

**II-238 - ESTUDO CINÉTICO DO CO-TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE  
ATERRO SANITÁRIO E ESGOTO DOMÉSTICO****Alexandre Lioi Nascentes<sup>(1)</sup>**

Engenheiro Civil e Sanitarista pela UERJ. Mestre em Saneamento Ambiental pela Escola Nacional de Saúde Pública - ENSP/FIOCRUZ. Doutorando em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos pela Escola de Química - UFRJ. Professor Assistente do Departamento de Engenharia da UFRRJ.

**Carla Sant'Anna de Oliveira**

Graduanda em Química Industrial pela Escola de Química - UFRJ. Bolsista de Iniciação Científica do CNPq.

**Juacyara Carbonelli Campos**

Engenheira Química pela Escola de Química - UFRJ. Doutora em Engenharia Química / Tecnologia Ambiental pela COPPE/UFRJ. Professora Adjunta do Departamento de Processos Inorgânicos da Escola de Química - UFRJ.

**João Alberto Ferreira**

Mestre em Engenharia Ambiental pelo Manhattan College - NY/USA. Doutor em Saúde Pública pela Escola Nacional de Saúde Pública - ENSP/FIOCRUZ. Professor Adjunto do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da UERJ.

**Endereço<sup>(1)</sup>:** UFRRJ. Instituto de Tecnologia / Departamento de Engenharia. Rodovia BR 465, km 7 - Seropédica - RJ - Brasil - e-mail: [lioi@ufrj.br](mailto:lioi@ufrj.br)

**RESUMO**

A obtenção de eficiências satisfatórias em sistemas de tratamento de lixiviados, sejam eles físico-químicos ou biológicos, tem-se mostrado um problema de engenharia extremamente complexo e a escassez de dados e informações a respeito do tratamento de lixiviados dificulta o projeto dos sistemas de tratamento, que se baseiam, na maioria dos casos, em parâmetros definidos para esgotos sanitários, os quais não incorporam as peculiaridades do lixiviado. O co-tratamento de lixiviado e esgoto doméstico vem surgindo como uma alternativa viável, embora pouco se conheça sobre sua cinética, a influência da relação lixiviado/esgoto, possíveis alterações nas características da biomassa, toxicidade do efluente tratado e características do lodo gerado. O objetivo deste trabalho é estudar os aspectos cinéticos do co-tratamento de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico. A pesquisa está dividida em duas etapas, sendo a primeira referente aos ensaios preliminares, cujos resultados são apresentados neste trabalho e a segunda etapa, de determinação dos coeficientes cinéticos de diferentes misturas lixiviado/esgoto, atualmente em desenvolvimento. Os ensaios preliminares consistiram no monitoramento de 4 reatores aeróbios em batelada com diferentes misturas lixiviado/esgoto (zero, 0,5, 2 e 5%), dos quais se mediu a concentração de substrato ao longo do tempo para uma avaliação preliminar da forma como ocorre o consumo do substrato em função da presença do lixiviado. Foi obtida a caracterização do lixiviado, do esgoto e das diferentes misturas, inclusive quanto à toxicidade aguda CL50 ao organismo *Danio rerio*. Além disso, foi determinado o ajuste dos resultados de consumo de matéria orgânica a cinéticas de primeira e segunda ordem. As relações DQO do lixiviado / DQO da mistura encontradas foram de zero, 8,7, 27,9 e 50%. Foi possível concluir que as eficiências de remoção de DQO não diferiram tanto de reator para reator, nem demonstraram uma tendência definida, tendo-se observado a maior eficiência para a mistura de 0,5% e que não houve prejuízo ao processo de tratamento em função de inibição da atividade biológica em nenhuma das misturas.

**PALAVRAS-CHAVE:** Coeficientes Cinéticos, Co-tratamento, Tratamento Combinado, Lixiviado de Aterro Sanitário, Esgoto Doméstico.

## INTRODUÇÃO

A destinação final inadequada dos resíduos sólidos representa um grave problema nos dias de hoje. O desenvolvimento tecnológico resulta em resíduos cada vez mais complexos em sua constituição, com consequentes problemas para seu tratamento e destino final, além de aumentar a complexidade do lixiviado gerado nos aterros onde os resíduos são dispostos.

Um grave problema reside na dificuldade de obtenção de eficiências satisfatórias em sistemas de tratamento de lixiviados, sejam eles físico-químicos ou biológicos. Além disso, segundo Castilhos Junior et al. (2006), a escassez de dados e informações a respeito do tratamento de lixiviados dificulta o projeto dos sistemas de tratamento, que se baseiam, na maioria dos casos, em parâmetros de projetos definidos para esgotos sanitários, os quais não incorporam as peculiaridades do lixiviado.

Ferreira et al. (2001) destacam, como principais processos utilizados para tratar lixiviado, recirculação na área do próprio aterro, processo de lodos ativados, lagoas de estabilização, filtros biológicos, alagados construídos (wetlands), separação por membranas, processos oxidativos avançados (POA's), coagulação/floculação e eletrocoagulação, sendo bastante usual a combinação entre processos, especialmente em lixiviados mais recalcitrantes.

Processos de coagulação/floculação mostram-se pouco eficientes, mesmo com a utilização de auxiliares de floculação, e, para o alcance de eficiências de DQO próximas a 50 %, tornam-se muito elevados o consumo de coagulante e a geração de lodo. Esta baixa eficiência também ocorre no processo de eletrocoagulação (HAMADA et al., 2002).

Segundo Ferreira et al. (2001), os tratamentos biológicos também têm se mostrado pouco eficientes em função do lixiviado apresentar compostos com elevada resistência à biodegradação, especialmente em aterros mais antigos, cujos sistemas de tratamento geralmente necessitam de uma etapa inicial capaz de diminuir a recalcitrância do lixiviado.

Del Borghi et al. (2003) afirmam que o co-tratamento de lixiviado e esgoto doméstico em sistemas de lodos ativados é uma alternativa economicamente viável mas destaca que para se projetar corretamente sistemas de tratamento com esta finalidade deve-se recorrer a estudos de bancada para estudar sua cinética de biodegradação e a relação lixiviado/esgoto ideal, que não comprometa o processo.

Apesar desta alternativa começar a surgir em alguns países como solução para tratamento do lixiviado, pouco se conhece sobre a cinética de consumo deste substrato misto e a influência da relação lixiviado/esgoto sobre esta cinética, possíveis alterações nas características da biomassa, toxicidade do efluente tratado e características do lodo gerado.

Esta pesquisa tem por objetivo estudar os aspectos cinéticos do co-tratamento de lixiviado de aterro sanitário e esgoto doméstico e em sistemas de lodos ativados.

## MATERIAIS E MÉTODOS

Esta pesquisa está dividida em duas etapas, sendo a primeira referente aos ensaios preliminares, cujos resultados são apresentados neste trabalho e a segunda etapa, de determinação dos coeficientes cinéticos de diferentes misturas lixiviado/esgoto, atualmente em desenvolvimento.

Os ensaios preliminares consistiram no monitoramento de 4 reatores aeróbios em batelada com diferentes misturas lixiviado/esgoto, dos quais se mediu a concentração de substrato ao longo do tempo para uma avaliação preliminar da forma como ocorre o consumo do substrato em função da presença do lixiviado.

As misturas lixiviado/esgoto foram preparadas a partir do esgoto bruto coletado na ETE São Pedro combinado com o lixiviado do aterro sanitário Dois Arcos, ambos no município de São Pedro da Aldeia/RJ.

Ainda como parte da primeira etapa, foram realizadas análises de caracterização e ensaios de toxicidade com as diferentes misturas e com o lixiviado in natura.

A segunda etapa utiliza esgoto doméstico sintético, de modo a possibilitar uma redução na variabilidade do afluente, enquanto o lixiviado utilizado continua sendo coletado no aterro Dois Arcos. Nesta etapa os reatores são de fluxo contínuo, de modo a permitir um maior volume de dados para a determinação dos coeficientes cinéticos.

As duas etapas de trabalho são mais detalhadamente descritas a seguir:

### PRIMEIRA ETAPA: ENSAIOS PRELIMINARES

Para a realização dos ensaios preliminares foram utilizadas amostras de esgoto doméstico, coletadas na ETE São Pedro e lixiviado coletado no Aterro Sanitário Dois Arcos. Todas as amostras foram coletadas no dia 19/10/2010.

Inicialmente, foram preparadas quatro misturas diferentes, a partir das amostras de lixiviado e esgoto, coletadas, conforme apresentado na Tabela 8. A mistura com relação lixiviado/esgoto igual a zero, correspondente ao reator 1, funcionou como controle, já que era apenas esgoto, sem adição de lixiviado.

**Tabela 1: Misturas lixiviado/esgoto utilizadas no experimento.**

Reator	Mistura lixiviado/esgoto (%)
R1 (Controle)	zero
R2	0,5
R3	2,0
R4	5,0

Em seguida, foi realizada a caracterização analítica de cada uma das misturas, além do lixiviado in natura, em termos dos parâmetros pH, turbidez, amônia, DQO, COT e absorbância a 254nm.

Nestas mesmas amostras foram realizados ensaios de toxicidade aguda CL50 com o peixe *Danio rerio*, com tempo de exposição de 48 horas. Os ensaios foram realizados entre 21/10/2010 e 06/11/2010 no LES - Laboratório de Engenharia Sanitária da UERJ.

Para a realização dos ensaios de consumo de matéria orgânica foram utilizadas 4 provetas de 1000 mL como reatores biológicos, conforme distribuição definida pela Tabela 8, e a aeração foi promovida através de bombas de difusão de ar com pedras porosas, normalmente utilizadas em aquários, conforme apresentado na Figura 1.



**Figura 1: Reatores em batelada para ensaio de consumo de matéria orgânica.**

Para inoculação dos reatores, cada proveta recebeu 200 mL de lodo biológico sedimentado proveniente da ETE São Pedro e em seguida completados com as respectivas misturas.

O experimento foi realizado no dia 09/11/2010, tendo início às 11:00 h com o acionamento das bombas de difusão de ar. As coletas ocorreram às 12:00, 13:00, 15:00 e 17:00, com a retirada de 80 mL de cada reator. As amostras foram filtradas a vácuo em membrana milipore 0,45 µm, para que em seguida fossem feitas as mesmas análises da caracterização.

Os resultados da DQO e os respectivos tempos de reação foram plotados em gráficos, de modo a se avaliar o consumo de substrato ao longo do tempo. No mesmo gráfico foram traçadas as curvas correspondentes a reações de primeira e de segunda ordem e determinados os coeficientes de melhor ajuste aos dados experimentais com o auxílio da ferramenta solver do Excel.

A seguir são apresentadas as equações que descrevem as cinéticas de primeira e segunda ordem, respectivamente Equação 1 e Equação 2.

$$S = S_0 \cdot e^{-kt} \quad \text{equação (1)}$$

$$S = S_0 \cdot [1/(1+k \cdot S_0 \cdot t)] \quad \text{equação (2)}$$

## SEGUNDA ETAPA: DETERMINAÇÃO DOS COEFICIENTES CINÉTICOS

Para a segunda etapa (em andamento), estão sendo utilizados 2 reatores biológicos contínuos em escala de laboratório constituído de tanque de aeração e decantador. Um dos reatores (controle) trata apenas esgoto doméstico sintético, enquanto o outro recebe as misturas lixiviado/esgoto, sendo ambos alimentados através de bomba dosadora peristáltica. Nesta etapa são utilizadas as mesmas misturas definidas para a primeira etapa.

O fornecimento de ar é realizado por compressor de ar ligado a mangueiras de silicone com pedras porosas nas pontas, de modo a garantir uma concentração mínima de 2,0 mg/L em todo o volume do reator. O controle de temperatura, pH e OD é realizado continuamente através de eletrodos.

A vazão de cada etapa é fixada de acordo com a relação A/M pretendida e aferida diariamente. O retorno de lodo será realizado por bombas peristálticas, mantendo-se uma taxa de recirculação constante ao longo de cada etapa.

## RESULTADOS

Na Tabela 2 são apresentados os resultados analíticos da caracterização do lixiviado e do esgoto doméstico utilizados nos ensaios preliminares.

**Tabela 2: Caracterização do lixiviado e do esgoto doméstico.**

Parâmetro	Unidade	Lixiviado	Esgoto Doméstico
pH	-	8,15	7,74
Turbidez	uT	86,4	58,5
Cloreto	mg/L	4.028	246,9
N-NH <sub>3</sub>	mg/L	203,5	35,2
DQO	mg/L	2435	128,3
COT	mg/L	667	39,2
Abs. (254 nm)	Abs	16,88	0,6958
DQO/COT	-	3,65	3,27

É possível observar nos resultados de caracterização do lixiviado um pH mais alcalino até mesmo que a faixa apresentada por Tchobanoglous (1993) para lixiviados mais antigos. Um resultado bastante elevado de cloretos e uma concentração de DQO dentro da faixa usual para aterros novos (com menos de dois anos).

Quanto ao esgoto doméstico, os únicos parâmetros que se destacam são a DQO e o COT, que indicam um esgoto bastante diluído. Isto pode estar relacionado ao fato do sistema de esgoto do município de São Pedro da Aldeia ser do tipo captação em tempo seco, onde os esgotos são coletados juntamente com as águas pluviais.

Na Tabela 3 são apresentados os resultados das análises para cada mistura.

**Tabela 3: Resultados de análises de cada mistura.**

Parâmetro	Unidade	0% (Esgoto)	0,5%	2%	5%	100% (Lixiviado)
pH	-	7,74	7,81	7,97	8,01	8,15
Turbidez	uT	58,5	36,4	42,4	51,2	86,4
N-NH <sub>3</sub>	mg/L	35,2	39,3	64,1	81,2	203,5
DQO	mg/L	128,3	139,8	174,4	243,6	2434,7
Abs. (254 nm)	Abs	0,6958	0,7275	0,5770	0,7388	16,88

Os resultados acima mostram que a adição de 5% de lixiviado fez com que a DQO praticamente dobrasse, em relação ao esgoto estudado.

Conhecendo-se as relações lixiviado/esgoto volumétricas adotadas no experimento e as concentrações de DQO de cada um deles é possível calcular a razão lixiviado/esgoto em relação à carga de DQO. Estes dados são apresentados na Tabela 4.

**Tabela 4: Razão lixiviado/esgoto em relação à carga de DQO.**

Reator	Mistura lixiviado/esgoto (%) v/v.	Mistura lixiviado/esgoto (%) kgDQO/kgDQO
R1 (Controle)	zero	zero
R2	0,5	8,7
R3	2,0	27,9
R4	5,0	50,0

Estes dados demonstram que, apesar da relação volumétrica ser baixa, a contribuição de carga de DQO é significativa, em função da DQO do lixiviado ser aproximadamente 20 vezes maior que a do esgoto. Por esta análise, na mistura correspondente ao reator 4 a contribuição volumétrica de 5% de lixiviado faz com que 50% da DQO da mistura seja proveniente do lixiviado.

A Tabela 5 apresenta os resultados de toxicidade aguda CL50 ao organismo *Danio rerio* em um tempo de exposição de 48 horas.

**Tabela 5: Resultados de toxicidade aguda CL50 (%).**

Mistura lixiviado/esgoto (%) v/v.	CL50 (%)	CENO (%)	UT = 100/CENO
zero (esgoto)	70,71	50	2
0,5	70,70	50	2
2,0	65,90	25	4
5,0	35,36	25	4
100,0 (lixiviado)	<3,125*	<3,125*	>32*

\* Neste ensaio, todos os 10 indivíduos já estavam mortos antes do primeiro instante de observação, correspondente à menor concentração estudada (3,125%).

Os resultados acima demonstram que a toxicidade do esgoto se altera muito pouco para as misturas de 0,5 e 2%. No entanto, pode-se observar que para a mistura de 5% a toxicidade dobra, visto que com metade da dose se chega à mesma letalidade nos indivíduos teste. Verifica-se, ainda, a elevada toxicidade do lixiviado.

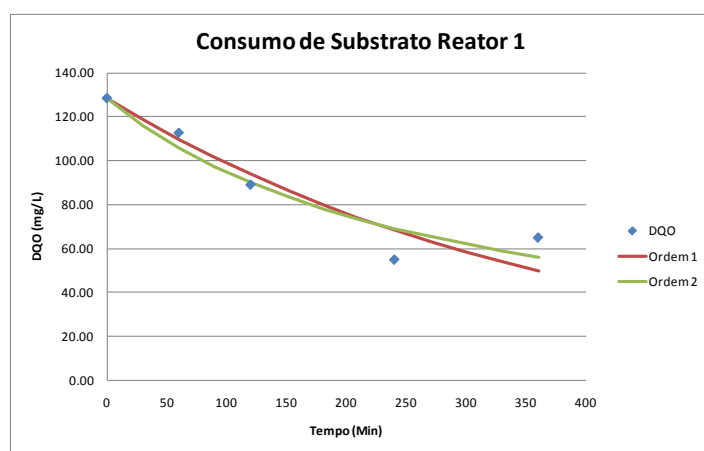
A Tabela 6 apresenta as concentrações de DQO em cada reator ao longo do tempo.

**Tabela 6: Concentrações de DQO (mg/L) ao longo do tempo em cada reator.**

Reator	Mistura	0 min	60 min	120 min	240 min	360 min
R1 (Cont)	0%	128,3	112,5	89,0	55,0	65,0
R2	0,5%	139,8	91,5	70,0	72,0	59,0
R3	2%	174,4	107,0	129,5	82,0	91,0
R4	5%	243,6	162,0	151,0	146,0	142,0

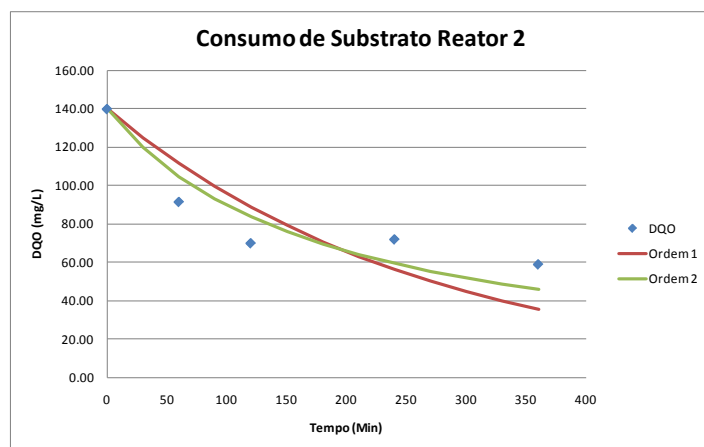
Para cada reator foram lançados, em gráficos, os valores de DQO, de modo a se avaliar como ocorreu o consumo do substrato, buscando-se os coeficientes (k) para as cinéticas de primeira ordem e segunda ordem que melhor se ajustassem aos dados experimentais. Após a determinação dos coeficientes foi calculado o fator de correlação  $R^2$  entre os dados e as curvas teóricas dos modelos.

A Figura 2 apresenta o gráfico referente ao reator 1, no qual a cinética de segunda ordem teve um melhor ajuste aos dados, com um  $R^2=0,92$  para um  $k=0,040$ . A cinética de primeira ordem teve um  $R^2=0,89$  para um  $k=3,78$ .



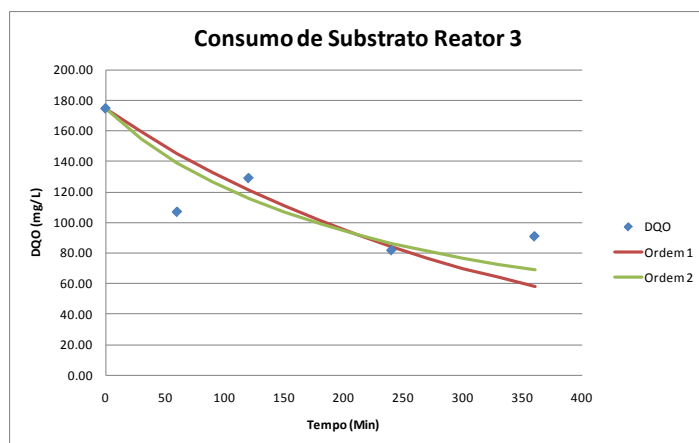
**Figura 2: Consumo de substrato no reator 1.**

No reator 2 (Figura 3) a cinética de segunda ordem também teve um melhor ajuste, com um  $R^2=0,88$  para um  $k=0,058$ , enquanto a cinética de primeira ordem teve um  $R^2=0,79$  para um  $k=5,45$ .

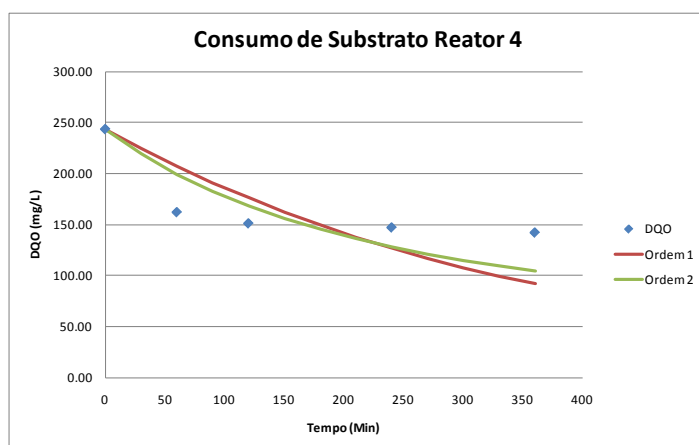


**Figura 3: Consumo de substrato no reator 2**

A Figura 4 apresenta o gráfico referente ao reator 3, no qual a cinética de segunda ordem teve um melhor ajuste aos dados, com um  $R^2=0,76$  para um  $k=0,035$ . A cinética de primeira ordem teve um  $R^2=0,70$  para um  $k=4,38$ .

**Figura 4: Consumo de substrato no reator 3.**

No reator 4 (Figura 5) a cinética de segunda ordem também teve um melhor ajuste, com um  $R^2=0,73$  para um  $k=0,022$ , enquanto a cinética de primeira ordem teve um  $R^2=0,63$  para um  $k=3,90$ .

**Figura 5: Consumo de substrato no reator 4.**

É possível verificar, no reator 4, que velocidade de consumo é bastante elevada nos primeiros minutos, tornando-se rapidamente assintótica, o que provavelmente é causado pela redução da biodegradabilidade decorrente da maior quantidade de lixiviado.

São apresentados na Tabela 16 os coeficientes que melhor se ajustaram às equações cinéticas, bem como os respectivos fatores de correlação  $R^2$ .

**Tabela 7: Coeficientes cinéticos e fatores de correlação.**

Reator	Mistura	k (Ordem 1)	$R^2$	k (Ordem 2)	$R^2$
R1 (Cont)	0%	3,78	0,89	0,040	0,92
R2	0,5%	5,45	0,79	0,058	0,88
R3	2%	4,38	0,70	0,035	0,76
R4	5%	3,90	0,63	0,022	0,73

Apesar de se saber que estes modelos cinéticos não são os que melhor representam o processo de consumo de substrato, por não considerarem o comportamento da biomassa, foram utilizados para estas análises preliminares, dada sua simplicidade.

Tomando-se por base a DQO inicial e após 360 minutos (6 horas), foram calculadas as eficiências de cada reator, conforme apresentado na Tabela 8.



**Tabela 8: Eficiência de remoção de DQO para um tempo de reação de 6 horas.**

Reator	Eficiência de remoção de DQO (%)
R1	49,3
R2	57,8
R3	47,8
R4	41,7

As eficiências apresentadas na Tabela 17 não demonstraram tendência clara de aumento ou redução em relação à mistura. No entanto, fica claro que não houve inibição da atividade biológica em nenhuma das misturas, demonstrando a viabilidade do tratamento combinado nas condições estudadas.

## CONCLUSÕES

Com base no trabalho realizado, concluiu-se que:

Foi observado que as misturas volumétricas estudadas (zero, 0,5, 2 e 5%), aparentemente baixas, representam misturas, em termos de relação entre a carga de DQO do lixiviado e a carga de DQO da mistura final, bastante elevadas (zero, 8,7, 27,9 e 50%). Isto significa que a contribuição volumétrica de 5% de lixiviado faz com que 50% da DQO da mistura seja proveniente do lixiviado.

A cinética de consumo de substrato varia, a medida que se eleva a relação lixiviado/esgoto, com uma tendência de aproximação a uma reação de terceira ordem, o que provavelmente é causado pela redução da biodegradabilidade decorrente do aumento da quantidade de lixiviado na mistura, elevando, assim, sua recalcitrância.

As eficiências de remoção de DQO para um tempo de aeração de 6 horas não diferiram tanto de reator para reator, nem demonstraram uma tendência definida, tendo-se observado a maior eficiência para a mistura de 0,5%.

Não houve prejuízo ao processo de tratamento em função de inibição da atividade biológica em nenhuma das misturas, demonstrando a viabilidade do tratamento combinado nas condições estudadas.

Entende-se que este breve estudo confirma a necessidade de melhor conhecer os fenômenos que envolvem o tratamento combinado de lixiviado e esgoto doméstico, como forma de subsidiar a operação de ETEs que já recebam lixiviado para tratamento (sem que seus projetos previsssem esta condição), bem como permitir aos projetistas que utilizem constantes cinéticas específicas para dimensionar sistemas de tratamento concebidos para esta finalidade.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à PROLAGOS - Concessionária de Serviços Públicos de Água e Esgoto, em especial ao Eng.º Wagner Carvalho, por possibilitar o acesso à ETE São Pedro, à administração do Aterro Sanitário Dois Arcos, ao LES - Laboratório de Engenharia Sanitária da UERJ, na pessoa da Profa. Daniele Bila, pela realização das análises de toxicidade e à equipe do LABTARE - Laboratório de Tratamento de Águas e Reúso de Efluentes da EQ/UFRJ.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. CASTILHOS JUNIOR, A.B. (Coord.) et al. Gerenciamento de resíduos sólidos urbanos com ênfase na proteção de corpos d'água: prevenção, geração e tratamento de lixiviados de aterros sanitários. PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2006.
2. FERREIRA, J.A. et al. Uma revisão das técnicas de tratamento de chorume e a realidade do estado do rio de janeiro. In: 21.º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2001.
3. GOMES, L.P. (Coord.) et al. Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras. PROSAB. Rio de Janeiro: ABES, 2009.



4. HAMADA, J. et al. Aplicabilidade de processos físico e físico-químico no tratamento do chorume de aterros sanitários. In: VI Simpósio Ítalo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 2002.
5. MANNARINO, C.F. et al. Assessment of Combined Treatment of Landfill Urban Solid Waste Leachate and Sewage Using *Danio rerio* and *Daphnia similis*. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, v. 85, p. 274-278, 2010.
6. TCHOBANOGLOUS, G.; THEISEN, H.; VIGIL, S.A. Integrated solid waste management: Engineering principles and management issues. McGraw Hill, 1993.