

III-459 - CARACTERIZAÇÃO DA EFICIÊNCIA DOS PROCESSOS DE TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO NO BRASIL

Edilincon Martins de Albuquerque⁽¹⁾

Engenheiro Civil pela Universidade Federal do Amazonas (UFAM). Mestrando em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela Escola de Engenharia de São Carlos na Universidade de São Paulo (EESC/ USP).

Jurandyr Povinelli

Engenheiro Civil e Engenheiro Sanitarista pela Universidade de São Paulo (USP). Especialização em Engenharia Sanitária e mestrado em Saúde Pública pela USP. Doutor em Engenharia Hidráulica e Saneamento pela EESC-USP. Livre-Docente e professor titular da EESC-USP.

Endereço⁽¹⁾: Av. 7 de setembro, 1347, apto. 203 – Centro, São Carlos - SP. Tel: +55 (16) 9708 - 7703 e-mail: edilincon@sc.usp.br

RESUMO

O aterro sanitário é a unidade de disposição final de resíduos sólidos mais empregada no Brasil, e ainda continuará sendo por algum tempo, devido principalmente à maior viabilidade técnica e econômica, quando comparada a outras alternativas, além de se apresentar como sendo a forma mais segura ambientalmente. Um dos principais resíduos gerados nos aterros é o lixiviado, que apresenta grande potencial poluidor devido à elevada concentração de matéria orgânica (biodegradável e refratária) e matéria inorgânica, como cloretos e nitrogênio amoniacal. O tratamento de lixiviado tem se mostrado como um desafio mundial e vários processos de tratamento vêm sendo estudado nos últimos anos, mas devido à grande variabilidade e complexidade das características desta água residuária, ainda não foi obtido um sistema de tratamento técnico e economicamente viável e que atenda a todos os padrões de lançamento de efluentes estabelecidos pela legislação vigente. No Brasil as pesquisas são relativamente reduzidas e recentes. Este trabalho apresenta uma revisão geral dos processos de tratamento de lixiviado estudados no Brasil, dentre os biológicos, físico-químicos e mistos, com abordagem das diversas experiências, enfocando as características dos lixiviados, do processo de tratamento e os resultados obtidos, de modo a servir de base bibliográfica e fundamentação para avaliação destes sistemas no tratamento de lixiviado de diferentes aterros brasileiros.

PALAVRAS-CHAVE: resíduos sólidos, aterro sanitário, águas residuárias, processos físico-químicos, processos biológicos.

INTRODUÇÃO

Segundo estatísticas do SNIS - Sistema Nacional de Informações Sobre Saneamento e do IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, o aterro sanitário é o método de disposição final de resíduos sólidos urbanos mais adotado no Brasil, apresentando crescimento tanto em termos de número de municípios quanto na massa total de resíduos recebida. Isso se deve a maior viabilidade técnica e econômica e pela pressão da legislação brasileira, a exemplo das leis 11.445/2007 – Diretrizes Nacionais do Saneamento Básico e 12.305/2010 - Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS).

A partir da combinação do líquido resultante da biodegradação anaeróbia dos resíduos sólidos e ainda da água pluvial que percola na massa sólida, é formado o lixiviado, que possui elevada concentração de sólidos dissolvidos, elevada concentração de matéria orgânica e inorgânica, sendo um efluente potencialmente poluidor e se não coletado, transportado e tratado adequadamente pode causar poluição aos recursos hídricos, problemas de saúde e impactos sobre o meio ambiente (TORRES, 1997; KOSTOVA, 2006; RENO, S. *et al.*, 2008).

Os aterros sanitários são considerados hoje como uma das melhores soluções para os resíduos sólidos urbanos no Brasil, tanto do ponto de vista técnico quanto econômico. Eles têm como vantagens o confinamento seguro dos resíduos e a otimização do uso do espaço disponível. Os antigos lixões estão sendo progressivamente substituídos por aterros bem projetados e operados. Porém, os aterros ainda representam risco ambiental devido à liberação de gases e à produção de lixiviado (BIDONE & POVINELLI, 2010).

A partir da combinação do líquido resultante da biodegradação anaeróbia dos resíduos sólidos, bem como da própria água constituinte dos resíduos, e ainda da água pluvial que percola na massa sólida, é formado o lixiviado, que possui elevada concentração de sólidos dissolvidos extraídos durante a infiltração na massa de resíduos, o que lhe confere a coloração escura, matéria orgânica (biodegradável e refratária) e inorgânica, como o cloreto de amônio e metais pesados, decorrentes da decomposição do lixo. É um efluente potencialmente poluidor e se não coletado, transportado e tratado adequadamente pode causar poluição aos recursos hídricos, problemas de saúde e impactos sobre o meio ambiente (TORRES, 1997; KOSTOVA, 2006; RENO, S. *et al.*, 2008).

O lixiviado de aterro sanitário vem sendo largamente estudado no Brasil e no exterior, principalmente nos últimos 10 anos. Dentre os processos mais estudados estão os físico-químicos e biológicos. No entanto o número de estudos ainda é reduzido no Brasil, além da grande variabilidade das características dos lixiviados brasileiros, obtendo-se uma grande gama de resultados nos processos de tratamento de lixiviados de diferentes aterros.

Nesse sentido, este trabalho tem como objetivo reunir as diversas experiências no tratamento de lixiviados brasileiros, de modo a contribuir com projetistas e pesquisadores, fornecendo uma caracterização geral do desempenho desses processos de tratamento e das características do lixiviado estudado, a partir de uma revisão bibliográfica minuciosa em diferentes bases bibliográficas, revistas, anais, teses e dissertações etc.

MATERIAIS E MÉTODOS

Foi realizada revisão crítica da bibliografia por meio de consulta a livros, artigos de periódicos científicos, anais de congressos, teses, dissertações, monografias de especializações, entre outros trabalhos científicos, além de sites de organizações, universidades e órgãos públicos, em busca da abordagem teórica e prática dos diferentes sistemas de tratamento de lixiviados brasileiros, bem como suas condições operacionais, resultados obtidos e interferências. Foi selecionada uma amostragem de estudos de sistemas de tratamento de lixiviados de aterros brasileiros, por meio da análise de trabalhos publicados referentes a processos biológicos, físico-químicos e tratamento combinado com esgoto sanitário.

Foram selecionados os estudos de avaliação da eficiência de sistemas de tratamento de lixiviado oriundo de 32 aterros diferentes, por meio da análise de 79 trabalhos publicados, sendo 36 referentes a processos biológicos, 30 a físico-químicos e 13 a tratamento combinado com esgoto sanitário. Em termos de observações, foram levantadas 99 observações, considerando que foram listadas várias observações de um mesmo trabalho.

Os estudos foram classificados segundo o tipo de processo adotado na etapa avaliada e sistema utilizado (tipo de reator, lagoas ou reagentes aplicados). A caracterização dos lixiviados baseou-se nos parâmetros de DQO (Demanda Química de Oxigênio), relação DBO/DQO (indicador de biodegradabilidade) e N-NH₃ (Nitrogênio amoniacal) e a eficiência do sistema foi avaliada pela remoção de DQO e de N-NH₃, além da remoção de cor ou turbidez, quando possível.

A partir da sistematização dos dados foi feita análise de distribuição estatística da eficiência dos sistemas estudados, em termos da “idade” do lixiviado tratado, do tipo de processo adotado e da eficiência de remoção de DQO e de nitrogênio amoniacal. Os resultados foram apresentados através de tabelas e de gráficos de Pareto, no qual é mostrado o hidrograma da distribuição de frequência e a curva de frequência relativa acumulada da eficiência de remoção dos sistemas, bem como as respectivas medidas de tendência e de dispersão.

RESULTADOS

De uma maneira geral os processos convencionalmente aplicados no tratamento de lixiviado de aterro sanitário são os biológicos aeróbios e anaeróbios; físico-químicos, que inclui a oxidação, adsorção, precipitação, coagulação/floculação, sedimentação/flotação e *air stripping*; e ainda processos de transferência do lixiviado, como recirculação no próprio aterro ou consórcio com esgoto sanitário em estações de tratamento.

A seguir são apresentados alguns estudos brasileiros utilizando esses processos, relatados na literatura como principais para o tratamento de lixiviado, divididos em físico-químicos, biológicos e consorciado com esgoto sanitário.

Tratamento biológico de lixiviado

Devido a sua confiabilidade, simplicidade, alto custo-benefício, os processos biológicos de tratamento, tanto de crescimento suspenso como aderido, são comumente empregados para tratar grande parte dos lixiviados contendo alta concentração de matéria orgânica. A biodegradação é realizada por microrganismos, que podem degradar compostos orgânicos a dióxido de carbono sob condições aeróbias e a biogás sob condições anaeróbias (FORGIE, 1988; LEMA, 1988; HEYER, 1998; RENOUS, S. *et al.*, 2008).

Os processos anaeróbios apresentam como vantagens principais a baixa energia requerida, pela ausência de oxigênio, possibilidade de gerar energia a partir do biogás, representando uma alternativa ao uso de combustíveis fósseis, além da pequena geração de lodo, que diminui os aspectos de gerenciamento do resíduo (BOYLE, 1974; LETTINGA, 1995; BATSTONE *et al.*, 2002; STEGMANN, R. *et al.*, 2005). Quanto ao processo aeróbio, as reações ocorrer em alta velocidade, devido à maior atividade microbiana, diminuindo bastante o tempo de tratamento, mas favorecendo a produção elevada de lodo. E além de permitir a redução de poluentes orgânicos biodegradáveis também pode alcançar a nitrificação do nitrogênio amoniacal presente no lixiviado (BAE, B. *et al.*, 1999; LIN, S. H., 2000; LI, X. Z., 2001; STEGMANN, R. *et al.*, 2005).

Os quadros 1, 2 e 3 apresentam alguns estudos de sistemas de tratamento biológico de lixiviado desenvolvidos no país.

Quadro 1 – Eficiência dos sistemas de tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processos biológicos anaeróbios estudados no Brasil

SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO	TDH (dias)	DQO _{afl.} máxima [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REFERÊNCIAS
Reator Anaeróbio em Bateladas Sequências (ASBR)	Aterro de Ribeirão Preto (Ribeirão Preto - SP)	7	2968	0,18	0%			MASSAROTTO, W. L. et al., 2010
	Aterro de Jardinópolis (Jardinópolis-SP)		3343	0,284	0%			
	Lisímetro (célula experimental)		56350	0,394	30%			
	Lisímetro (célula experimental) da UnB	3	3940	0,21 ¹	76%			GOMES, L. A., 2008
Filtro Anaeróbio de fluxo descendente	Aterro da Extrema (Porto Alegre - RS)	33	14800	0,46	86%			REICHERT G. A. & COTRIM, S. L. S., 2000
	Aterro Sanitário de Urussanga (Urussanga-SC)	30	7586,6	-	82%	-	19%	CASAGRANDE, E., 2006
	Aterro Sanitário de São Carlos (São Carlos - SP)	7	11000	0,60 ¹	>70%	2155	<60%	CONTRERA, R. C., 2008
	Aterro Sanitário de São Leopoldo - RS	10	7100	0,4	61%			SCHOENELL, E. K et al., 2009
	Aterro Sanitário Metropolitano Santa Tecla (Gravataí - RS)	56	14670	0,53	78%			FLECK, E., 2003

¹ Biodegradabilidade expressa pela relação AVT/DQO.



Quadro 1 – Eficiência dos sistemas de tratamento de lixo liado de aterro sanitário por processos biológicos anaeróbios estudados no Brasil (Continuação)

SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO	TDH (dias)	DO _{sat} , máxima [mg/L]	DBO/DOO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REFERÊNCIAS
Filtro anaeróbio de fluxo ascendente (FAFA)	Aterro Sanitário de São Leopoldo - RS	10	7100	0,4	63%			SCHOENELL, E. K. et al., 2009
	Aterro São Glácomo (Caxias do Sul - RS)	2,04	64930	0,7	53,8%	1462	-	DACANAL, M., 2006
	Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio (Minas do Leão - RS)	7,6	20070	0,46	55%	2470	-	BIDONE, R. F., 2007
	Aterro Sanitário de São Carlos (São Carlos - SP)	1-5	10000	0,35 ¹	>70%			CONTRERA, R. C., 2008
Reator Anaeróbio Compartmentado (RAC)	Aterro Delta IA (Campinas - SP)	80, 45, 15, 5	78000	0,71	97, 96, 92, 80%			CLARETO, C. R. & CAMPOS, J. R., 1996
Reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)	Florianópolis - SC	2,11	31092	0,31	>75%			RITA, F. et al., 2002
	Aterro da Muribeica (Recife - PE)	2,3	3995	0,24	60%			SANTOS, A. F. M. S.; KATO, M. T.; FLORENCIO, L., 2003
	Campina Grande - PB	8	1458	0,75	78%			LEITE, V. D. et al., 2003
Reator anaeróbio horizontal de leito fixo (RAHLF)	Aterro sanitário de Rio Claro (Rio Claro - SP)	2,5	5000	0,7	79,7%			CONTRERA, R. C., 2003

¹ Biodegradabilidade expressa pela relação AVT/DOO.

Quadro 2 – Eficiência dos sistemas de tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processos biológicos aeróbios estudados no Brasil

SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO	TDH (dias)	DQO _{aerl.} máxima [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REFERÊNCIAS
Filtro Biológico Percolador	Aterro Metropolitano de Gramacho (Rio de Janeiro - RJ)	1,07	3315	0,13	12%	1732	37%	LUZIA, M. R. et al., 2005
	Aterro Sanitário de Piraí (Piraí - RJ)	0,73 - 3,1	621	0,11	13%	338	41%	FERREIRA, J. A. et al. 2005
Biofiltro Aerado Submerso (BAS)	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste (Caucaia - CE)	1,3	376,2	-	31%	300	98,6%	FARIAS FILHO, A. L. et al., 2010
	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste (Caucaia - CE)	30,5	500	0,4	74%	170	99,0%	RODRIGUES, E. M., 2010)
	Aterro de Londrina (Londrina - PR)	20	2463	0,07	49%	828	99%	MARINGONGA, J. A., 2008
Lodos Ativados	Aterro de Londrina (Londrina - PR)	13	2150	-	<20%	440	99,8%	TRENNEPOHL, F. G., 2009
	Aterro de Jockey Club (Brasília - DF)	2	3150	-	-	858	61-99%	REITAS, B. O., 2009
	Aterro Sanitário Metropolitano Oeste (Caucaia - CE)	1	850	0,4	73,7%	263	99,2%	RODRIGUES, E. M., 2010
	-	4-9	-	-	-	590	100,0%	ALVIM, C. A. N. et al., 2009
	Aterro de Londrina (Londrina - PR)	11	-	0,07	-	325	92%	HOSSAKA, A. L., 2009
	Aterro Bandeirantes - SP	-	-	0,28	91,2% ¹	220	91%	SILVA, D. D., 2009
	Aterro São João - SP	-	-	0,3	98,5% ¹	230	94,8%	

¹ Remoção de matéria orgânica expressa em termos de DBO.

Quadro 3 – Eficiência dos sistemas de tratamento de lixiviado de aterro sanitário por processos biológicos de lagoas estudados no Brasil

SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO	TDH (dias)	DQO _{afli. máxima} [mg/L]	DBO/DQO O média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REFERÊNCIAS
Lagoa aerada	Aterro de Londrina (Londrina - PR)	5	2913	0,03	33%	950	23%	HOSSAKA, A. L., 2008
	Aterro Sanitário da Central de Resíduos do de Belo Horizonte - MG	7	2873	0,04	20% ¹	1195	70%	MORAVIA, W. G. et al., 2009
Lagoa Facultativa aerada	Aterro Sanitário da Central de Resíduos do de Belo Horizonte - MG	14	3000	-	40%	-	-	CASTILHOS, A. B. et al., 2009.
Lagoas de Estabilização do tipo australiana Anaer, Facul, Mat)	Aterro de Tijuquinhas (Biguaçu - SC)	66	2378	0,5	77%	1473	99%	MACHADO, R. S., 2009
	Aterro sanitário de Biguaçu - SC	98	3287	0,4	60%	1006	84%	MARTINS, C. L. et al., 2009
	-	98	1990	0,3	68%	1001	96%	MARTINS, C. L. et al., 2010
Lagoa de Decantação + Lagoa Anaeróbia + 3 Lagoas	Aterro da Muribeca (Recife - PE)	42	6963	0,34	43%	-	-	ROCHA, E. M. R., 2005
Wetlands Construídos	Aterro Sanitário de Pirai (Pirai - RJ)	2	2435	0,13	41%	189	51%	MANNARINO, C. F. et al., 2005
	Aterro Metropolitano de Gramacho (Rio de Janeiro - RJ)	9	2800	0,13	31%	370	45%	
	Aterro Sanitário da Central de Resíduos do Recreio (Minas do Leão - RS)	5,6	5770	0,35	98%	1864	100%	BIDONE, R.F., 2007

¹ Remoção de matéria orgânica expressa em termos de DQO solúvel.

Na figura 1 são mostrados os gráficos de Pareto da distribuição de frequência, em termos do número de observações objetiváveis, da eficiência de remoção de DQO e nitrogênio amoniacal nos sistemas biológicos de tratamento revisados neste trabalho.

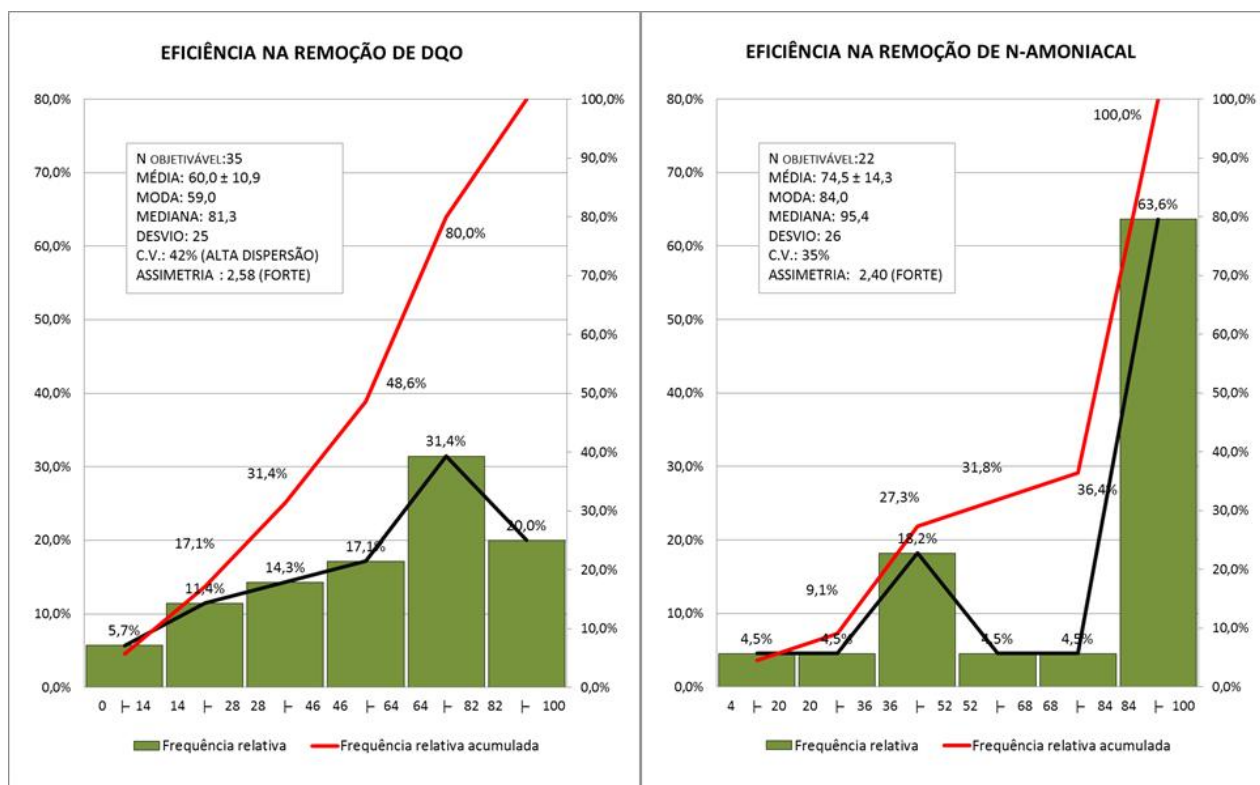


Figura 1 – Gráficos de Pareto da eficiência de remoção de DQO e N-amoniacal das observações dos sistemas biológicos de tratamento.

Em geral, observou-se desempenho satisfatório dos processos biológicos na remoção de matéria orgânica. Uma parcela de 31,4% (11) dos sistemas estudados apresentou eficiência de remoção de DQO entre 64 e 82%. A eficiência média na remoção de DQO nos sistemas de sistemas biológicos estudados foi de 60%. Quanto à remoção de N-amoniacal foi verificado um ótimo desempenho, apesar de o número absoluto de estudos objetiváveis ser menor (22), 63,6% (14) dos trabalhos alcançou uma eficiência acima de 84%. A eficiência média na remoção de N-amoniacal para esse conjunto de sistemas biológicos levantados foi de 74,5%.

Tratamento combinado de lixiviado de aterro com esgoto sanitário

Conceitualmente, o tratamento combinado de lixiviado refere-se ao seu lançamento junto ao afluente da estação de tratamento de esgoto sanitário, devendo resultar em um efluente tratado que atenda às exigências legais. Largamente utilizado nos Estados Unidos, Europa e Japão, sobre essa prática ainda há muitas incertezas, sobre as interferências que o lixiviado, em função das suas características, pode promover nos processos de tratamento, especialmente nos processos biológicos. Critérios para a utilização do tratamento combinando, como a proporção de diluição, ainda estão sendo estudados em estações e sistemas piloto no Brasil (FERREIRA, J.A. *et al.*, 2009).

O tratamento consorciado de lixiviado com esgoto sanitário tem sido empregado em diversos países do mundo, apresentando-se como uma alternativa atraente como uma forma de reduzir custos de implantação de unidades de tratamento nos aterros e custos operacionais por longo período de tempo. No Brasil, vem sendo adotado em algumas cidades, tais como São Paulo (SP), Porto Alegre (RS), Niterói e Rio de Janeiro (RJ), Belo Horizonte e Juiz de Fora (MG) (BOCCHIGLIERI, 2005; FACCHIN *et al.*, 2000; VIANA, A. S.P.S., 2007; MARQUES, E. V., *et al.*, 2010 ; FERREIRA *et al.*, 2005).

O quadro 4 reúne alguns estudos de sistemas de tratamento combinado com esgoto sanitário desenvolvidos no país.

Quadro 4 – Eficiência de sistemas de tratamento de lixiviado de aterro sanitário combinado com esgoto sanitário estudados no Brasil.

SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO	TDH (h)	% LIX	DQO _{afl.} máxima [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REFERÊNCIAS
Reator anaeróbico de fluxo ascendente e manta de lodo (UASB)	Aterro Sanitário Metropolitano da cidade de João Pessoa (PB) / Rede de esgotamento sanitário da cidade de Campina Grande (PB)	12	1	900	0,4	55%	127	-	FERREIRA, J. A. <i>et al.</i> , 2009
		12	10	1039	0,43	45%	68	10-13%	
		12	1	1711	0,23	64%	-	-	CIRNE, J. R. R. <i>et al.</i> , 2009
	EXTRABES – Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários, da UFPB (Campina Grande-PB)	6 - 12	-	700-2800	-	61 - 83%	-	-	LIMA, M. C. S. <i>et al.</i> , 2002
Coagulação/ floculação	Aterro do Morro do Céu/ Estação de tratamento de esgotos de Icarai - Niterói (RJ)	-	0,5	543	-	70,3%	-	-	CAMPOS, J. C., <i>et al.</i> , 2009
		-	1	436	-	54,3%	-	-	
		-	2	584	-	40,5%	-	-	
	-	-	2	105	-	13%	57	49%	BORDIN, F. <i>et al.</i> , 2009

Quadro 4 – Eficiência de sistemas de tratamento de lixo liado de aterro sanitário combinado com esgoto sanitário estudados no Brasil.
(Continuação)

SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO	TDH (h)	% UX	DQO _{arfi} , máxima [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REFERÊNCIAS
Lagoas de Estabilização do tipo australiana (Anaer, Facul, Mat)	Aterro Sanitário da Extrema/ ETE Lami (Porto Alegre - RS)	55 - 284 ¹	0,1 - 10,7	680,3	0,38	55%	171,3	99%	FACCHIN J. M. J. et al., 2000
	Aterro sanitário de Gramacho (RJ)/ Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da UFRJ (CETE/UFRJ)	15,2 ¹	0,2-2,0	315	0,54	51%	56	54%	FERREIRA, J.A. et al., 2009
	Aterro sanitário de Geridino (RJ)/ Centro Experimental de Tratamento de Esgotos da UFRJ (CETE/UFRJ)	4,8 - 7,1 ¹	0,2-2,0	337	0,59	72%	115	84%	VIANA, A.S.P.S. et al., 2007
	EXTRABES – Estação Experimental de Tratamentos Biológicos de Esgotos Sanitários, da UFPB (Campina Grande-PB)	24,5 ¹	1 - 15	450	0,55	55%	48	86%	JÚNIOR, G. B. A. et al., 2002

¹ TDH expresso em dias.

Quadro 4 – Eficiência de sistemas de tratamento de lixiviado de aterro sanitário combinado com esgoto sanitário estudados no Brasil.

(Continuação)

SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO/ LIXIVIADO	TDH (h)	% LIX	DQO _{afl.} máxima [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH3 [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH3	REFERÊNCIAS
Lodos Ativados Convencional	Aterro do Morro do Céu/ Estação de tratamento de esgotos de Icarai - Niterói (RJ)	6	0,5 - 1,1	330	-	81%	44	36%	FERREIRA, J.A. <i>et al.</i> , 2009
			2,0 - 2,5	657	-	85%	62	43%	
	17	0,5 - 1,0	379	0,6	77%	36	>95%		
	19	2,0 - 2,5	356	0,3	72%	42	>95%		
Lodos Ativados em Batelada (SBR)	Aterro sanitário de Macaúbas/ ETE Arrudas - MG		3,4 ¹	400	-	85 - 95% ¹	35	>90%	MARQUES, E. V., <i>et al.</i> , 2010
	ES e LIX da ETE Icarai (Niterói - RJ)	24	0,5 - 1,1	381	-	86%	50	94%	FERREIRA, J.A. <i>et al.</i> , 2009
			2,0 - 2,5	788	-	90%	63	83%	
	Lodos Ativados em Batelada (SBR)	Aterro Sanitário Santa Tecla (Gravataí - RS)	-	2,6 - 6,2	-	-	52,3 – 96,0	280	11,8 – 99,8
Aterro Sanitário do Aterro Sanitário do Lami (Porto Alegre - RS)									
Aterro Sanitário Municipal de Canoas (RS)									
Central de Disposição Final de Resíduos Industriais (Sapucaia do Sul - RS)									
	Aterro Sanitário Municipal de Esmeralda do Sul								

¹ Expresso em termos de DBO.

Em geral, observou-se um desempenho muito bom dos processos de tratamento consorciado na remoção de matéria orgânica. Uma parcela de 31,6% (6) dos sistemas estudados apresentou eficiência de remoção de DQO entre 64 e 82%, e uma parcela de 26,3% (4) desses trabalhos apresentaram eficiência superior a 82%. A eficiência média na remoção de DQO para esse conjunto de sistemas de tratamento consorciado levantados foi de 66,4%.

Na figura 2 são apresentados os gráficos de Pareto da distribuição de frequência, em termos do número de observações objetiváveis, da eficiência de remoção de DQO e nitrogênio amoniacal nos sistemas de tratamento combinado revisados neste trabalho.

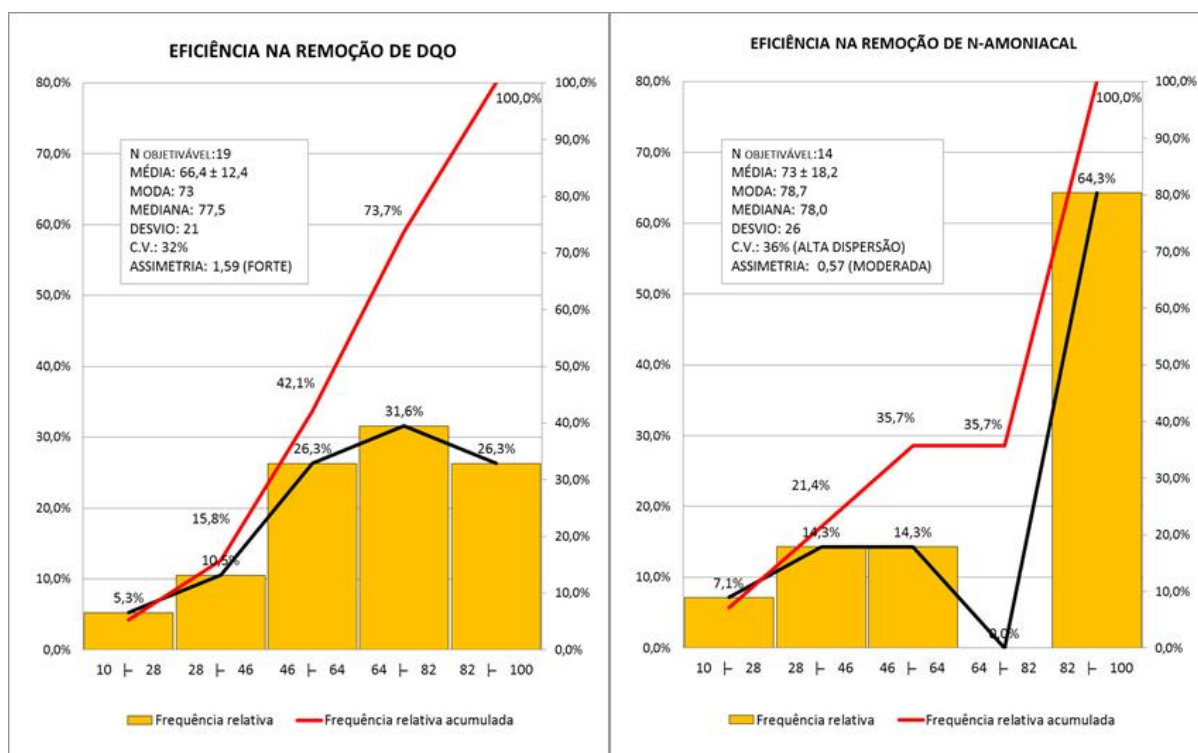


Figura 2 – Gráficos de Pareto da eficiência de remoção de DQO e N-amoniacal das observações dos sistemas consorciados de tratamento.

Quanto à remoção de N-amoniacal se observou um ótimo desempenho, apesar de o número absoluto de estudos objetiváveis ser menor (14), 64,3% (9) dos trabalhos alcançou uma eficiência acima de 82%. A eficiência média na remoção de N-amoniacal para esse conjunto de sistemas consorciados levantados foi de 73%.

Tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário

Os processos físico-químicos proporcionam a redução de sólidos suspensos, partículas coloidais, cor e compostos tóxicos. Dentre os principais estão a flotação, coagulação/floculação, adsorção, oxidação química e *Air Stripping*. No lixiviado, processos físico-químicos geralmente são aplicados no pré-tratamento, para remoção das elevadas cargas de nitrogênio amoniacal e sólidos dissolvidos (cor), e no pós-tratamento, para a remoção de compostos recalcitrantes.

Apesar de os processos biológicos apresentarem bom desempenho na remoção de matéria orgânica biodegradável e às vezes de nitrogênio amoniacal, em geral não removem compostos recalcitrantes, de difícil degradação biológica e que permanecem na massa líquida. Os compostos refratários, em especial as substâncias húmicas, as elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal, metais e compostos halogenados indesejáveis, todos característicos do lixiviado de aterro estabilizado, dificultam o tratamento biológico e tornam-se alvo dos processos físico-químicos (OZTURK *et al.*, 2003; TATSU *et al.*, 2003; AZIZ *et al.*, 2007; RENOUS, S. *et al.*, 2008).

No quadro 5 são apresentados alguns estudos de sistemas de tratamento físico-químico de lixiviado desenvolvidos no Brasil.

Quadro 5 – Eficiência de sistemas de tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário estudados no Brasil.

PROCESSOS	SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO/ LIXIVIADO	REAGENTES	DOSAGEM ¹	DQO _{infl. máxima} [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REMOÇÃO TURBIDEZ	REFERÊNCIAS
Coagulação/ floculação	Coagulação com Cloreto Férrico	Lixão da cidade de Maceió	FeCl ₃ (Cloreto Férrico)	0,5 - 1 g/L	4657		<20%	1307			NOBREGA, S. W. N. et al., 2009
		Aterro Metropolitano de Gramacho (RJ)	FeCl ₃ (Cloreto Férrico)	1,3 g/L	2460	0,01	50%				CHEIBUD, A. F., et al., 2010
				2g/L	3267	0,03	78,4%	957	-	85%	SILVA, F. B. et al., 2009
	Coagulação com Sulfato de Alumínio	Aterro sanitário da Região Metropolitana da Grande Vitória - ES	SO ₄ (Sulfato de Alum)	0,5 - 15g/L	50798		65%	2949		90% (uT)	ZDRADEK, C. P. et al., 2010
					3600		75%	1492		70 - 90% (uT)	
					50798		90%	2949		70% (uT)	
		Aterro Sanitário da Central de Resíduos do de Belo Horizonte MG	Al ₂ (SO ₄) ₃	1,5 - 2g/L	3600		80%	1492		70 - 90% (uT)	
					2971	0,04	16%	1516	-	33%	
Eletrolítico	Outros coagulantes	Aterro sanitário de Biquaçu (de Florianópolis - SC)	Tanino vegetal (concentração de 10%) - Tanfloc SL®	2,25 g/L	1996	0,27	38%	995	-	37%	AMORIM, A.K.B. et al, 2009
					210	-	86%	28	9,3%		NAGASHIMA, L. A. et al., 2009
	UV/H ₂ O ₂	Aterro sanitário de Biquaçu (de Fortaleza - CE)	Fe ₂ SO ₄ .7H ₂ O / (H ₂ O ₂)	-	3988	0,05	72,3 - 97,4	-	-	-	RODRIGUES, M. C. et al., 2007
				15:1	3600	-	80%	1492	-	-	ROCHA, E. M. R., et al., 2009
				25:1	50798	-	95%	2949	-	-	BORGES, R. M. et al., 2010
	FENTON	Aterro sanitário da Região Metropolitana da Grande Vitória - ES	H ₂ O ₂ / Fe+2	10, 12,5 : 1	2971	0,04	>80%	1516	-	90%	AMORIM, A.K.B. et al, 2009
				17,4 g/L / 1,45 - 2	6918	0,3	80%	2300			VIEIRA, F. F. et al., 2009
				100mg / 200-800	3267	0,03	83%	957	92%	43% (uT)	SILVA, F. B. et al., 2009
		Aterro Sanitário de João Pessoa - PB	H ₂ O ₂ / Fe+2	1, 5/1, 7/1, 12/	6918	0,3	3%	2300			VIEIRA, F. F. et al., 2009
		Aterro Metropolitano de Gramacho (RJ)	H ₂ O ₂ / Fe+2	-	2460	0,01	88%				CHEIBUD, A. F., et al., 2010

¹ As proporções são expressas em razão molar. / ² Quando não indicada a

Quadro 5 – Eficiência de sistemas de tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário estudados no Brasil. (Continuação)

PROCESSOS	SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO/ LIXIVIADO	REAGENTES	DOSAGEM ¹	DQO _{af} , máxima [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REMOÇÃO TURBIDEZ	REFERÊNCIAS
Precipitação Química	Hidróxido de Cálcio	Aterro Sanitário da Muribeca (PE)	Ca(OH) ₂	15g/L	8259	0,61	18%	-	-		SILVA, F.M.S., 2008
		Aterro Metropolitano de Gramacho (RJ)	MgCl ₂ .6H ₂ O / Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	4,17 - 10,4 g/L / 5,76 - 6,68 mL/L	1675	0,08	3%	1020	93,5%		YOKOYAMA, L. et al., 2009
	Compostos de fosfato e magnésio(PAM)	-	MgCl ₂ .6H ₂ O + Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	1 : 1 : 1	27500	-	-	47	97%		AMORIM, A.K.B. et al, 2009
			MgO + H ₃ PO ₄ (85%)	2 : 1 : 1	29900	-	-	263	81%		
			MgCl ₂ . 6H ₂ O + Na ₂ HPO ₄ .12H ₂ O	1 : 1 : 1 1,8 : 1 : 1,8	2576 2547	- -	15% 35%	1079 1501	32% 99%		AMORIM, A.K.B. et al, 2009
Adsorção	Carvão Ativado Granular (CAG)	Aterro Sanitário da Central de Resíduos do de Belo Horizonte - MG		-	2971	0,04	28,3%	1516	-		AMORIM, A.K.B. et al, 2009
		Lixão da cidade de Maceió - AL		10 g/L, 20 g/L	4657		<25%	1307			NOBREGA, S. W. N. et al., 2009
	Carvão Ativado em Pó (CAP)	Aterro Metropolitano de Gramacho (RJ)		5g/L	2580	0,01	70%	1506	37%	70% (uT)	BORGES, A. V., et al., 2010
				10g/L			80%		43%	70% (uT)	
	ADSORÇÃO EM VERMICULITA EXPANDIDA	Aterro Sanitário de Curitiba - MT		5g/300mL			-	1760	59%		DIAS, N. C. & BRAGA, M. C. B., 2009

¹ As proporções são expressas em razão molar. / ² Quando não indicada a

Quadro 5 – Eficiência de sistemas de tratamento físico-químico de lixiviado de aterro sanitário estudados no Brasil. (Continuação)

PROCESSOS	SISTEMAS	ATERRO SANITÁRIO/ LIXIVIADO	DOSAGEM ¹	DQO _{afli. máxima} [mg/L]	DBO/DQO média	REMOÇÃO DE DQO	N-NH ₃ [mg/L]	REMOÇÃO DE N-NH ₃	REFERÊNCIAS
Air Stripping (Arraste)	Torre de Stripping	Aterro Sanitário de São Carlos (São Carlos - SP)	6 dias	4900	-	-	2900	>99%	SOUTO, G.D.B., 2009
			5 dias	3441	-	50%	2628	99%	FERRAZ, F.M., 2010
		Aterro Sanitário da Central de Tratamento de Resíduos Sólidos (Belo Horizonte – MG)	-	2443	0,05	-	1271	80%	AMARAL, M. C. S. et al., 2008
	Torres de Stripping associadas	Aterro sanitário metropolitano da cidade de João Pessoa - PB	70min	-	-	-	1340	87%	BENTO, E. R. et al., 2009
			60min	-	-	-	1269	91,5%	
			5 - 7 horas	-	0,3	-	2200	>90%	LEITE, V. D. et al., 2009
	Reator Compartimentado	Estação de Tratamento de Lixiviados do Aterro Sanitário de São Leopoldo	12 dias	-	0,4	-	1802,9	73%	CAETANO, M. O. et al., 2009
	Reatores de fluxo pistonado em série		50 dias	10405	-	66%	1768	98,4%	LUNA, M. L. D. et al., 2009
	Lagoa de Stripping	Aterro Controlado de Londrina - PR	20 dias	2913	0,11	-	1000	80%	HOSSAKA, A. L., 2008

¹ As proporções são expressas em razão molar. / ² Quando não indicada a

Em geral, observou-se um desempenho muito bom dos processos de tratamento físico-químicos na remoção de matéria orgânica. Uma parcela de 37,9% (11) dos sistemas estudados apresentou eficiência de remoção de DQO entre 64 e 82%, e uma parcela de 20,7% (4) desses trabalhos apresentaram eficiência superior a 82%. A eficiência média na remoção de DQO para esse conjunto de sistemas de tratamento físico-químicos levantados foi de 58,2%. Quanto à remoção de N-amoniaco também se observou um ótimo desempenho, 57,9% (11) dos trabalhos alcançou uma eficiência acima de 81%. A eficiência média na remoção de N-amoniaco para esse conjunto de sistemas consorciados levantados foi de 73,5%.

Na figura 3 são mostrados os gráficos de Pareto da distribuição de frequência, em termos do número de observações objetiváveis, da eficiência de remoção de DQO e nitrogênio amoniacal nos sistemas físico-químicos de tratamento revisados neste trabalho.



Figura 3 – Gráficos de Pareto da eficiência de remoção de DQO e N-amoniaco das observações dos sistemas físico-químicos de tratamento

Em resumo, o quadro 6 apresenta a distribuição dos estudos levantados quanto à idade do aterro (relação DBO/DQO) e o processo aplicado ao tratamento do lixiviado.

**Quadro 6 – Distribuição dos sistemas de tratamento adotado e a idade do aterro de origem do
lixiviado em estudo**

RELAÇÃO DBO/DQO	0,4 - 1 (JOVEM)	0,1 - 0,4 (INTERMEDIÁRIO)	<0,1 (VELHO)	NÃO INFORMADO
Biológicos	15	11	4	6
	41,7%	30,6%	11,1%	16,7%
Combinado com ES	5	3	0	5
	38,5%	23,1%	0,0%	38,5%
Físico-químicos	2	5	11	12
	6,7%	16,7%	36,7%	40,0%
TOTAL	22	19	15	23
	27,8%	24,1%	19,0%	29,1%

CONCLUSÕES

O tratamento ideal de lixiviado de aterro sanitário, com o intuito de se reduzir os impactos negativos sobre o meio ambiente, ainda é um desafio. A complexidade e variabilidade da composição dessa água residuária tornam ainda mais difícil a tentativa de se estabelecer recomendações gerais. Os métodos aqui apresentados mostraram a grande diversidade de processos aplicados ao tratamento de lixiviado, sendo notória a necessidade de se avaliar cada caso e, com base em resultados de experiências já retratadas, adotar o sistema mais adequado para cada tipo de lixiviado, segundo suas características e os padrões de lançamento que devem ser alcançados.

A partir da caracterização dos processos biológicos no Brasil, foi observado que os sistemas anaeróbios são aplicados em maior número para remoção de matéria orgânica e os aeróbios para remoção de nitrogênio amoniacal, o processo tem alcançado bom desempenho no tratamento de lixiviado jovens, de alta relação DBO/DQO, considerando que estes alcançaram uma eficiência de remoção de DQO bruta média em torno de 60% e que mais de 88% das observações levantadas foram de tratamento de lixiviados novos e intermediários. Também apresentam alto desempenho na remoção N-Amoniacal, com uma média de 74,5% de eficiência de remoção, em especial quando operados favoravelmente e projetados adequadamente.

Quanto aos processos de tratamento combinado de lixiviado e esgoto sanitário, apesar do número reduzido de estudos realizados no Brasil, a partir do levantamento realizado, observou-se que o processo tem apresentado um desempenho muito bom tanto na remoção de matéria orgânica quanto na remoção de nitrogênio amoniacal, com eficiência média de remoção, de 66,4% e 73%, respectivamente. Dentre os sistemas revisados, o sistema de lodos ativados é o que tem proporcionado melhor desempenho na remoção, tanto em regime de batelada quanto de fluxo contínuo. Em termos de remoção de nitrogênio amoniacal os sistemas de lodos ativados e lagoas de estabilização, em geral, apresentam melhor desempenho.

Os sistemas físico-químicos têm sido mais adotados no tratamento de lixiviados velhos, considerando que mais de 60% das observações revisadas foram de lixiviados velhos, tem sido mais eficientes na remoção de matéria inorgânica, tais como nitrogênio amoniacal, cor, sólidos suspensos e turbidez, apesar de alguns sistemas ter apresentado um bom desempenho na remoção de matéria orgânica. Esses processos apresentaram uma eficiência média de remoção de matéria orgânica menor que 60% e uma eficiência média na remoção de nitrogênio amoniacal em torno de 73,5%. Dentre eles, os processos oxidativos avançados e de coagulação/floculação apresenta boa remoção DQO bruta, enquanto a precipitação, adsorção e *Air stripping* têm maior eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal, cor e turbidez.

A revisão realizada neste trabalho teve como objetivo apresentar uma caracterização geral dos processos de tratamento de lixiviado no Brasil, analisando a eficiência global de determinado grupo (processos biológicos, físico-químicos e combinado com esgoto sanitário), devido à dificuldade de se realizar uma análise minuciosa de cada tipo de sistema em específico (Lodos Ativados, UASB, *Air Stripping* etc.), uma vez que o número de estudos visando o tratamento de lixiviado desenvolvidos no Brasil ainda é reduzido.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. AZIZ, H. A. *et al.* (2007). Colour removal from landfill leachate by coagulation and flocculation processes. *Bioresource Technology*, v.98 p218-220, 2007.
2. BAE, B. *et al.* (1999). Treatment of landfill leachate using activated sludge process and electron-beam radiation, *Water Res.* 33, 2669–2673.
3. BATSTONE, D. J. *et al.* (2002) *Anaerobic digestion model No. 1 (ADM1)*. IWA Publishing, Londres, Reino Unido.
4. BIDONE & POVINELLI (2010). Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos. In: EESC-USP. Projeto REENGE. São Carlos.
5. BOYLE, W. C. & HAM, R.K. (1974). Biological treatability of landfill leachate, *Journal Water Pollution Control Federation*. 46 (1974), pp. 860–872
6. BOCCHIGLIERI, M.M (2005). A Influência do Recebimento de Chorume dos Aterros Sanitários da Região Metropolitana de São Paulo nas Estações de Tratamento de Esgotos do Sistema Integrado. Dissertação de Mestrado – USP – São Paulo – 190p.
7. BRASIL. Supremo Tribunal Federal. Lei nº 11445, de 5 de janeiro de 2007. Estabelece diretrizes nacionais para o saneamento básico. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2007/lei/11445.htm>. Acesso em: 22 set. 2010
8. BRASIL. Supremo Tribunal Federal. Lei nº 12305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm>. Acesso em: 10 out. 2010
9. FACCHIN J. M. J. *et al.*(2000). Avaliação do tratamento combinado de esgoto e lixiviado de aterro sanitário na ETE lami (Porto Alegre) após o primeiro ano de operação. In: 22º Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental, Porto Alegre-RS.
10. FERREIRA, J. A. *et al.* (2005). Reestruturação do sistema de tratamento de lixiviado no aterro sanitário de Pirai: resultados iniciais. In: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental. Saneamento ambiental Brasileiro: Utopia ou realidade?. Rio de Janeiro, ABES, 2005. p.1-8.
11. FERREIRA, J.A.; CANTANHEDE, A.L.G.; LEITE, V.L.; BILA, D.M.; CAMPOS, J.C.; YOKOYAMA, L.; FIGUEIREDO, I.C.; MANNARINO, C.F., SANTOS, A.S., FRANCO, R.S.O.; LOPES, W.S.; SOUSA, J.T. (2009). Tratamento combinado de lixiviados de aterros de resíduos sólidos urbanos com esgoto sanitário. In: GOMES, L.P. Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para condições brasileiras. Rio de Janeiro: ABES, 2009a. 360 p.
12. FORGIE, D. J. (1988). Selection of the most appropriate leachate treatment methods: a decision model for the treatment train selection. *Wat. Poll. Res. J. Canada* 23, 341±355.
13. HEYER, K.U.; STEGMANN, R. (1998). Leachate management: generation, collection, treatment and costs. In: INTERNATIONAL SEMINAR PRESENT AND FUTURE OF MSW LANDFILLING, de 24 a 26 de junho, Cittadella, Italy, Proceedings Edizioni Euro Waste.
14. KOSTOVA, I. (2006). Leachate from Sanitary Landfills-Origin, Characteristics, Treatment. University of Architecture, Civil Engineering and Geodesy. “Iskar’s Summer School” – Borovetz, 26-29 July.
15. LEMA, J. M.; MENDEZ, R.; BLAZQUEZ, R. (1988). Characteristics of landfill leachates and alternatives for their treatment: a review. *Water Air Soil Pollut.* 40(3-4), 223-250.
16. LI, X. Z.; ZHAO, Q. L. (2001). Efficiency of biological treatment affected by high strength of ammonium-nitrogen in leachate and chemical precipitation of ammonium-nitrogen as pretreatment, *Chemosphere* 44,37–43.
17. LIN, S. H.; CHANG, C. C. (2000). Treatment of landfill leachate by combined electro-Fenton oxidation and sequencing batch reactor method, *Water Res.* 34, 4243–4249.
18. MARQUES, E. V., *et al.* Tratamento conjunto do líquido lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico no processo de lodos ativados convencional. In: X Simpósio Ítalo-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental. Maceió-AL - Brasil, 2010.
19. OZTURK, I. *et al.* (2003). Advanced physico-chemical treatment experiences on young municipal landfill leachates. *Waste Management*. V.23 p. 441-446.
19. RENOU, S. *et al.* (2008). Landfill leachate treatment: Review and opportunity. *J. Hazard Mater.* 150(3): 468-493.
20. STEGMANN, R.; HEYER, K. U.; COSSU, R. (2005). Leachate treatment. In: 10th International Waste Management and Landfill Symposium, Sardinia – Italia.
21. TATSI, A. A. *et al.* (2003). Coagulation-flocculation pre-treatment of sanitary landfill leachates. *Chemosphere*, v.53, p.737-744
22. TORRES, P. *et al.* (1997). Tratabilidade biológica de chorume produzido em aterro não controlado. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v.2, p.55-62.

23. VIANA, A. S.P. S. *et al.* Avaliação do co-tratamento biológico de lixiviados de aterros sanitários com esgoto doméstico no município do rio de janeiro. In: 24º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, Belo Horizonte - MG, 2007.