

# WETLANDS PARA TRATAMENTO DE LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS – EXPERIÊNCIAS NO ATERRO SANITÁRIO DE PIRAÍ E NO ATERRO METROPOLITANO DE GRAMACHO (RJ)

## LANDFILL LEACHATE TREATMENT USING WETLANDS – EXPERIENCES IN PIRAÍ MUNICIPALITY SOLID WASTE LANDFILL AND GRAMACHO METROPOLITAN SOLID WASTE LANDFILL

*CAMILLE FERREIRA MANNARINO*

Mestre em Engenharia Ambiental - PEAMB/UERJ. Engenheira Civil - Ênfase em Engenharia Sanitária e Ambiental – FEN/UERJ. Bolsista CNPq/ PROSAB

*JOÃO ALBERTO FERREIRA*

D.Sc. em Saúde Pública – ENSP/Fundação Oswaldo Cruz, M.Sc. em Engenharia Ambiental - Manhattan College (New York - USA). Engenheiro Mecânico – UFU. Coordenador Adjunto do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – PEAMB/UERJ. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente/UERJ

*JUACYARA CARBONELLI CAMPOS*

D.Sc. em Engenharia Química - Tecnologia Ambiental – PEQ/COPPE/UFRJ. Engenheira Química – Escola de Química/UFRJ. Professora Adjunta do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química/UFRJ

*ELISABETH RITTER*

D.Sc. em Engenharia Civil – PEC/COPPE/UFRJ. M.Sc. em Engenharia Civil – PUC/Rio. Engenheira Civil – UFRGS. Sub-chefe do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente/UERJ. Chefe do Laboratório de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente – LES/UERJ. Professora Adjunta do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente/ UERJ

Recebido: 19/10/05 Aceito: 22/02/06

### RESUMO

O Grupo de Resíduos Sólidos do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental (PEAMB/UERJ) vem realizando, há cinco anos, pesquisas utilizando *wetlands* construídos em tratamento de lixiviados de aterros sanitários. Esses sistemas promovem a absorção de nutrientes pelas plantas e facilitam a degradação de material orgânico por microrganismos do solo e aderidos às raízes. Experiências desenvolvidas no Aterro Sanitário de Pirai mostram remoções, em termos de concentração de poluentes, de 41% de DQO e 51% de nitrogênio amoniacal. Os resultados obtidos no Aterro Metropolitano de Gramacho apresentam redução, em termos de carga de poluição, de 86% de DQO e 89% de nitrogênio amoniacal. Os sistemas implantados mostram-se boas alternativas no tratamento de lixiviados, sobretudo em regiões de clima tropical, onde as elevadas temperaturas potencializam a evapotranspiração.

**PALAVRAS-CHAVE:** *Wetlands* construídos, tratamento de lixiviados, evapotranspiração, aterro metropolitano de Gramacho, aterro sanitário de Pirai.

### ABSTRACT

*The Group of Solid Waste of Environmental Engineering Program (PEAMB/UERJ) has been conducting research using constructed wetlands in landfill leachate treatment in the last five years. These systems promote the absorption of nutrients by the vegetation and facilitate the degradation of organic material by microorganisms in the soil and the ones adhered to the roots. Experiments carried out in Pirai Municipality Landfill show removal of pollutants about 41% of COD and 51% of ammonium nitrogen. The results obtained in Gramacho's landfill, present a reduction of 86% of COD load and 89% of ammonium nitrogen load. Wetlands seems to be a good alternative in the treatment of landfill leachate, especially in regions of tropical climate, where high temperatures improve effects of evapotranspiration.*

**KEYWORDS:** *Constructed wetlands, leachate treatment, evapotranspiration, Gramachos' metropolitan landfill, Pirai's Landfill.*

## INTRODUÇÃO

Um dos desafios nos projetos de aterros sanitários é o tratamento do lixiviado uma vez que sua qualidade é alterada em função das características dos resíduos dispostos no aterro, de fatores relativos à área, de fatores climáticos e, sobretudo, com a idade do aterro. A maioria dos aterros brasileiros não possui nenhum tipo de tratamento para o lixiviado ou o trata de maneira ineficiente. Desta forma, é relevante o desenvolvimento de técnicas de tratamento eficientes na remoção da carga poluidora do lixiviado e que sejam compatíveis com a realidade técnica e econômica dos municípios.

Os *wetlands* construídos, simulando sistemas naturais formados por leitos de plantas aquáticas, podem se caracterizar como alternativas de tratamento que viabilizem a redução do impacto ambiental dos resíduos sólidos urbanos. As propriedades dos *wetlands* incluem alta produtividade das plantas presentes, existência de grandes superfícies de adsorção no solo e nas plantas, presença de regiões aeróbicas e anaeróbicas e população de microrganismos ativos (Urbanic-Bercic, 1994). A sedimentação e filtração dos sólidos, a absorção de materiais orgânicos e nutrientes pelas plantas, a adsorção de metais no solo e nas plantas e as degradações aeróbia e anaeróbia dos compostos orgânicos são capazes de transformar muitos poluentes em produtos menos danosos e em nutrientes essenciais a serem utilizados pela biota (Kadlec, 1998).

Quanto ao tipo de vegetação, Mulamoottil et al (1998) destacam a taboa (*Typha sp.*) como própria para utilização em *wetlands* por sua estrutura interna ser formada por tecidos que contém espaços abertos, através dos quais acontece transporte de oxigênio da atmosfera para as folhas e daí para as raízes e rizomas. Parte do oxigênio pode ainda sair do sistema radicular para a área em torno da rizosfera criando condições para decomposição aeróbia da matéria orgânica, bem como para crescimento de bactérias nitrificantes.

Ressalta-se ainda o custo relativamente baixo de implantação de tais sistemas e a pouca demanda técnica para sua operação, bastante adequados às condições da maioria dos municípios brasileiros, de forma geral carentes de recursos e de corpo técnico especializado. Isso não significa que os *wetlands* podem ser construídos e deixados à sua própria sorte, sem nenhum tipo de cuidado.

Este trabalho apresenta os resultados do uso de *wetlands* construídos para o tratamento de lixiviados em sistemas implantados no Aterro Metropolitano de Gramacho e no Aterro Sanitário de Pirai.

## METODOLOGIA

### Experiência no aterro sanitário de Pirai

O Aterro Sanitário de Pirai (início de operação em maio de 2000) recebe cerca de 20t/dia de resíduos. Até 2004, o sistema de tratamento de lixiviado era composto por um filtro biológico aeróbio, um pequeno *wetland* (com tempo de detenção hidráulica - TDH de 2 dias e plantado com uma espécie de gramínea local) e uma lagoa aeróbia. O *wetland* atual foi construído como parte integrante do novo sistema de tratamento de lixiviado, que inclui, em seqüência, dois biofiltros aeróbios, um *wetland* e uma lagoa. O *wetland* é alimentado com os efluentes dos filtros biológicos (Figura 1). O *wetland* foi construído no solo, com dimensões de 5,0m x 10,0m x 0,5m, e impermeabilizado com manta de PVC de 1mm de espessura. As camadas de enchimento são constituídas por rachão (pedras com diâmetros entre 15 e 30cm), em uma altura aproximada de 0,2m, e solo ocupando 0,1m de altura. O volume útil do tanque é de 2,6m<sup>3</sup>. A vegetação plantada foi uma espécie de taboa (*Typha angustifolia*), retirada de uma área vizinha ao aterro. O *wetland* opera em regime de fluxo superficial, com lâmina d'água acima da camada de enchimento.

O lixiviado é conduzido para o sistema de tratamento, por gravidade, havendo variação de vazão na alimentação. O TDH do *wetland*, considerando a faixa de variação das vazões de entrada, oscilou, no período de observação, entre 0,13 e 8,48 dias, variando inversamente com a vazão do lixiviado produzido.



Figura 1 – Wetland plantado com taboa no aterro de Pirai

### Experiência no aterro metropolitano de Gramacho

O Aterro Metropolitano de Gramacho recebe cerca de 8.000t/dia de resíduos. A Estação de Tratamento de Chorume (ETC) existente no aterro opera com a seguinte seqüência: lagoa de equalização, coagulação química com adição de cal, lodos ativados e nanofiltração. Nesse trabalho, é apresentada a avaliação da eficiência de um *wetland* no tratamento de parte do lixiviado efluente do processo de lodos ativados da estação.

O *wetland*, de fluxo sub-superficial, foi implantado em um espaço reservado originalmente para uma lagoa de polimento. O tanque tem formato de tronco de pirâmide com bases retangulares, medindo 13,0m x 8,0m e 10,0m x 5,5m, e altura, 1,5m. A implantação do *wetland* está descrita detalhadamente em Mannarino (2003).

O tanque foi impermeabilizado com geomembrana de PEAD de 2mm de espessura e, em função da profundidade inadequada para esse experimento, foi preenchido com uma camada de 0,6m de altura de argila e outra de 0,6m de altura de rachão, que formam também um leito para a fixação da vegetação. A argila tem ainda o objetivo de proteger a geomembrana e as pedras, de facilitar a drenagem do lixiviado. O *wetland* passou a ter um volume útil de 20,0m<sup>3</sup>. A vegetação utilizada foi uma gramínea existente na lagoa de equalização da ETC, que já estava aclimatada ao lixiviado (Figura 2). As vazões afluentes aos *wetlands* foram controladas para se manter um TDH de aproximadamente 9 dias.

### Avaliação dos sistemas de tratamento

As análises das amostras de lixiviados foram realizadas no Laboratório de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente



Figura 2 – Wetland plantado com gramínea no aterro de Gramacho

- LES/UERJ. Os parâmetros foram monitorados e as amostras conservadas de acordo com APHA/AWWA/WPCF (1998): pH, condutividade, DQO (digestão por refluxo aberto e determinação titulométrica), DBO (método das diluições e determinação de OD por oxímetro), nitrogênio amoniacal (destilação e determinação titulométrica), fósforo total (digestão ácida e determinação colorimétrica), alcalinidade total, cloretos (método argentométrico), sólidos suspensos totais e sólidos suspensos voláteis. Em relação ao nitrogênio, foi monitorado o nitrogênio amoniacal pois é a parcela mais significativa presente nos lixiviados trabalhados (Giordano, 2003). As caracterizações dos lixiviados afluentes aos *wetlands* estão mostradas na Tabela 1. As vazões afluentes e efluentes aos *wetlands* também foram diariamente monitoradas.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Aterro sanitário de Pirai

As taxas de aplicação de matéria orgânica e nitrogênio amoniacal variaram com as vazões alimentadas ao *wetland* e com a qualidade do seu afluente, encontrando-se entre 0,19 e 0,31g DBO.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, 2,96 e 7,57g DQO.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> e 0,97 e 2,07g N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. A eficiência da remoção de poluentes está mostrada na Figura 3. A remoção da concentração de DQO no *wetland* foi de 41 ← 10%. A remoção de DBO teve média de 57 ← 17%. Em relação ao seu afluente, o *wetland* removeu 51←17% de nitrogênio amoniacal. Os sólidos suspensos totais foram removidos em 60 ← 29%.

O aumento do volume e a mudança de vegetação, em relação ao *wetland* existente anteriormente no aterro, levaram a um acréscimo na eficiência de remoção de poluentes. A redução na concentração de matéria orgânica (DQO) passou de 10% (Ferreira et al, 2003) para 41%. A remoção de nitrogênio amoniacal aumentou de 8% (Ferreira et al, 2003) para 51%.

Devido à perda de líquido por evapotranspiração, torna-se importante a realização de um balanço de massa, considerando as concentrações afluentes e efluentes e suas vazões respectivas, o que permite conhecer a remoção dos poluentes em termos de carga.

Em se tratando de remoção de carga poluidora, o pequeno *wetland* existente anteriormente no aterro apresentou, com

Tabela 1 - Caracterizações médias dos lixiviados afluentes aos *wetlands*

Parâmetros	Aterro de Pirai (n=7)			Aterro de Gramacho (n=12)		
	Média	Mínimo	Máximo	Média	Mínimo	Máximo
pH	7,3	6,9	8,2	6,4	4,9	8,3
Condutividade (mS/cm)	7,2	6,2	8,5	16,5	10,2	19,5
DQO (mgO <sub>2</sub> /L)	768	309	2435	2155	1219	2800
DBO <sub>5</sub> (mgO <sub>2</sub> /L)	74	27	100	277	47	677
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/L)	323	205	373	371	12	667
Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> /L)	2895	1878	7393	403	28	1030
Cloretos (mg/L)	1362	950	2199	4701	2655	5757
SST (mg/L)	339	31	802	512	76	1060

OBS. n = número de amostragens

uma taxa de evapotranspiração de 10%, redução de matéria orgânica (DQO) de 35% e redução de nitrogênio amoniacal de 30 a 80% (Ferreira et al, 2003). Para o *wetland* atualmente em operação no aterro de Pirai, os resultados da avaliação ainda são preliminares, tendo sido obtidas taxas de até 80% de perda de líquido, que aliada aos processos de degradação existentes no *wetland*, indica grande potencial de redução de carga poluidora do lixiviado efluente.

### Aterro metropolitano de Gramacho

O *wetland* mostrou-se bastante resistente às significativas variações de qualidade sofridas pelo lixiviado do aterro de Gramacho. A redução média entre as vazões afluente e efluente ao *wetland* foi na ordem de 80%. Se tomados apenas os meses de verão (janeiro a março), quando as temperaturas são bastante elevadas na região, observa-se uma redução de vazões ainda maior, na ordem de

90%, que é deslocada para a ordem de 70% nos meses de abril a junho.

O *wetland* em Gramacho trabalhou com taxas de aplicação médias de 15,55g DBO.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>, 147,53g DQO.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup> e 25,4gN-NH<sub>4</sub><sup>+</sup>.m<sup>-2</sup>.dia<sup>-1</sup>. Apesar de o pH afluente ao *wetland* ter variado na faixa de 4,9 a 7,4 no período observado, o pH de saída apresentou valores aproximadamente constantes, em torno de 6,7, numa faixa muito próxima à neutralidade.

A DQO de entrada no *wetland* variou, no período de observação, entre 1219 e 2800mg O<sub>2</sub>/L, enquanto que a de saída oscilou entre 914 e 2700mg O<sub>2</sub>/L (Figura 4), atingindo percentual médio de remoção próximo de 31%. Os valores de DBO na entrada do *wetland* variaram entre 47 e 677mg O<sub>2</sub>/L e, na saída, entre 28 e 330mg O<sub>2</sub>/L (Figura 5). O *wetland* isoladamente promoveu redução média de 33% da DBO. O percentual médio de remoção de sólidos suspensos totais no *wetland* foi de 71%, sendo o valor médio de sua

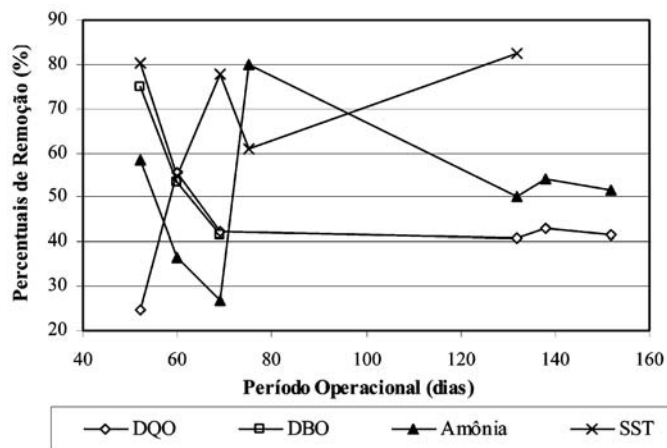


Figura 3 – Remoção de poluentes no *wetland* em operação no aterro de Pirai

concentração, 511mg/L, na entrada e, 146mg/L na saída.

O valor médio registrado para a concentração afluente de nitrogênio amoniacal no *wetland* foi de 370mg/L, já reduzido nos tratamentos anteriores, e efluente, de 203mg/l (Figura 6), caracterizando uma remoção de aproximadamente 45%. É possível que, no *wetland*, ocorra também o processo de nitrificação mas este não foi avaliado.

A Tabela 2 resume os resultados médios obtidos, em concentração, dos principais parâmetros monitorados no *wetland*. Apesar dos significativos percentuais de remoção obtidos, o efluente não se enquadra nas legislações vigentes em relação a maior parte dos poluentes analisados. Os valores de DQO, DBO e nitrogênio amoniacal estão acima dos permitidos para o lançamento em corpos hídricos, segundo a norma técnica NT-202.R-10 e a diretriz DZ-205.R-5 (FEEMA, 1986; FEEMA, 1991). Tal fato não reflete a ineficiência do sistema proposto, mas o efeito de concentração dos poluentes decorrente das altas taxas de perda de líquido por evapotranspiração.

As elevadas temperaturas locais promovem uma aceleração na absorção de nutrientes pela vegetação e nas reações de nitrificação, desnitrificação e volatilização da amônia livre (Moehlum, 1998), processos que ocorrem no interior dos *wetlands*, o que potencializa sua eficiência no tratamento do lixiviado.

Ainda na Tabela 2, encontram-se os valores de redução, em carga, do potencial poluidor de alguns parâmetros, considerando-se só o *wetland* plantado com gramínea e o sistema composto pelo tratamento biológico por lodos ativados da ETC seguido do *wetland*.

O percentual de remoção de carga de DBO no *wetland*, na ordem de 86%, é bastante satisfatório se comparado aos valores obtidos por Schwartz et al (1998), DeBusk (1998) e Eckhardt et al (1998), entre 61%, com 25 dias TDH, e 95%, com 74 dias de TDH, considerando que o *wetland* estudado em Gramacho opera com nove dias de TDH. Para o nitrogênio amoniacal, a redução em carga de 89% é muito próxima das apresentadas por Schwartz et al (1998), 83% em 25 dias de TDH, e Eckhardt et al (1998), 91% em 74 dias de TDH.

Apesar de os padrões de lançamento exigidos serem pautados em termos de concentrações de poluentes, há que se ressaltar que os impactos reais causados no meio ambiente são sensivelmente mais influenciados pelas cargas de poluentes lançadas.

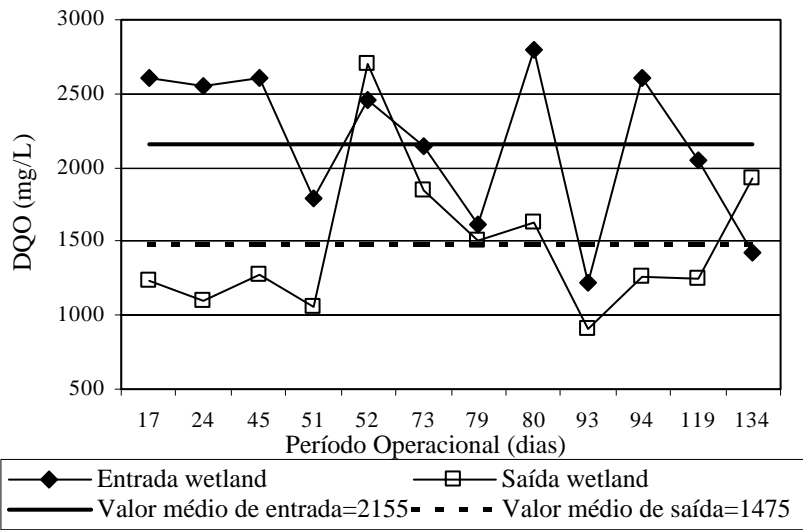


Figura 4 - Variação da DQO no wetland do aterro de Gramacho

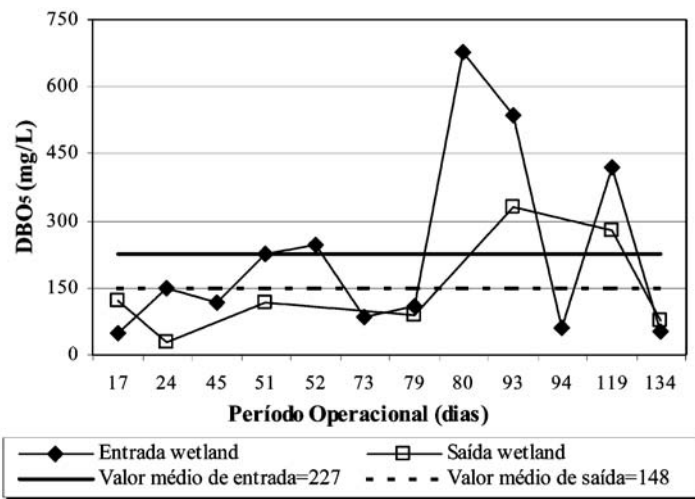


Figura 5 - Variação da DBO no wetland do aterro de Gramacho

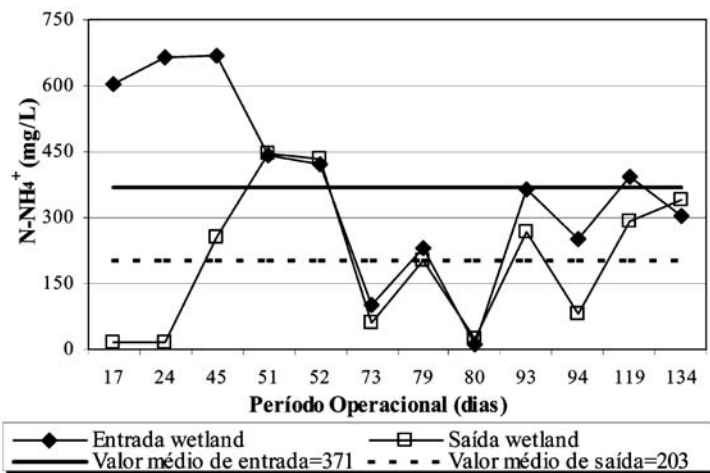


Figura 6 - Variação do nitrogênio amoniacal no wetland do aterro de Gramacho

Tabela 2 - Remoções de poluentes em termos de concentração no *wetland* e de carga no *wetland* e no sistema lodos ativados (LA) + *wetland* do aterro de Gramacho

Parâmetro	Valor médio	Valor médio	Remoção Média em concentração (%)	Remoção Média em Carga (%)	
	Afluente (mg/L)	Efluente (mg/L)		Wetland	LA + Wetland
DQO	2155	1474	31	86,3	92,8
DBO	221	148	33	86,6	95,2
SST	512	146,4	71	94,3	-
N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	371	203	45	89,1	97,5

## CONCLUSÕES

O *wetland* plantado com taboa, para tratamento do lixiviado no Aterro Sanitário de Pirai, apresentou bons resultados de remoção de matéria orgânica (41% de DQO e 57% de DBO), nitrogênio amoniacal (51%) e sólidos (60%), apesar das significativas variações de vazão afluente e das taxas de aplicação de poluentes no mesmo. Isso demonstra a resistência do sistema de tratamento (vegetação e microrganismos) às oscilações de quantidade e qualidade do lixiviado produzido, situação comum em aterros sanitários. Dados preliminares de evapotranspiração mostram um potencial de perda de líquido no *wetland* de até 80%.

O *wetland* implantado no Aterro Metropolitano de Gramacho permitiu avaliar o seu potencial de utilização para tratamento de lixiviado efluente da etapa de tratamento biológico por lodos ativados, no próprio aterro. O lixiviado do aterro de Gramacho possui características particulares, como elevadas concentrações de materiais orgânicos recalcitrantes, nitrogênio amoniacal e sais, além de grandes variações na sua composição. O *wetland* mostrou-se flexível para tratar diferentes cargas de poluentes, com bons níveis de eficiência.

Os resultados ratificam experiências mundiais de que *wetlands* construídos, em aterros onde exista disponibilidade de área para a sua instalação, são alternativas eficientes para integrar sistemas de tratamento de lixiviados, com custos de implantação e operação relativamente baixos, compatíveis com a realidade da maioria dos municípios brasileiros.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à FINEP, à Caixa Econômica Federal e ao apoio do CNPq. Esse projeto é integrante do Programa de Pesquisas em Saneamento

Básico – PROSAB. À COMLURB - Companhia Municipal de Limpeza Urbana do Rio de Janeiro e à Prefeitura Municipal de Pirai. Ao Laboratório de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente - LES/UERJ e à TECMA - Tecnologia em Meio Ambiente pela realização das análises.

## REFERÊNCIAS

APHA, AWWA, WPCF. *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, 20th edition. New York: 1998.

DEBUSK, W.F. *Evaluation of a Constructed Wetland for Treatment of Leachate at a Municipal Landfill in Northwest Florida*. In: Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates. MULAMOOTTIL, G.; Mc BEAN, E.A.; ROVERS, F. (Org.). Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, p. 175 – 186. 1998.

ECKHARDT, D.A.V., SURFACE, J.M., PEVERLY, J.H. *A Constructed Wetland System for Treatment of Landfill Leachate, Monroe County, New York*. In: Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates. MULAMOOTTIL, G.; Mc BEAN, E.A.; ROVERS, F. (Org.). Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, p. 205 – 222. 1998.

FEEMA. DZ-205.R-5, aprovada pela Deliberação CECA nº2491, de 05 de outubro de 1991. *Diretriz de controle de carga orgânica em efluentes líquidos de origem industrial*. Diário Oficial (do Estado do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, 24 de outubro de 1991.

FEEMA. NT-202.R-10, aprovada pela Deliberação CECA nº1007, de 04 de dezembro de 1986. *Critérios e padrões para lançamento de efluentes líquidos*. Diário Oficial (do Estado do Rio de Janeiro), Rio de Janeiro, 12 de dezembro de 1986.

FERREIRA, J.A. et al. *Wetland: Resultados no Tratamento do Chorume do Aterro Sanitário de Pirai - RJ*. In: 22º CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL. JOINVILLE, SC, 2003.

GIORDANO, G.. *Análise e Formulação de Processos para Tratamento de Chorumes Gerados em Aterros de Resíduos Sólidos Urbano*. Tese de Doutorado. Departamento de Ciências dos Materiais e Metalurgia, Pontifícia Universidade Católica. Rio de Janeiro, 2003.

KADLEC, R.H. *Constructed Wetlands for Treating Landfill Leachate*. In: Constructed

Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates. MULAMOOTTIL, G.; Mc BEAN, E.A.; ROVERS, F. (Org.). Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, p. 17 – 32. 1998.

MANNARINO, C.F., *Uso de Wetland Subsuperficial no Tratamento de Efluente de Estação de Tratamento de Chorume por Lodos Ativados*. Dissertação de Mestrado. Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental, Universidade do Estado do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2003.

MCEHLUM, T. *Wetlands for Treatment of Landfill Leachates in Cold Climates*. In: Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates. MULAMOOTTIL, G.; Mc BEAN, E.A.; ROVERS, F. (Org.). Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, p. 33 – 46. 1998.

SCHWARTZ, L.N., WISEMAN, L.P., MELEAR, E.L.. *Leachate Wetland Treatment System in Orange County, Florida*. In: Constructed Wetlands for the Treatment of Landfill Leachates. MULAMOOTTIL, G.; Mc BEAN, E.A.; ROVERS, F. (Org.). Boca Raton, Florida: Lewis Publishers, p. 99 – 140. 1998.

URBANIC-BERCIC, O. *Investigation into the Use of Constructed Reedbeds for Municipal Waste Dump Leachate Treatment*. Water Science & Technology, Great Britain, v. 29, p. 289-294, 1994.

### Endereço para correspondência:

**Camille Ferreira Mannarino**  
**Departamento de Engenharia**  
**Sanitária e do Meio Ambiente**  
**Universidade do Estado do Rio de Janeiro - UERJ**  
**Av. São Francisco Xavier, 524 Sala 5029**  
**20550-900 Rio de Janeiro - RJ - Brasil**  
**Tel.: (21) 2587-7743**  
**E-mail: camille@eng.uerj.br**