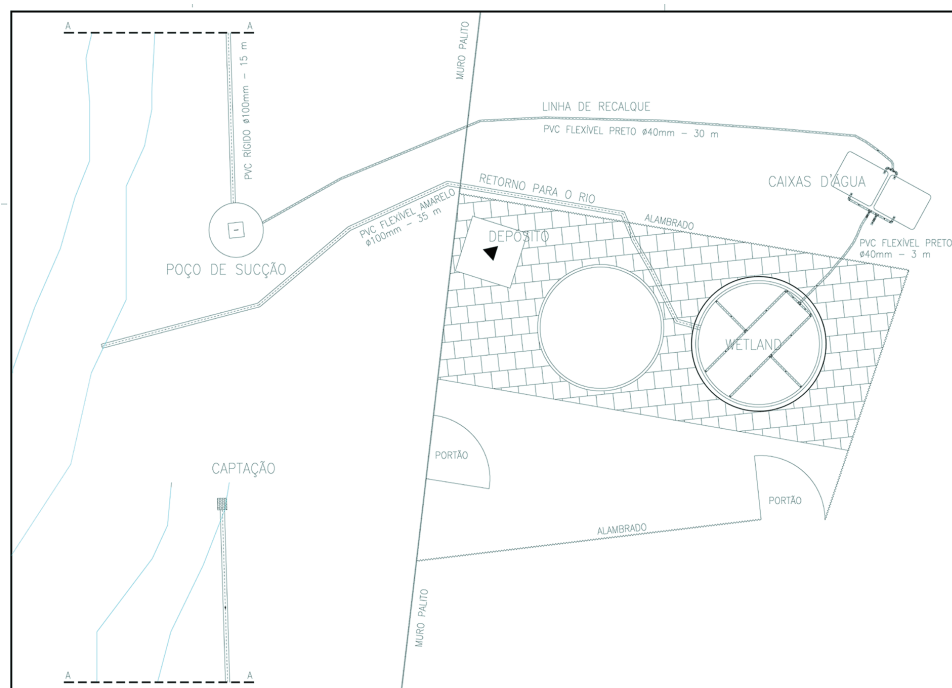


Figura 1. Esquema completo do sistema Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schldtl.

Material filtrante

As camadas filtrantes (Fig. 2) foram dispostas de forma ascendente conforme descrito a seguir: uma base de brita número 5 com 30 cm de espessura (camada inferior), uma camada de porcelana com 2,5 cm, uma camada de brita número 2 com 15 cm de altura, mais uma camada de porcelana com 2,5 cm e, como última camada (camada superior), areia média, com 15 cm de espessura. A camada de porcelana foi utilizada para não ocorrer a colmatção do sistema substituindo a manta geotêxtil.

Pontos de coletas das amostras

Para o monitoramento foram coletadas amostras, duas vezes por semana, de cinco pontos: entrada do sistema, piezômetros 1, 2 e 3 e saída do sistema. Os piezômetros, constituídos por tubos de PVC de 40 mm, foram instalados entre as camadas, assim dispostos em relação ao fundo: piezômetro 1: a 15 cm; piezômetro 2: a 40 cm e piezômetro 3: a 57,5 cm (Fig. 2).

Operação e monitoramento do sistema de leito cultivado

O sistema de leito cultivado foi operado em duas etapas sendo utilizada com vazão contínua de 3600L.d⁻¹ e TDH de 10h, com volume útil de 1500L. A primeira etapa foi realizada entre Dezembro de 2006 e Março de 2007 (período de verão) e a segunda etapa foi entre Maio e Agosto de 2007 (período de inverno). O sistema foi alimentado por gravidade e com fluxo vertical ascendente, passando pelos materiais filtrantes e pela vegetação. O efluente tratado foi enviado ao Ribeirão dos Müller através de uma canaleta de concreto com 5% de inclinação, construída ao redor do sistema.

Macrófita utilizada

A macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl.

foi escolhida por apresentar aerênquima bem desenvolvido, que é um tipo de tecido com espaços intercelulares amplos, o que favorece o transporte de oxigênio da atmosfera às raízes e sua disponibilidade na rizosfera. As mudas da macrófita foram coletadas em ambiente natural, em um banhado localizado no bairro Umbará, Curitiba, PR. Na primeira etapa, foram plantadas doze mudas e, na segunda, dezoito mudas, totalizando 30 plantas no sistema.

Parâmetros analisados

Os parâmetros físico-químicos e microbiológicos seguiram as rotinas descritas no de acordo com o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2000). As análises de: Temperatura, Cor, Turbidez, pH e Oxigênio Dissolvido (OD), foram feitas *in loco*; Sólidos totais (ST), Sólidos Totais Voláteis (STV), Sólidos Totais Fixos (STF), Sólidos Suspensos Totais (SST), Sólidos Suspensos Voláteis (SSV), Sólidos Suspensos Fixos (SSF), através do método gravimétrico; Nitrogênio Amônia (NH₄) pelo método de microKjeldahl; Demanda Bioquímica de Oxigênio (DQO), por refluxo fechado; Coliformes Totais (CT), Coliformes Termotolerantes ou Fecais (CF) e *Escherichia coli*, foi utilizada a técnica dos tubos múltiplos.

Também foram feitas análises de Alcalinidade Total e a Bicarbonato (AB), seguindo a metodologia descrita por Ripley *et al.* (1986) e de Ácidos Voláteis Totais (AVT), de acordo com a metodologia descrita por Dilallo & Albertson (1961).

Água residuária afluenta

Como água residuária ou afluenta, foram utilizadas as águas do Ribeirão dos Müller, afluenta do Rio Barigui, localizado na oeste do Município de Curitiba. O Ribeirão dos Müller é considerado um rio totalmente urbano, com uma bacia hidrográfica de, aproximadamente, 10,29km²

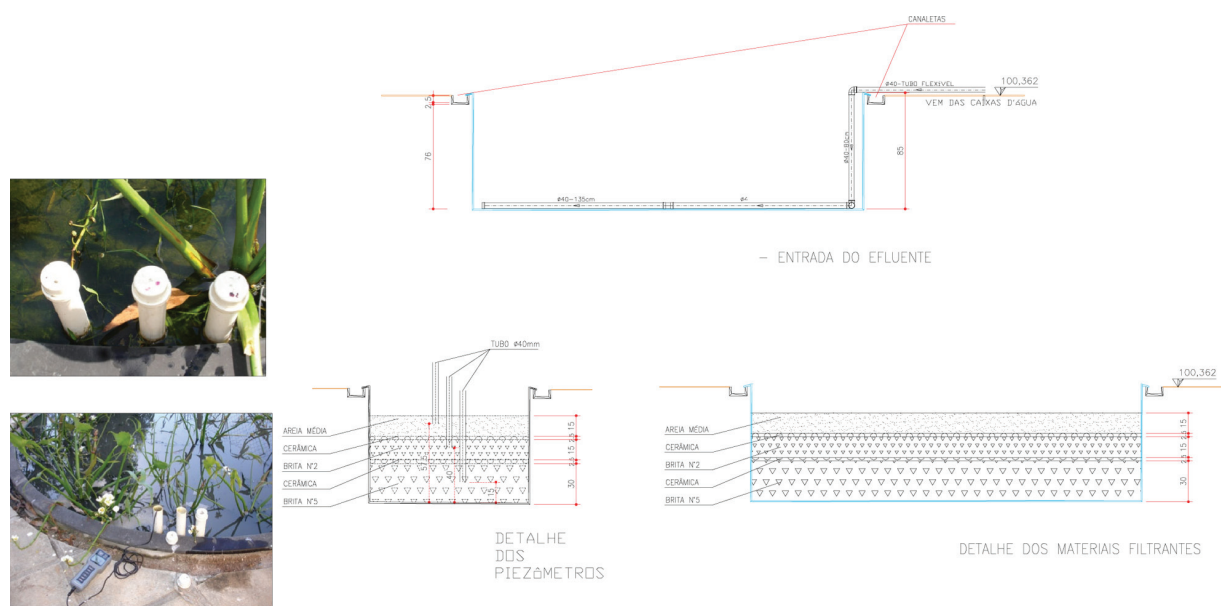


Figura 2. Detalhe da camada filtrante e dos piezômetros no sistema Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl.

Tabela 1. Valores mínimos, máximos e médias aritméticas dos parâmetros físico-químicos da água do Ribeirão dos Müller, obtidos durante o período de monitoramento, entre Dezembro de 2006 e Agosto de 2007.

Parâmetros	Valores		
	Mín.	Máx.	Média e Desvio Padrão
Cor (uC)	10,0	55,0	26,8 ± 11,2
Turbidez (UNT)	13,7	159,0	46,6 ± 34,1
T (°C)	13,3	23,1	17,2 ± 2,2
ST (mg.L ⁻¹)	100,1	1.180,3	472,2 ± 324,8
STV (mg.L ⁻¹)	20,2	680,3	168,9 ± 145,4
STF (mg.L ⁻¹)	10,2	1.100,5	315,2 ± 287,4
SST (mg.L ⁻¹)	60,1	200,2	105,0 ± 43,1
SSV (mg.L ⁻¹)	20,1	140,3	56,7 ± 39,2
SSF (mg.L ⁻¹)	10,4	140,3	48,3 ± 34,9
SDT (mg.L ⁻¹)	20,2	1.120,0	329,4 ± 351,2
OD (mg.L ⁻¹)	0,5	3,9	1,1 ± 0,9
DQO (mg.L ⁻¹)	51,0	676,0	250,8 ± 186,5
pH	6,7	7,8	7,3 ± 0,24
AB (mg CaCO ₃ .L ⁻¹)	19,1	48,3	35,2 ± 9,12
AVT (mg AcH.L ⁻¹)	18	99	37,9 ± 19,5
N (mg NH ₄ .L ⁻¹)	7,2	19,8	15,4 ± 3,6
P (mg PO ₄ .L ⁻¹)	1,4	5,8	3,9 ± 1,4

de área, que abrange uma região composta por residências, indústrias, comércio e atravessa toda a extensão do Campus da Universidade Positivo. A água para alimentar o sistema foi coletada em local de remanso, onde foi instalado um sistema de captação (coordenadas 25°26'31" S e 49°21'26" O).

Característica da água do Ribeirão dos Müller

Análises da água do Ribeirão dos Müller foram rea-

lizadas durante o mesmo período de análises do Leito Cultivado. Na tabela 1, são apresentadas as características da água do Ribeirão dos Müller utilizada como substrato.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados dos parâmetros físico-químicos analisados durante os dois períodos de monitoramento estão apresentados na tabela 2.

Foi avaliada a cor e a turbidez da água na entrada do sistema, nos piezômetros e na saída do sistema. Os resultados de turbidez, que causa a interferência na dispersão da luz na água, e os resultados de cor indicaram que a maior redução ocorreu na camada mais inferior, onde estava localizado o piezômetro 1, esta camada era composta por 30 cm de pedra brita Nº 5 e fazia o tratamento inicial da água bruta vinda do reservatório. Nesta camada, as eficiências de remoção de cor e turbidez foram superiores a 58%. Entre as camadas 2 e 3, não ocorreram variações significativas e, na saída do sistema, houve, em alguns casos, aumento da cor e turbidez, que pode ter sido ocasionado pela presença de algas e pelo aparecimento do microcrustáceo *Daphnia* sp. Em relação à presença de organismos do fito e zooplâncton, foi possível observar um comportamento cíclico, um ou dois dias com formação bem intensa de fitoplâncton, seguida pela formação muito intensa por, aproximadamente, um dia de *Daphnia* sp.

As *Daphnia* sp. fazem parte do zooplâncton e ocupam uma importante posição na cadeia alimentar por serem consumidoras de fitoplâncton (Esteves 1998). A sua presença pode ser um indicativo da qualidade da água

Tabela 2. Valores médios dos parâmetros físico-químicos analisados durante as duas etapas de monitoramento do Leito Cultivado com a macrofita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schldtl.

LEITO CULTIVADO - PRIMEIRA ETAPA						
Parâmetro	Reservatório	Piezômetro			Eficiência	
	Entrada	1	2	3	Saída	E (%)
Cor (uC)	30,0 ± 31,0	13,0 ± 5,0	11,0 ± 3,0	11,0 ± 5,0	22,0 ± 13,0	28,4 ± 40,0
Turbidez (uT)	61,8 ± 26,4	22,0 ± 4,8	30,6 ± 5,4	26,4 ± 10,6	34,7 ± 6,0	37,4 ± 21,8
ST (mg.L ⁻¹)	569,3 ± 186,9	327,9 ± 190,7	325,2 ± 209,9	311,9 ± 170,9	294,4 ± 152,0	43,6 ± 30,3
STV (mg.L ⁻¹)	271,0 ± 179,5	177,5 ± 163,0	154,5 ± 116,9	229,1 ± 177,7	183,5 ± 114,2	34,0 ± 34,3
SST (mg.L ⁻¹)	202,3 ± 51,0	57,1 ± 54,1	54,3 ± 42,0	54,3 ± 44,7	71,4 ± 60,1	61,9 ± 32,0
SSV (mg.L ⁻¹)	158,0 ± 29,6	37,1 ± 48,2	42,9 ± 45,0	44,1 ± 40,0	52,9 ± 55,0	65,5 ± 33,0
DQO (mg.L ⁻¹)	401,5 ± 361,6	192,6 ± 163,2	192,7 ± 167,1	194,0 ± 184,7	143,6 ± 130,1	63,8 ± 14,3
Temperatura (°C)	21,9 ± 2,3	22,5 ± 1,6	22,3 ± 1,7	22,2 ± 2,2	22,3 ± 2,7	---
pH	6,5 - 8,2	6,3 - 8,6	6,3 - 7,7	6,3 - 8,0	6,3 - 8,7	---
OD (mg.L ⁻¹)	1,5 ± 0,2	0,6 ± 0,1	0,6 ± 0,2	1,2 ± 0,1	4,2 ± 0,7	---
LEITO CULTIVADO - SEGUNDA ETAPA						
Parâmetro	Reservatório	Piezômetro			Eficiência	
	Entrada	1	2	3	Saída	E (%)
Cor (uC)	53,0 ± 31,0	22,0 ± 9,0	21,0 ± 9,0	19,0 ± 8,0	18,0 ± 8,0	53,7 ± 30,5
Turbidez (uT)	110,3 ± 62,2	57,2 ± 45,3	57,6 ± 54,1	47,7 ± 43,6	40,1 ± 26,0	60,8 ± 17,8
ST (mg.L ⁻¹)	1284,9 ± 833,1	509,3 ± 406,3	511,0 ± 336,1	381,8 ± 133,8	383,6 ± 131,8	61,7 ± 21,3
STV (mg.L ⁻¹)	599,6 ± 353,4	176,9 ± 156,4	208,7 ± 156,6	213,4 ± 114,3	219,4 ± 125,6	56,1 ± 28,8
SST (mg.L ⁻¹)	366,7 ± 176,2	134,0 ± 73,7	122,6 ± 78,5	130 ± 84,6	110,67 ± 80,7	63,71 ± 31,05
SSV (mg.L ⁻¹)	188,4 ± 128,2	55,3 ± 35,6	63,3 ± 65,4	55,8 ± 49,1	44,0 ± 26,4	62,9 ± 35,6
DQO (mg.L ⁻¹)	360,2 ± 232,2	188,4 ± 135,3	154,4 ± 121,9	136,3 ± 98,6	121,4 ± 85,0	62,9 ± 16,0
Temperatura (°C)	21,9 ± 2,3	22,5 ± 1,6	22,3 ± 1,7	22,2 ± 2,2	22,3 ± 2,7	---
pH	5,8 - 7,5	6,6 - 7,6	6,6 - 8,0	6,5 - 8,0	6,6 - 8,8	---
OD (G.L ⁻¹)	0,5 ± 0,5	0,2 ± 0,1	0,2 ± 0,1	0,5 ± 0,5	3,2 ± 1,3	---

(Serafim Junior *et al* 2003). O Instituto Ambiental do Paraná (IAP) utiliza *Daphnia* spp. em testes ecotoxicológicos para avaliar a qualidade da água (IAP 2007). Flohr *et al.* (2005) utilizaram *Daphnia magna* em teste ecotoxicológico para classificar resíduos industriais. Nos dois casos citados, a presença ou não-morte de *Daphnia* sp. indica melhoria de qualidade da água.

A eficiência de remoção de cor, entre entrada e saída do sistema, na primeira etapa foi de $28,40 \pm 40\%$ e, na segunda etapa apresentou um aumento significativo, com valor médio de $53,70 \pm 30,50\%$. O mesmo ocorreu com os valores de eficiência de remoção de turbidez, que na primeira etapa, manteve-se em torno de $37,40 \pm 21,80\%$ e, na segunda etapa, em torno de $60,80 \pm 17,80\%$.

Para avaliação do sistema quanto à concentração de sólidos, foram realizadas análises de sólidos totais e sólidos suspensos.

Tanto na primeira, quanto na segunda etapa, a concen-

tração de STF foi predominante na entrada do sistema, pois esta é uma característica de águas de rios. Entretanto, na primeira etapa, as eficiências médias de remoção de ST e STV foram iguais a $43,62 \pm 30,34\%$ e $33,97 \pm 34,29\%$, respectivamente. Na segunda etapa, as eficiências médias de remoção corresponderam para ST a $61,68 \pm 21,34\%$ e para STV a $56,11 \pm 28,84\%$, superiores às eficiências alcançadas na primeira etapa.

As eficiências de remoção para sólidos suspensos totais e sólidos suspensos voláteis, nas duas etapas de monitoramento foram próximas. Na primeira etapa, as eficiências de remoção de SST e SSV alcançaram $61,86 \pm 32,04\%$ e $65,51 \pm 32,99\%$, respectivamente. Eficiências semelhantes foram observadas na segunda etapa, com valores médios iguais a $63,71 \pm 31,05\%$ para SST e $62,93 \pm 35,63\%$ para SSV.

Barreto (2005), utilizando sistema plantado com a macrófita *Typha* sp., obteve valor igual a 30,98% de

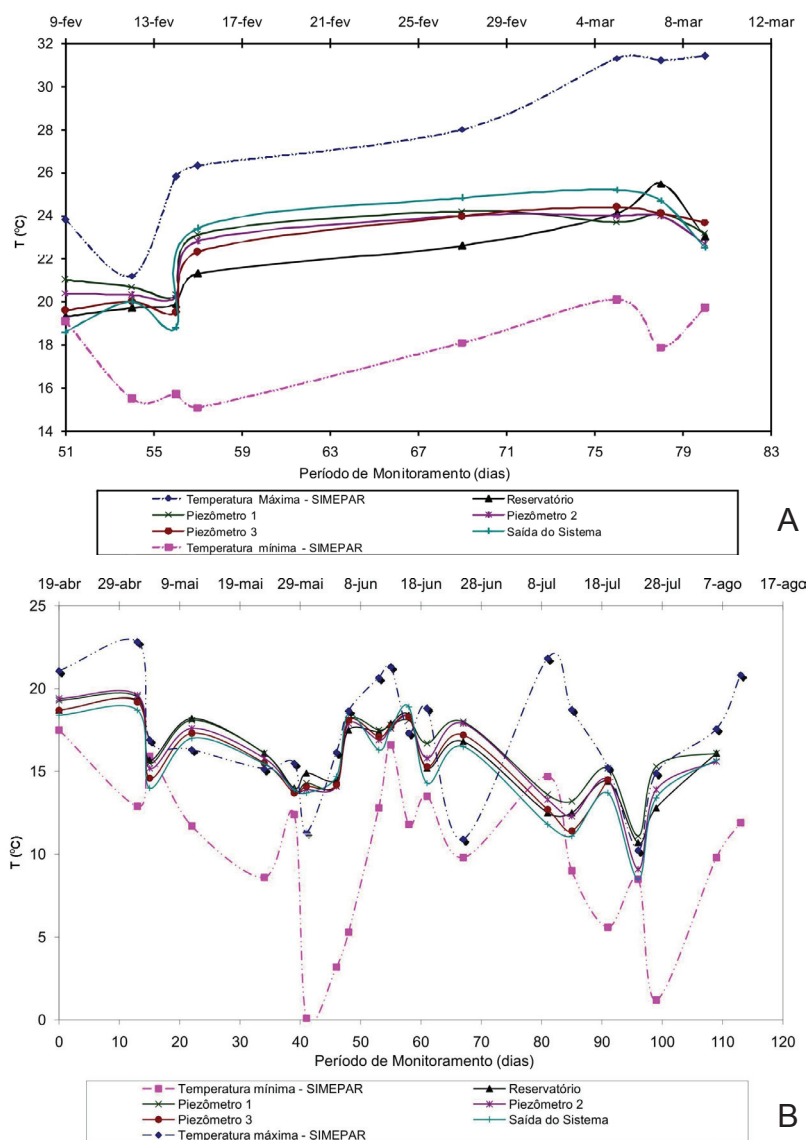


Figura 3. A. Temperatura do ar (SIMEPAR) e do líquido no sistema na primeira etapa de monitoramento. **B.** Valores de Temperatura do Ar (SIMEPAR) e do líquido no sistema, obtidos durante as duas etapas de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl.

remoção de SSV. Souza (2003), utilizando um sistema semelhante, também com *Typha* sp., obteve eficiência de remoção de SSV 52,11%.

Para avaliar a possível interferência da temperatura do ar no sistema e, conseqüentemente, na degradação da matéria orgânica, foram verificadas as temperaturas do líquido dentro do sistema e comparadas com a do ar, registradas pelo Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR), estação N°. 25264916, localizada no Centro Politécnico da Universidade Federal do Paraná em Curitiba, PR.

Na primeira etapa de monitoramento, as temperaturas no líquido, em todos os pontos de monitoramento,

mantiveram-se próximas a 22°C e, na segunda etapa, a temperatura média do líquido manteve-se em torno de 16°C. Mesmo em dias com fortes geadas, onde a temperatura mínima do ar foi de 0,1°C, a temperatura do líquido na saída do sistema, com uma lâmina líquida de aproximadamente 10 cm, manteve-se em 13,7°C. Essa condição é alcançada pela capacidade calorífica específica da água, que previne variações rápidas de temperatura, e pela presença da macrófita que, segundo Brix (1997), tem uma participação importante no tratamento, pois dentre os processos de interação da planta com o meio está o isolamento da superfície em relação à geada no inverno. Os valores de temperaturas do líquido e do ar,

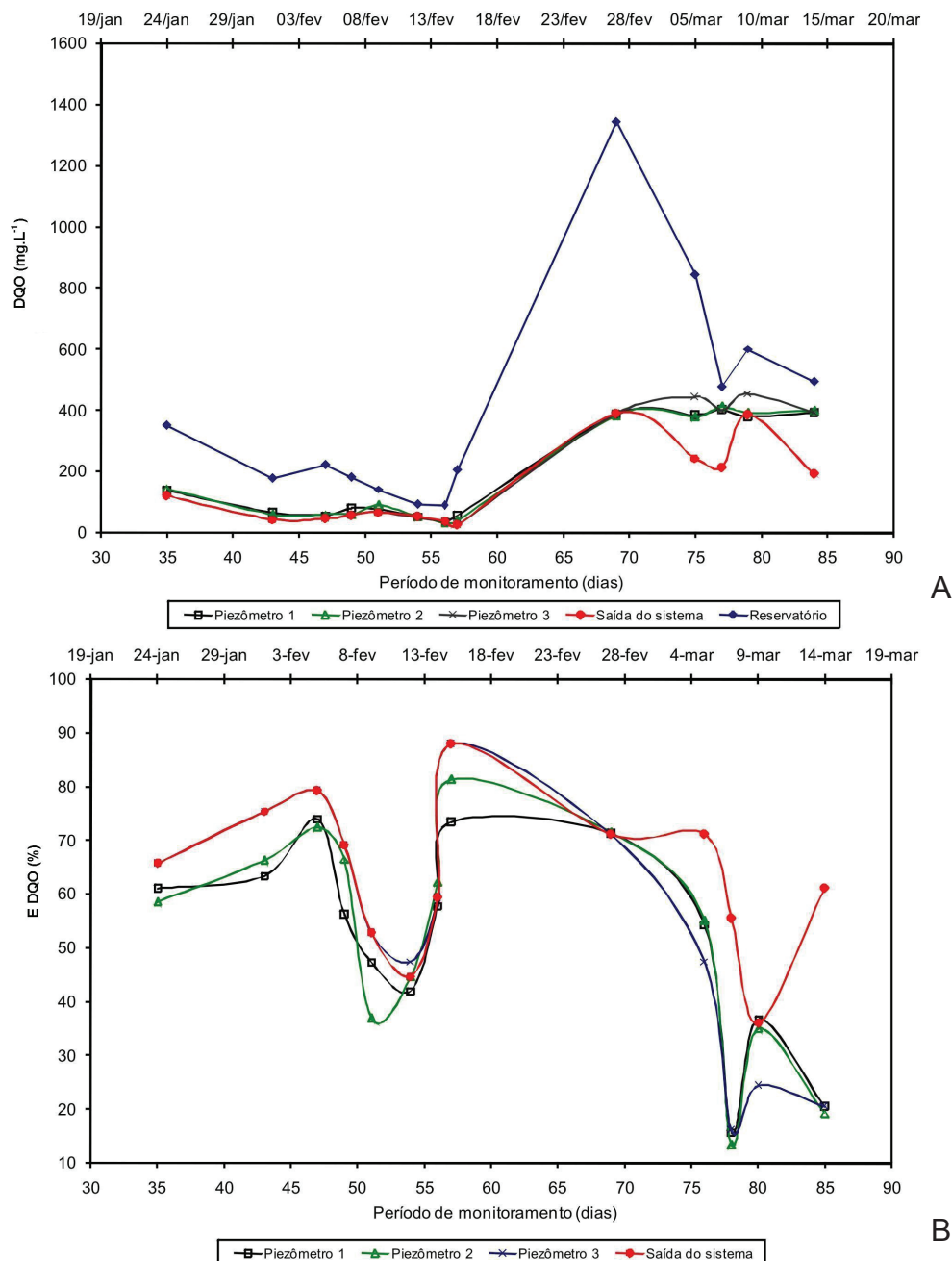


Figura 4. A. Valores de concentração de matéria orgânica (medida em DQO), analisados durante a primeira etapa de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl. B. Valores de eficiência em remoção de matéria orgânica (medida em DQO), analisados durante a primeira etapa de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl.

nas duas etapas, estão apresentados na figura 3 (A e B).

A interferência das baixas temperaturas do ar na degradação da matéria orgânica também não foi verificada nas análises de DQO, pois as eficiências de remoção foram próximas, no período de verão e inverno. Na primeira etapa, obteve-se $63,76 \pm 14,30\%$ de eficiência e na segunda etapa, $62,93 \pm 15,57\%$ de eficiência.

As grandes variações de concentração de matéria orgânica observadas na entrada do sistema estão diretamente relacionadas às condições do tempo e à vazão do rio.

As concentrações de matéria orgânica nos diferentes pontos de monitoramento, bem como as eficiências (E) em remoção de matéria orgânica (DQO) em relação à

entrada do sistema (reservatório) estão apresentadas, respectivamente, na figura 4 (A e B), valores obtidos na primeira etapa, e figura 5 (A e B), valores obtidos para a segunda etapa de monitoramento.

Valores próximos ao encontrado nas duas etapas de monitoramento foram obtidos por Brito *et al.* (2005), utilizando sistema de leitos cultivados com capim-elefante (*Pennisetum purpureum*) e milho, com eficiência média de remoção de matéria orgânica em DQO igual a 53%. Barreto (2005) ao utilizar *Typha* sp. obteve 53,57% de eficiência.

O pH é um importante parâmetro de controle de sistemas de tratamento. Na primeira etapa de monitoramento,

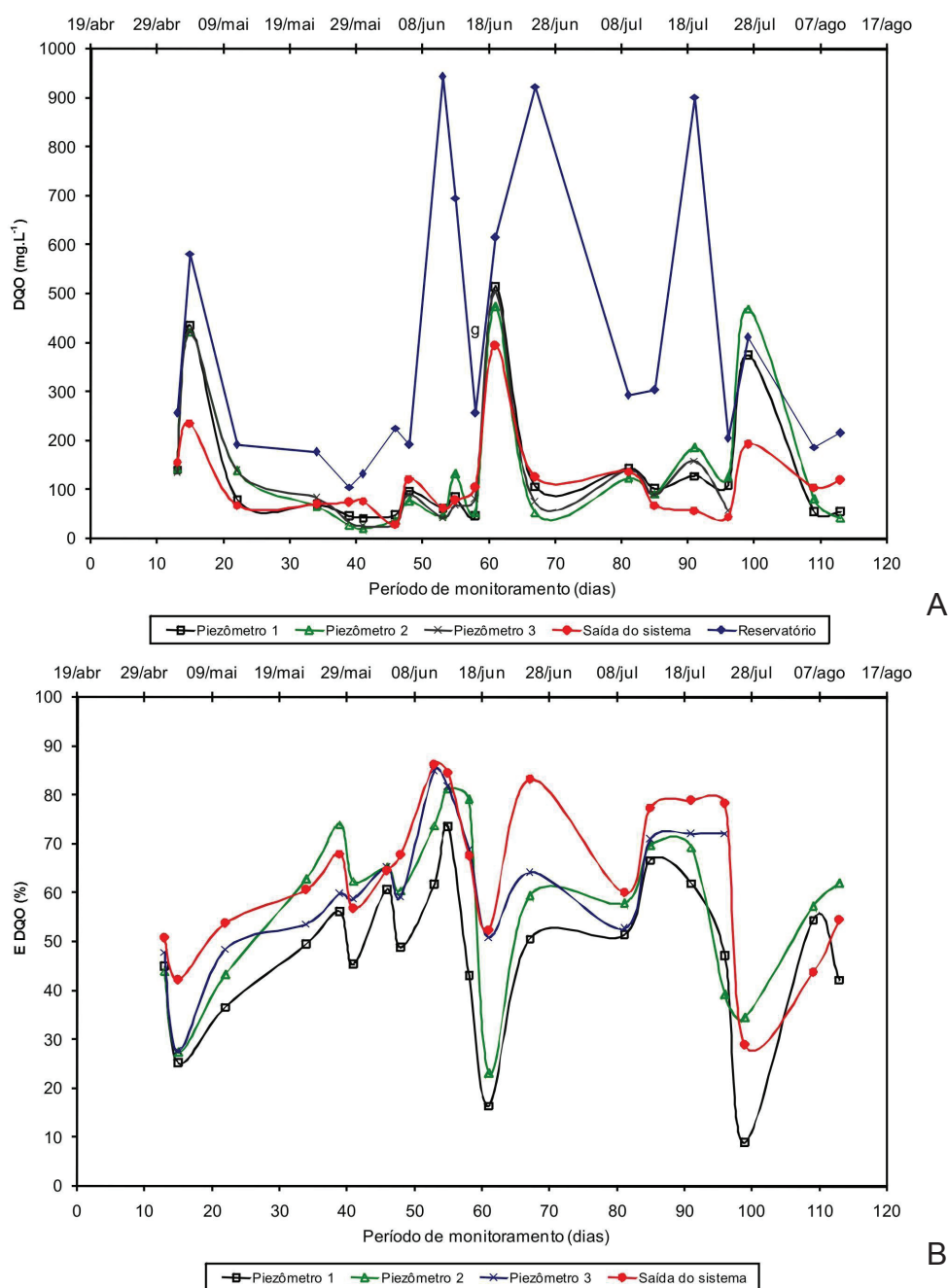


Figura 5. A. Valores de concentração de matéria orgânica (medida em DQO), analisados durante a segunda etapa de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl. B. Valores de eficiência em remoção de matéria orgânica (medida em DQO), analisados durante a segunda etapa de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl.

o pH, na entrada do sistema, manteve-se entre 6,49 e 8,17 e, na saída, ficou entre 6,34 e 8,72. Na segunda etapa de monitoramento, o pH, na entrada do sistema, permaneceu entre 5,8 e 7,7 e, na saída, entre 6,6 e 8,9. Nas amostras coletadas na saída do sistema, que apresentaram valores de pH mais elevados durante a coleta; foi observada uma coloração esverdeada e algumas folhas da macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schtdl. em processo de senescência na lâmina de água. Também foi verificada, sobre a superfície da areia, a formação de uma camada de lodo.

Baird (2002) cita que as plantas, em seu desenvolvimento, usam os nutrientes e aumentam o pH, uma vez que em pH mais elevado, pode ocorrer a destruição de certos microrganismos prejudiciais ao seu desenvolvimento.

Segundo Marques *et al.* (1997) e Marques (1999), em sistemas de banhados, mecanismos internos em conjunto com a atividade microbiana elevam o pH.

As concentrações de oxigênio dissolvido também foram observadas nas diferentes camadas do sistema, para verificar as formas de degradação da matéria orgânica no sistema e a relação entre a macrófita e a transferência de oxigênio para os leitos filtrantes. Nas camadas ou leitos filtrantes, onde predominou a degradação anaeróbia da matéria orgânica, foram verificados valores médios de OD inferiores a 0,6 mg.L⁻¹; na superfície, as concentrações de OD alcançaram valores médios superiores a 4 mg.L⁻¹, na primeira etapa, e a 3 mg.L⁻¹ na segunda etapa de monitoramento.

A oxigenação do sistema na camada mais superior,

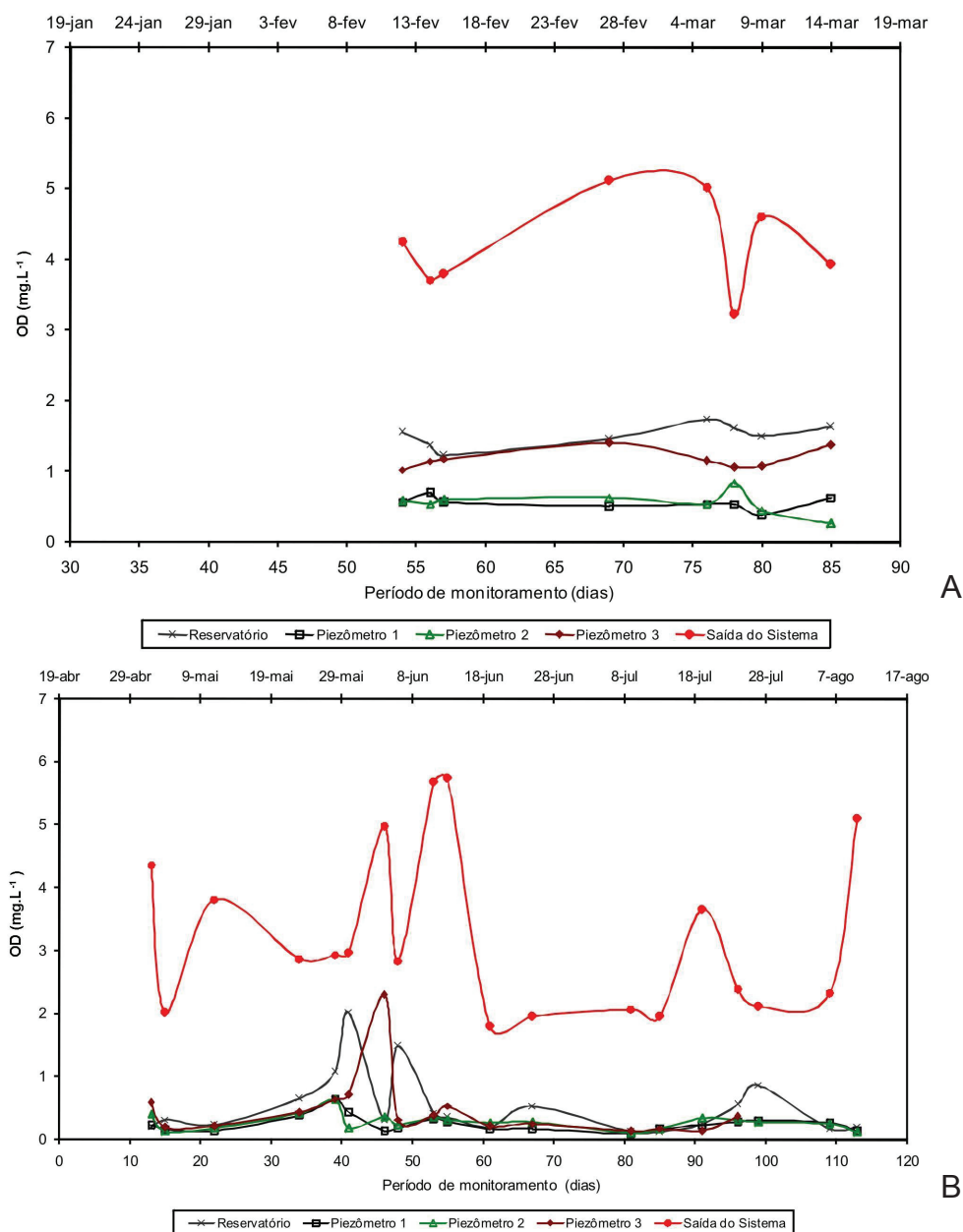


Figura 6. A. Valores de Oxigênio Dissolvido (OD) analisados durante a primeira etapa de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schtdl. **B.** Valores de Oxigênio Dissolvido (OD) analisados durante a segunda etapa de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schtdl.

Tabela 3. Valores médios de concentração de alcalinidade total (AT), alcalinidade a bicarbonato (AB) e concentrações de ácidos voláteis totais (AVT), analisados durante as duas etapas de monitoramento do Leito Cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl.

LEITO CULTIVADO - PRIMEIRA ETAPA					
Parâmetro	Reservatório	Piezômetro			
	Entrada	1	2	3	Saída
AT (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	44,4 ± 21,5	52,2 ± 18,5	50,0 ± 18,0	41,7 ± 22,4	41,9 ± 20,4
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	32,7 ± 21,9	40,0 ± 17,7	38,7 ± 16,7	28,3 ± 16,3	28,7 ± 20,8
AVT (mgAcH.L ⁻¹)	16,6 ± 9,3	17,2 ± 6,7	16,0 ± 6,2	18,9 ± 15,2	18,5 ± 15,4

LEITO CULTIVADO - SEGUNDA ETAPA					
Parâmetro	Reservatório	Piezômetro			
	Entrada	1	2	3	Saída
AT (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	61,1 ± 12,8	77,6 ± 18,1	75,0 ± 16,9	76,6 ± 21,7	71,2 ± 14,4
AB (mgCaCO ₃ .L ⁻¹)	34,7 ± 15,6	34,7 ± 15,6	48,1 ± 12,9	51,3 ± 18,4	47,0 ± 14,4
AVT (mgAcH.L ⁻¹)	37,2 ± 16,7	47,0 ± 17,3	39,5 ± 15,9	39,6 ± 17,4	37,9 ± 16,6

além de se relacionar ao ambiente externo, pode estar associada à presença da macrófita, pois estas, segundo Brix (1997), Marques *et al.* (1997) e Brix & Arias (2005), incorporam ar pelas folhas e transferem para os rizomas e raízes por meio do aerênquima (tecido vegetal), tornando aeróbia a região ao redor (rizosfera). A transferência de oxigênio, de acordo com Brix (1997), aumenta a degradação de compostos orgânicos no local. O ambiente anaeróbio dos leitos filtrantes (camadas inferiores) e a oxigenação da camada superior pelas plantas podem ser observados a partir da avaliação da concentração de OD, nas duas etapas de monitoramento, na figura 6 (A e B).

Como nas camadas inferiores a degradação da matéria orgânica é predominantemente anaeróbia, foram realizados também análises de alcalinidade total, alcalinidade a bicarbonato e ácidos voláteis totais, e os valores médios obtidos, nas duas etapas de monitoramento, estão apresentados na Tab. 3.

Na segunda etapa de monitoramento, a concentração de ácidos voláteis totais foi superior à concentração de alcalinidade a bicarbonato, no reservatório e nas camadas inferiores. Tanto para o Ribeirão quanto para o reservatório, predomina a condição de anaerobiose e ocorre a decomposição de compostos facilmente degradáveis (açúcares e amido), produzindo ácidos orgânicos. Na camada mais profunda do sistema (piezômetro 1), também em condição de anaerobiose, pode estar ocorrendo a fase de hidrólise e fermentação da matéria orgânica remanescente, levando à formação de ácidos, o que poderia explicar as concentrações mais elevadas de AVT em relação à AB. A inversão só aconteceu na camada superior, onde os ácidos voláteis foram consumidos e transformados, gerando alcalinidade a bicarbonato e tamponando o meio.

Além dos parâmetros físico-químicos, também foi verificada a remoção de microrganismos patogênicos, utilizando-se análise de coliformes totais e termotolerantes. O sistema cultivado com a macrófita *Sagittaria montevidensis* Cham. & Schltdl. apresentou eficiência média de remoção de coliformes totais de 96,7% na primeira etapa e 95,9% na segunda etapa. Em coliformes termotolerantes, a eficiência foi de 95,8% na primeira. Na segunda etapa, por motivo operacional, não se obteve

valor em coliformes termotolerantes. Nas duas etapas, foi verificada a presença de *Escherichia coli* na saída do sistema, que não foi removida no sistema.

Os resultados indicaram que o sistema de Leitos Cultivados para águas residuárias *in natura*, ou no caso deste trabalho, água de rio com elevado grau de poluição, equivale a unidades primárias de tratamento, que necessitam de uma unidade complementar, o que vai depender da Classificação do rio segundo o CONAMA 357/05. Maiores eficiências poderão ser, portanto, alcançadas quando construídos sistemas combinados, sendo mais indicado adotar os sistemas de Leito Cultivado como pós-tratamento, o que retardaria possíveis problemas de obstrução dos leitos filtrantes, comum neste tipo de sistema.

Contatou-se também que o sistema de Leito Cultivado apresentou várias vantagens, tais como: facilidade na construção, na operação e na manutenção, devido ao fato de ser um sistema flexível e menos susceptível às altas taxas de aplicação de esgoto, apresentar características de um ambiente natural e um ótimo aspecto paisagístico alcançado pela presença das macrófitas comuns em leitos de rios do município de Curitiba.

O rápido crescimento e desenvolvimento das macrófitas, que é possibilitado pela intensa absorção de nutrientes, favoreceram a despoluição da água, além do manejo das mesmas envolver procedimentos de controle muito simples, semelhantemente aos cuidados com um jardim. A remoção do excesso de plantas deve ser realizada, o que garante o crescimento e desenvolvimento das plantas remanescentes, pois os organismos em superpopulação começam a competir entre si, interferindo na eficiência do tratamento. Lu *et al.* (2010) destacam ainda que essa remoção impede o retorno dos compostos incorporados pelas plantas ao meio, em virtude dos processos de decomposição.

Cabe destacar a possibilidade de aproveitamento da biomassa removida conforme Romitelli (1983), Granato (1995) e Pompêo (2008). Pott & Pott (2000) citam que a retirada do excedente de plantas aquáticas e uso de sua biomassa constituem benefício adicional com potencial econômico ainda inexplorado no Brasil.

O emprego deste sistema poderia ser aplicado nos

pontos de lançamento de esgoto doméstico *in natura* em corpos de águas, pois além de requerer menores áreas e menor custo de construção, é uma solução alternativa em lugares desprovidos de sistemas de tratamento convencionais. Esta prática atenuaria significativamente os impactos nos corpos hídricos, melhorando a qualidade das águas.

REFERÊNCIAS

- ANJOS, J. A. S. A. 2003. *Avaliação da eficiência de uma zona alagadiça (wetland) no controle da poluição por metais pesados - O caso do Plumbum em Santo Amaro da Purificação - BA*. 328f. Tese (Doutorado em Engenharia Mineral) - Departamento de Engenharia de Minas e Petróleo. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo, São Paulo, 2003.
- APHA, AWWA, WPCF. 2000. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 20th. ed. Washington D. C.: American Public Health Association.
- BAIRD, C. 2002. *Química ambiental*. 2ª ed. Porto Alegre: Bookman. 622 p.
- BARRETO, C. O. 2005. *Eficiência de leito de macrófitas como unidade de polimento de efluente de indústria de aditivos para ração*. 53f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2005.
- BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução CONAMA n. 357, de 17 de março de 2005. Classificação dos corpos de água. Diário Oficial da União. Brasília, 18 março de 2005.
- BRITO, L. P., ANDRADE NETO, C. O., LUCAS FILHO, M., SILVA, D. A. & LIMA, A. D. 2005. Estudo comparativo da eficiência de uma wetland e um filtro biológico anaeróbio na remoção de sólidos suspensos, DBO e DQO. In: 23º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL, 2005. Mato Grosso do Sul, MT, p. 1-7.
- BRIX, H. 1997. Do macrophytes play a role in constructed treatment wetlands. *Water Science & Technology*, 35(5): 11-17.
- BRIX, H. & ARIAS, C. A. 2005. The use of vertical flow constricted wetlands for on-site treatment of domestic wastewater. New Danish guidelines. *ELSEVIER. Ecological Engineering*, 25(5): 491-500.
- DIAS, V. 2006. Wetlands systems for water pollution control. 10 th INTERNATIONAL CONFERENCE ON WETLAND SYSTEMS FOR WATER POLLUTION CONTROL, 2006. Lisboa/Portugal. Disponível em: <http://www.wetconf10.adp.pt/>. Acesso em: mar. 2007.
- DILALLO, R. & ALBERTSON, O. E. 1961. Volatile acids by direct titration. *Jornal WPCF*, 33(4): 357- 365.
- ESTADO DO PARANÁ. Sistema Meteorológico do Paraná (SIMEPAR).
- ESTADO DO PARANÁ. 1992. Superintendência de Recursos Hídricos e Meio Ambiente (SURHEMA). Lei Nº. 92 de 20 de setembro de 1992.
- ESTADO DO PARANÁ. 2007. Instituto Ambiental do Paraná (IAP). Monitoramento da qualidade das águas dos rios da região metropolitana de Curitiba. Período 1992-2005. Disponível em: <http://www.iap.pr.gov.br/>. Acesso em: 18 jan. 2007.
- ESTEVES, F. A. (1998) Lagoas costeiras: origem, funcionamento e possibilidades de manejo. In: Esteves, F.A. (Ed) (1998): *Ecologia das Lagoas Costeiras do Parque Nacional da Restinga de Jurubatiba e do Município de Macaé (RJ)*. Núcleo de Pesquisas Ecológicas do Município de Macaé (NUPEM) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. 464 p.
- FLOHR, L., BRENTANO, D. M., PINTO, C. R. S. C., MACHADO, V. G. & MATIAS, W. G. 2005. Classificação de resíduos sólidos industriais com base em testes ecotoxicológicos utilizando *Daphnia magna*: uma alternativa. Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis. Disponível em <http://www.biotemas.ufsc.br/pdf/volume182/p7a18.pdf> Acesso em: mar. 2007.
- GRANATO, M. 1995. *Utilização do aguapé no tratamento de efluentes com cianetos*. Rio de Janeiro: CETEM/CNPq, Série Tecnologia Ambiental, n. 5. p. 1-39.
- LU, Q., HE ZHENLI, L., STOFFELLA, P. J. & YANG, X. 2010. Phytoremediation to remove nutrients and improve eutrophic stormwaters using water lettuce (*Pistia stratiotes* L.). *Environ. Sci. Pollut. Res.*, 17(1): 84-96.
- MARQUES, D. M. L., PINHEIRO, C. B. & LUCA, S. J. 1997. Controle de metais e elevação de pH por banhado (wetland) construído sem fonte externa de matéria orgânica. Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. 19º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL - ABES. 1997. FOZ DO IGUAÇU - PR, p. 307-315.
- MARQUES, D. M. 1999. Terras Úmidas Construídas de Fluxo Subsuperficial. In: CAMPOS, J. R. TRATAMENTO DE ESGOTOS SANITÁRIOS POR PROCESSOS ANAERÓBIOS E DISPOSIÇÃO CONTROLADA NO SOLO. ABES, Rio de Janeiro. p. 409-435.
- MEYER, D., LANGERGRABER, G. & DITTMER, V. 2006. Simulation of sorption processes in vertical flow constructed wetlands for CSO treatment. 10TH INTERNATIONAL CONFERENCE ON WETLAND SYSTEMS FOR POLLUTION CONTROL. WATER, 2006 Lisboa/Portugal, p. 599-609.
- PEGORINI, F., MARANHO, L. T., CUBAS, S. & PREUSSLER, K. H. 2006. Avaliação da estrutura radicular de macrófitas aquáticas para compor um "wetland" construído. In: PROCEEDINGS OF THE SECOND INTERNATIONAL MEETING ON ENVIRONMENTAL BIOTECHNOLOGY AND ENGINEERING; México. ISBN 970-95106-0-6.
- POMPÊO, M. 2008. Monitoramento e manejo de macrófitas aquáticas. *Oecol. Bras.*, 12(3): 406-424.
- POTT, V. J. & POTT, A. 2000. *Plantas aquáticas do Pantanal*. Brasília: Embrapa, 404 p.
- RIPLEY, L. E. BOYLE, W. C. & CONVERSE, J. C. 1986. Improved alkalimetric monitoring for anaerobic digestion of high-strength wastes. *J. WPCF*, 58(5). 406-411.
- ROMITELLI, M. S. 1983. Remoção de fósforo em efluentes secundários com emprego de macrófitas aquáticas do gênero *Eichhornia*. *Revista DAE*, 133: 66-68.
- SERAFIM JUNIOR, M; NEVES, G. P., BRITO, L. & GHIDINI, A. 2003. Composição da comunidade zooplancônica de um reservatório eutrofizado do altíssimo rio Iguaçu, região metropolitana de Curitiba, Paraná, Brasil. IV SEMINÁRIO DO PROJETO INTERDICIPLINAR SOBRE EUTROFIZAÇÃO DE ÁGUAS DE ABASTECIMENTO PÚBLICO NA BACIA DO ALTÍSSIMO IGUAÇU, 2003. Curitiba - PR.
- SOUZA, A. L. 2003. *Estudo experimental e numérico do processo de remoção de poluentes nos leitos cultivados*. 118f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) - Faculdade de Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2003.
- TUNDISI, J. G. 2003. *Água no século XXI: enfrentando a escassez*. São Carlos: Rima IIE. 247 p.
- TUNDISI, J. G. 2005. Seminários Temáticos para 3ª Conferência Nacional de Ciência e Inovação. Parcerias estratégicas, n.20 (pt. 2) Brasília/DF. Jun./2005. 727p. Disponível em: <http://www.cgee.org.br/arquivos/p_20_2.pdf> Acesso em: 12 fev. 2007.