



II-016 - ENSAIOS DE LABORATÓRIO PARA AVALIAÇÃO DO PROCESSO DE COAGULAÇÃO/FLOCULAÇÃO NO CO-TRATAMENTO DE LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO EM ETE

Juacyara Carbonelli Campos ⁽¹⁾

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

Lídia Yokoyama

Mestrado em Engenharia Metalúrgica - PUC-RJ. Doutorado em Química (Química Analítica Inorgânica)-PUC-RJ. Professora Adjunta do Depto de Processos Inorgânicos – Escola de Química - UFRJ.

João Alberto Ferreira

D.Sc. em Saúde Pública pela ENSP- Fundação Oswaldo Cruz e M.Sc em Engenharia Ambiental pelo Manhattan College (New York-USA).

Professor Adjunto do Depto. de Eng. Sanitária e do Meio Ambiente – FEN/UERJ. Coordenador Adjunto do Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental – UERJ.

Maria Emília Drummond Blonski

Engenheira Química pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro. Engenheira de Processos da CHEMTECH Serviços de Engenharia e Software.

Bruno da Silva Machado

Químico Industrial pela Escola de Química da Universidade Federal do Rio de Janeiro

Endereço⁽¹⁾: Departamento de Processos Inorgânicos. Escola de Química - UFRJ. Centro de Tecnologia - Bloco E - sala E 206 Ilha do Fundão - CEP 21949-900. Tel. (21) 2562-7640. Fax. (21) 2562-7596 e-mail. juacyara@eq.ufrj.br.

RESUMO

O tratamento combinado de lixiviado de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos em Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é um procedimento que vem sendo aplicado com o objetivo de minimizar os custos de implementação e operação do aterro. O co-tratamento de lixiviado em uma Estação de Tratamento de Esgoto (ETE) é uma opção viável e de baixo custo apontada pela literatura internacional e nacional. Vários aterros utilizam o sistema combinado para tratamento de lixiviados: o aterro Fresh Kills, da cidade de Nova Iorque, o aterro Tohbu Fushitani, de Fukuoka, Japão; o Aterro Bandeirantes, de São Paulo e o Aterro da Extrema, de Porto Alegre. Na cidade de São Paulo, desde 1994 existe um convênio entre a Sabesp e a Prefeitura Municipal, onde esta última recebe o lodo gerado nas ETE em troca do tratamento de lixiviado gerado no aterro municipal. Neste trabalho, foram realizados estudos do tratamento combinado do lixiviado do Aterro do Morro do Céu, Niterói, RJ, com amostras de esgoto da ETE de Icaraí, em diferentes proporções (0, 0,5, 2,0 e 5,0%), com a finalidade de simular o que acontece na ETE Icaraí. Os coagulantes utilizados foram cloreto férrico, sulfato de alumínio, Tanfloc SG, Tanfloc SL e Panfloc Hiper Plus em diferentes concentrações (20, 40 e 60 mg/L). Em alguns ensaios foram adicionados polieletrólitos (FXCS7 e FXAS6) como auxiliares de floculação, em dosagens de 0,5 e 1,0 mg/L. A análise estatística das remoções de DQO mostrou que o Tanfloc SG obteve resultados iguais ou melhores que os demais coagulantes em todas as condições estudadas, sem a necessidade de adição de polieletrólitos. Além disso, o Tanfloc SG é um produto de baixo custo e por isso foi apontado como melhor coagulante. O ensaio de toxicidade foi realizado para a concentração de 5,0% de lixiviado em esgoto na amostra bruta e na amostra tratada com Tanfloc SG. Os resultados indicaram que a toxicidade das amostras está abaixo do limite de toxicidade estabelecido na legislação vigente no Estado do Rio de Janeiro (NT-213, FEEMA).

PALAVRAS-CHAVE: Tratamento Combinado, Lixiviado, Esgoto, Tratamento Físico-Químico.



INTRODUÇÃO

Um dos maiores problemas ambientais dos dias atuais é a geração cada vez maior de resíduos sólidos pela sociedade. Com a intensificação do processo industrial, aliado ao crescimento da população e à conseqüente demanda por bens de consumo, o homem tem produzido quantidades significativas de resíduos sólidos sem base numa política clara e efetiva para sua eliminação, gerando prejuízos a si próprio e ao meio ambiente. A disposição desordenada de resíduos a céu aberto gera impactos ambientais e sociais de grande porte.

No Brasil, a destinação final dos resíduos sólidos constitui sério problema. Segundo dados da PNSB - Pesquisa Nacional de Saneamento Básico de 2000 (IBGE, 2002) somente 32,2% de todos os municípios destinam adequadamente seus resíduos sólidos (13,8% em aterros sanitários e 18,4% em aterros controlados). Em 63,6% dos municípios, o lixo doméstico, quando recolhido, é simplesmente transportado para depósitos irregulares, os chamados "lixões". Os "lixões" não possuem nenhum tipo de controle, quer quanto ao tipo de resíduos recebidos, quer em relação às medidas de segurança necessárias para minimizar ou evitar emissões de poluentes para o meio ambiente.

A disposição inadequada dos resíduos sólidos promove a contaminação do solo, do ar e das águas superficiais e subterrâneas através da migração dos elementos constituintes do lixiviado e de gases produzidos pelo processo de degradação da matéria orgânica desses depósitos. Além disso, pode ocorrer a proliferação de vetores de doenças, influenciando negativamente a qualidade ambiental e a saúde da população.

O método de disposição final de resíduos sólidos urbanos, conhecido como aterro sanitário, aplica conhecimentos de engenharia e segue normas pré-estabelecidas de planejamento, construção e operação, minimizando riscos e problemas ambientais. A localização do aterro é criteriosamente selecionada, planejada e preparada. Em aterros sanitários, o resíduo sólido urbano é depositado em finas camadas, compactado e coberto com argila no final de cada operação (QASIM & CHIANG, 1994). Porém, um dos grandes problemas encontrados no gerenciamento de aterros sanitários de resíduos urbanos diz respeito à produção e ao tratamento do lixiviado produzido. Especialmente nos casos em que o aterro sanitário está situado em áreas com uma alta pluviosidade, onde a produção de lixiviado é abundante, o risco de contaminação do solo, de lençóis freáticos e de leitos de rios é relativamente alto, podendo gerar um forte impacto ambiental.

O tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário com esgoto doméstico em estação de tratamento de esgoto (ETE) é adotado em vários países como forma de reduzir os custos de operação do aterro, onde o custo de tratamento do lixiviado pode atingir valores bastante elevados, sobretudo por continuar a se fazer necessário mesmo após décadas de encerramento do aterro (DIAMADOPOULOS *et al.*, 1997; COSSU, 1998; EHRIG, 1998; EBERT, 1999; MARTTINEN *et al.*, 2003).

O tratamento combinado pode ser uma alternativa viável nas cidades brasileiras onde exista tratamento de esgotos domésticos. É nesse contexto que se insere o presente projeto que está incluído no âmbito do PROSAB (Programa de Saneamento Básico) financiado pela FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos) e que foi realizado em conjunto com o Departamento de Engenharia Sanitária e Meio Ambiente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro. O projeto, como um todo, abordou o monitoramento de sistemas em escala real e a realização de experimentos de laboratório com o objetivo de contribuir para o aumento de eficiência em sistemas reais em operação.

O presente trabalho teve como objetivo avaliar o impacto da introdução de diferentes concentrações de lixiviado de aterro sanitário simulando uma Estação de Tratamento de Esgoto que realiza tratamento físico-químico (ETE Icaraí – RJ). Como objetivos específicos, avaliar o uso de diferentes coagulantes e auxiliares de floculação no tratamento do lixiviado misturado ao esgoto doméstico, avaliar estatisticamente os melhores resultados obtidos e avaliar a toxicidade do residual de produto químico remanescente na amostra tratada. Como meta de eficiência, foi estabelecida remoção mínima de 30% de DQO. As leis 2661 e 4692 (Governo do Estado do RJ) estabelecem níveis mínimos de tratamento de esgotos sanitários para posterior lançamento em emissários submarinos (30 – 40% de DBO). Apesar de a legislação indicar a DBO como parâmetro alvo, foram realizadas medidas de DQO por esta apresentar resultado mais rápido e confiável.



MATERIAIS E MÉTODOS

A coleta de esgoto foi realizada na Estação de Tratamento de Esgoto de Icaraí, em Niterói – RJ. O lixiviado foi recolhido no Aterro do Morro do Céu, também em Niterói – RJ. Assim que transferidas para o laboratório, as amostras foram armazenadas em bombonas de plástico e preservadas abaixo de 4°C, para posterior utilização.

A caracterização das amostras de lixiviado e de esgoto foi feita com base nos seguintes parâmetros: pH, DQO, turbidez, nitrogênio amoniacal, Sólidos Totais (ST) e Sólidos Suspensos Totais (SST). Todos os procedimentos analíticos utilizados se basearam no APHA (2005).

As três etapas de trabalho serão descritas a seguir:

Primeira etapa: Definição da condição ótima para cada coagulante

Os ensaios tentaram reproduzir a situação existente na ETE Icaraí (Niterói-RJ), onde o lixiviado é misturado ao esgoto doméstico em um sistema de tratamento que conta com tratamento primário quimicamente assistido (coagulação/floculação) seguido pelo lançamento em um emissário submarino.

Os ensaios de laboratório foram realizados em um aparelho de “jar-test”. A metodologia de operação dos ensaios foi adaptada de Jordão & Pessoa (2005); Di Bernardo et al. (2002) e Castilho Jr. et al. (2006). As condições de ensaio foram: etapa mistura rápida a 150 rpm (2 min.); mistura lenta a 30 rpm (20 min) e decantação por 30 min. Os parâmetros avaliados foram:

a) coagulante: Foram utilizados sulfato de alumínio (Vetec), cloreto férrico (Vetec), Tanfloc SG e Tanfloc SL (amostras cedidas pela Tanac) e Panfloc Hiper Plus (amostra cedida pela Panamericana).

b) concentração de coagulante: as dosagens utilizadas foram de 20, 40 e 60 mg/L. Esses valores foram obtidos de trabalhos reportados da literatura (Jordão, 2005) e são concentrações correntemente utilizadas na ETE Icaraí.

c) adição de auxiliares de floculação: em alguns ensaios foram introduzidos auxiliares de floculação para verificar se há melhoria do processo. Os polieletrólitos avaliados foram catiônico (FX CS7) e aniônico (FX AS6), ambos cedidos pela Faxon. As dosagens estudadas foram de 0,5 e 1,0 mg/L.

A Tabela 1 ilustra os ensaios que foram realizados para cada coagulante. Todos os experimentos foram realizados com o pH natural do esgoto ou mistura, portanto, sem necessidade de ajuste de pH. As concentrações de lixiviado na mistura foram de 0,5; 2 e 5%, além de ensaios sem introdução de lixiviado (apenas esgoto bruto).

Segunda etapa: determinação do melhor coagulante

Foram realizados seis ensaios de réplicas (com diferentes amostras coletadas em diferentes dias) da melhor condição de cada coagulante, para cada diluição de lixiviado em esgoto, baseando-se nos resultados da 1ª Etapa. O objetivo da 2ª etapa é analisar se as remoções obtidas com diferentes coagulantes são equivalentes, através de uma análise estatística dos dados (software Minitab 15), e determinar o melhor coagulante dentre os cinco estudados. As condições dos experimentos foram as mesmas descritas no item anterior.

Para avaliar se as remoções de DQO para os diferentes coagulantes são equivalentes, utilizou-se o teste ANOVA a um fator (*One-Way ANOVA*). A idéia do teste ANOVA é verificar se as médias amostrais de um conjunto de n amostras, com $n > 2$, são estatisticamente iguais ou não. Calcula-se a variância conjunta de todos os grupos, sendo esta a variância dentro dos grupos, e compara-se este valor com a variância entre os grupos, utilizando-se para tanto um teste tipo F. O teste ANOVA exige que os dados tenham distribuição normal e que as variâncias nas n populações sejam iguais



Tabela 1. Resumo dos experimentos realizados

Código do Ensaio	Concentração de coagulante (mg/L)	Experimentos	
		Polieletrólito	
		Dosagem (mg/L)	Tipo
A	20	-	-
B		0,5	Catiônico
C			Aniônico
D		1,0	Catiônico
E			Aniônico
F	40	-	-
G		0,5	Catiônico
H			Aniônico
I		1,0	Catiônico
J			Aniônico
K	60	-	-
L		0,5	Catiônico
M			Aniônico
N		1,0	Catiônico
O			Aniônico

Terceira etapa: ensaio de toxicidade

Foram realizados ensaios de toxicidade para avaliar o grau de toxicidade sobre organismos vivos utilizando-se a metodologia da FEEMA, MF-456. R-0 que tem como objetivo, através de um método estático, determinar o efeito agudo letal causado por efluentes líquidos em peixes da espécie *Danio rerio*. Este teste foi aplicado para amostra bruta e para amostra tratada com o coagulante eleito o mais eficiente, utilizando a concentração de 5%

de lixiviado, que seria a condição mais impactante para o tratamento de esgoto. O ensaio foi realizado pelo Labtox (Laboratório de Análise Ambiental Ltda).

RESULTADOS

Primeira etapa

Todas as amostras de lixiviado e esgoto recebidas passaram pela etapa inicial de caracterização antes de receber qualquer tratamento. As amostras foram recolhidas em intervalos mensais, em diferentes épocas do ano. Os resultados da caracterização dos parâmetros físico-químicos das amostras de lixiviado e esgoto estão apresentados de uma forma resumida na Tabela 2.

Tabela 2. Resultados de caracterização das amostras de lixiviado e esgoto utilizadas nos experimentos

Parâmetro	Unidade	Esgoto		Lixiviado	
		Média	Faixa	Média	Faixa
pH		7,13	7,09-7,19	7,83	7,50-8,16
Turbidez	NTU	71,4	51,2-91,5	15,0	12,5-27,9
N-NH ₃	mg/L	89,5	26,0-153	547	431-663
DQO	mg/L	379,5	253-506	1688	1066-2310
SST	mg/L	178	145-210	72	66-78

Os parâmetros de caracterização não apresentaram grandes variações, exceto para a N-NH₃ e a DQO. Essas variações podem ser explicadas pelas alterações climáticas, como a incidência de chuvas, já que o ponto de coleta foi o mesmo para todas as amostragens.

A Tabela 3 mostra os valores de DQO para as misturas brutas de lixiviado em esgoto

**Tabela 3. Medidas de DQO das misturas brutas de lixiviado em esgoto**

Diluição de lixiviado em esgoto (%)	DQO	
	Média	Faixa
0	379,5	253-506
0,5	399,0	255-543
2,0	406	376-436
5,0	472	360-584

Os resultados mostraram que as eficiências de remoção de DQO obtidas nos ensaios de decantação primária (sem adição de coagulantes) são inferiores àqueles com adição de coagulantes (exceto para algumas condições do sulfato de alumínio), ou seja, o processo de decantação não conseguiu atingir a remoção mínima de 30% de DQO. Outro ponto importante a ser observado é que, para a única amostragem realizada, a adição de lixiviado ao esgoto puro causa impacto nos resultados, diminuindo a porcentagem de remoção de DQO, para todos os coagulantes testados. Além disso, nessa amostragem o sulfato de alumínio parece ter o pior desempenho, quando comparado aos demais. Já a adição de polieletrólitos, em geral, melhorou a eficiência do processo para o esgoto puro e para as misturas de 0,5 e 2,0% de lixiviado em esgoto. Na diluição de 5% de lixiviado em esgoto, a adição de polieletrólito não causou grande impacto nos resultados.

Considerando que a meta de remoção neste estudo é de, no mínimo, 30% de DQO, as condições que possibilitaram que a eficiência do processo atingisse essa meta estão apresentadas nas Tabelas 4 a 7, que também ilustram um resumo dos resultados obtidos para cada porcentagem de mistura.

Tabela 4. Resumo dos resultados de DQO e turbidez para as condições que alcançaram a meta estabelecida (amostras de esgoto puro).

Coagulante	Concentração (mg/L)	Polieletrólito	DQO final (mg/L)	Remoção de DQO (%)	Turbidez final (NTU)	Remoção de turbidez (%)
Sulfato de alumínio	20	-	270	30	63	31,4
Cloreto férrico	20	-	152	55,6	45	59
Tanfloc SG	40	-	104	50,5	*	*
Tanfloc SL	20	-	145	65,1	57	70,8
Panfloc	20	-	67	73,6	*	*

* análises não realizadas

Tabela 5. Resumo dos resultados de DQO e turbidez para as condições que alcançaram a meta estabelecida (mistura 0,5% de lixiviado em esgoto).

Coagulante	Concentração (mg/L)	Polieletrólito	DQO final (mg/L)	Remoção de DQO (%)	Turbidez final (NTU)	Remoção de turbidez (%)
Sulfato de alumínio	60	Aniônico 0,5 mg/L	164	39,8	22	46,2
Cloreto férrico	20	-	278	36,1	62,4	53,5
Tanfloc SG	20	-	94	42,9	*	*
Tanfloc SL	20	-	118	65,2	69	78,2
Panfloc	20	-	75	70,3	*	*

* análises não realizadas

**Tabela 6. Resumo dos resultados de DQO e turbidez para as condições que alcançaram a meta estabelecida (mistura 2 % de lixiviado em esgoto).**

Coagulante	Concentração (mg/L)	Polieletrólito	DQO final (mg/L)	Remoção de DQO (%)	Turbidez final (NTU)	Remoção de turbidez (%)
Sulfato de alumínio	20	Aniônico 1,0 mg/L	151	44,5	32	45,9
Cloreto férrico	20	-	199	54,3	103	23,5
Tanfloc SG	20	-	107	35,3	*	*
Tanfloc SL	20	-	195	47,3	38	50,9
Panfloc	20	-	164	35,3	23	47,3

* análises não realizadas

Tabela 7. Resumo dos resultados de DQO e turbidez para as condições que alcançaram a meta estabelecida (mistura 5 % de lixiviado em esgoto).

Coagulante	Concentração (mg/L)	Polieletrólito	DQO final (mg/L)	Remoção de DQO (%)	Turbidez final (NTU)	Remoção de turbidez (%)
Sulfato de alumínio	20	Aniônico 0,5 mg/L	227	37,6	43	28,3
Cloreto férrico	20	-	237	36,3	59	39,5
Tanfloc SG	20	-	133	33,6	*	*
Tanfloc SL	20	Catiônico 1,0 mg/L	181	30	31	50
Panfloc	20	-	168	40,5	33	27,7

* análises não realizadas

Pelos resultados apresentados observa-se que, em geral, a menor concentração de coagulante produziu resultados maiores que 30% de remoção de DQO. O parâmetro turbidez mostrou resultados variáveis, sem nenhuma tendência específica. Os resultados de remoção de DQO mostraram, nestes ensaios, uma tendência de diminuir com o aumento da concentração de lixiviado na mistura.

A Tabela 8 mostra as condições escolhidas para serem analisadas durante a próxima etapa. As condições dos experimentos da 2ª etapa foram definidas com base nos resultados apresentados nas Tabelas 4 a 7 acima. Para cada coagulante, selecionou-se a condição que obteve menor consumo de produtos químicos para atingir 30% de remoção de DQO, em cada uma das diluições de lixiviado em esgoto analisadas.

Segunda etapa

A Tabela 9 apresenta, de forma resumida, os resultados obtidos na 2ª Etapa.

Visando apresentar de forma clara os resultados obtidos foi plotado no programa *Minitab 15* um gráfico Boxplot. As distribuições das porcentagens de remoção de DQO são apresentadas na Figura 1.



Tabela 8. Resumo dos experimentos realizados na 2ª Etapa

Cloreto Férrico		
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)
0%	20	-
0,5%	20	-
2%	20	-
5%	20	-
Tanfloc SG		
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)
0%	40	-
0,5%	20	-
2%	20	-
5%	20	-
Tanfloc SL		
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)
0%	20	-
0,5%	20	-
2%	20	-
5%	20	1,0 (catiônico)
Panfloc		
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)
0%	20	-
0,5%	20	-
2%	20	1,0 (aniônico)
5%	20	-
Sulfato de Alumínio		
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)
0%	20	-
0,5%	20	1,0 (aniônico)
2%	20	1,0 (aniônico)
5%	20	1,0 (aniônico)



Tabela 9. Resumo dos resultados da 2ª Etapa

Cloreto Férrico				
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)	Remoção DQO (%)	
			Média	Faixa
0%	20	-	63	55-75
0,5%			56	48-73
2%			61	53-83
5%			66	52-76
Tanfloc SG				
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)	Remoção DQO (%)	
			Média	Faixa
0%	40	-	81	72-90
0,5%	20	-	72	68-75
2%			71	60-80
5%			69	55-75
Tanfloc SL				
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)	Remoção DQO (%)	
			Média	Faixa
0%	20	-	61	46-68
0,5%			69	62-74
2%			64	58-68
5%	20	1,0 (catiônico)	69	53-76
Panfloc				
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)	Remoção DQO (%)	
			Média	Faixa
0%	20	-	61	47-68
0,5%			69	62-75
2%	20	1,0 (aniônico)	69	56-81
5%	20	-	68	54-76
Sulfato de Alumínio				
Diluição	Concentração (mg/L)	Polieletrólito (mg/L)	Remoção DQO (%)	
			Média	Faixa
0%	20	-	53	52-57
0,5%	20	1,0 (aniônico)	61	58-63
2%			55	51-60
5%			50	44-60

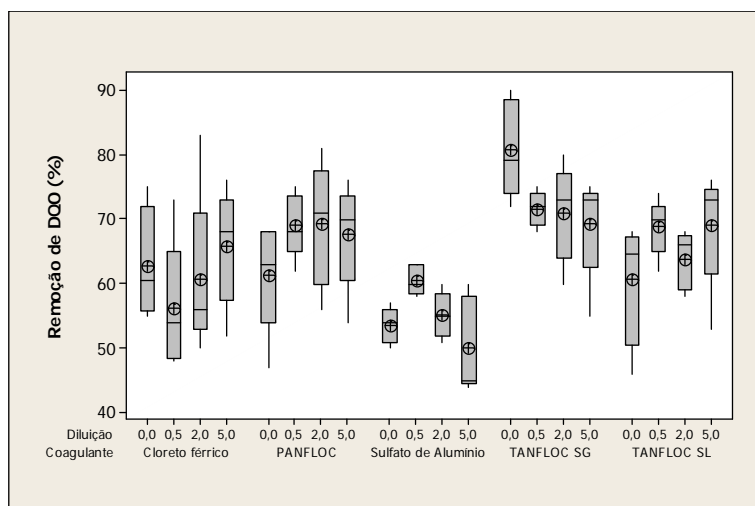


Figura 1- Representação gráfica (Box-plot) da distribuição dos resultados de remoção de DQO

Adotando como válidas as hipóteses acima e fixando um intervalo de confiança para o teste de 95%, tem-se que se $p < 0,05$ os resultados são estatisticamente diferentes.

A Tabela 10 mostra o resultado do teste ANOVA para cada diluição de lixiviado em esgoto e as Figuras 2 a 5 mostram os gráficos (boxplot) da distribuição dos resultados de remoção de DQO para cada diluição de lixiviado em esgoto.

Tabela 10. Resultados do teste ANOVA para cada diluição de lixiviado em esgoto

Concentração de lixiviado em esgoto (%)	p
0	0,001
0,5	0,001
2	0,045
5	0,008

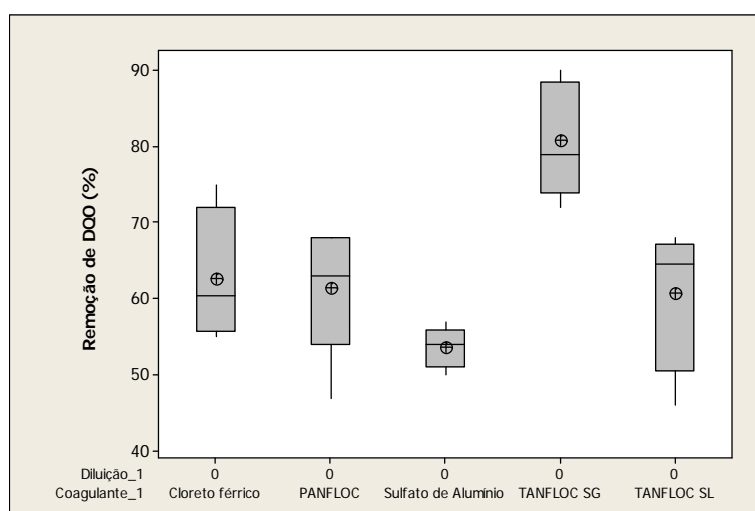


Figura 2- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO dos diferentes coagulantes na amostra de esgoto puro

Para o esgoto puro, obteve-se $p = 0,001$, o que significa que pelo menos um dos coagulantes, ou todos, apresenta resultados estatisticamente diferentes, ou seja, suas remoções não são equivalentes às remoções dos demais coagulantes.



Para confirmar esta observação, um dos coagulantes é retirado da análise e o valor de p é calculado novamente. Se esse valor permanecer menor que 0,05, significa que as remoções de DQO dos coagulantes que continuaram na análise também podem ser diferentes entre si. Se, ao contrário, o valor de p for maior que 0,05 significa que os coagulantes que restaram na análise são iguais e o que foi retirado é diferente.

Como os resultados do Tanfloc SG são visualmente os mais distintos, o teste ANOVA foi feito excluindo-se as remoções de DQO com esse coagulante.

Assim, o resultado sem o Tanfloc SG foi $p = 0,311$, significando que as remoções dos outros coagulantes são iguais entre si, e o Tanfloc SG é diferente. O Tanfloc SG é melhor do que os outros coagulantes para o esgoto puro, os outros são iguais entre si.

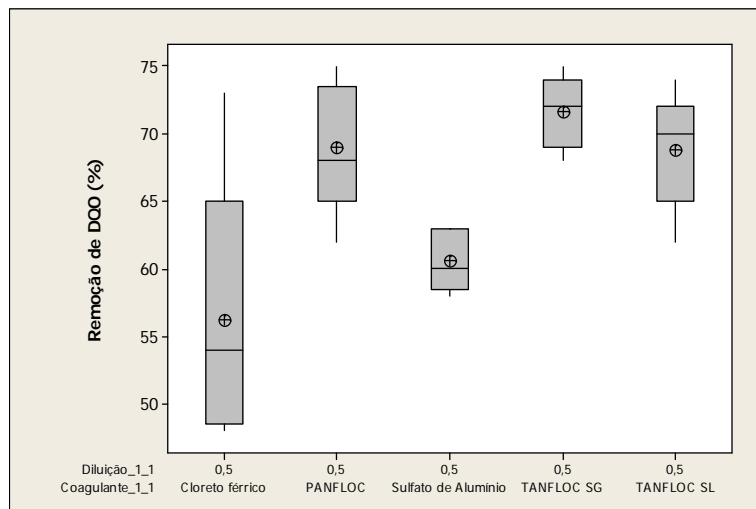


Figura 3- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO dos diferentes coagulantes na mistura de 0,5% de lixiviado em esgoto

Para a diluição de 0,5% de lixiviado em esgoto, obteve-se $p = 0,001$, o que indica diferença estatística entre as remoções de DQO para os diferentes coagulantes.

Retirando-se o cloreto férrico da análise, obteve-se $p = 0,002$, o que continua indicando essa diferença de remoção de DQO. Retirando-se o sulfato de alumínio e mantendo o cloreto férrico, tem-se $p = 0,005$, indicando ainda a diferença. Por fim, retirando da análise o sulfato de alumínio e o cloreto férrico, tem-se $p = 0,504$. Isso significa que os resultados com Panfloc, Tanfloc SG e Tanfloc SL são iguais.

Para testar se o cloreto férrico e o sulfato de alumínio são diferentes entre si, calculou-se p considerando apenas esses dois coagulantes, e o valor encontrado foi $p = 0,368$. Ou seja, os dois coagulantes são iguais entre si.

Os piores resultados para a diluição de 0,5% foram para o cloreto férrico e sulfato de alumínio. O sulfato de alumínio não apresentou bons resultados mesmo sendo testado com adição 1,0 mg/L de polieletrólito aniônico. Os melhores foram Panfloc, Tanfloc SG e Tanfloc SL, que são iguais entre si.

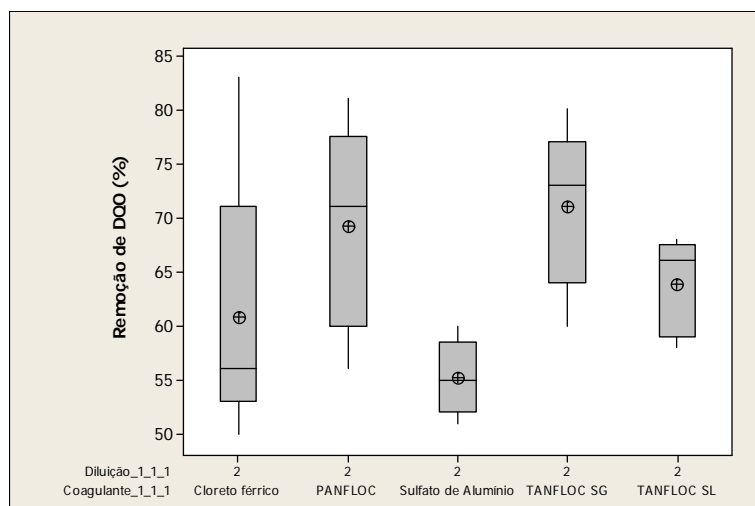


Figura 4- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO dos diferentes coagulantes na mistura de 2% de lixiviado em esgoto

Para a diluição de 2% de lixiviado em esgoto, o teste ANOVA apontou $p = 0,045$, o que indica resultados distintos entre os coagulantes.

Como o sulfato de alumínio apresentou o resultado mais discrepante, o teste foi feito novamente sem esse coagulante, obtendo-se $p = 0,296$. Isso significa que o sulfato de alumínio é o coagulante que apresentou remoções de DQO diferentes dos demais coagulantes. O sulfato de alumínio apresentou o pior desempenho nessa diluição mesmo com a adição de 1,0 mg/L de polieletrólito aniônico e os demais coagulantes apresentaram resultados estatisticamente semelhantes. Entretanto, o tratamento com Panfloc teve adição de 1,0 mg/L de polieletrólito aniônico.

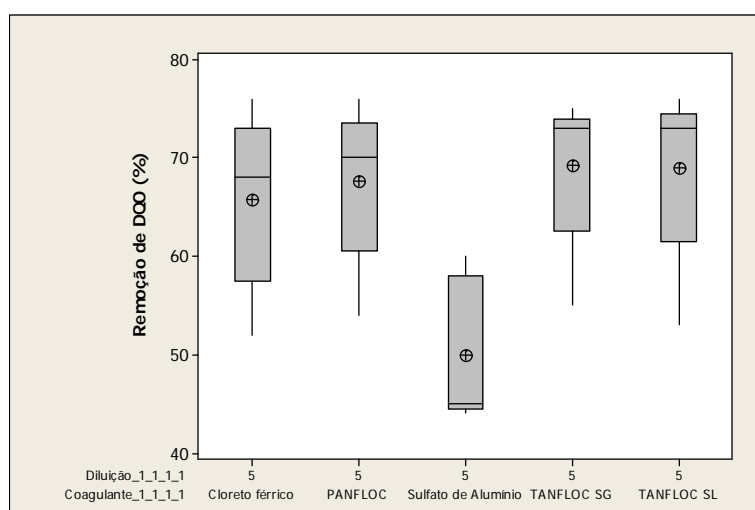


Figura 5- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO dos diferentes coagulantes na mistura de 5% de lixiviado em esgoto

Para a diluição de 5% de lixiviado em esgoto, o resultado do teste ANOVA foi $p = 0,008$. Retirando-se o sulfato de alumínio da análise, obtém-se $p = 0,919$. Isso indica que o sulfato de alumínio apresenta resultados estatisticamente diferentes dos demais coagulantes. Apesar do sulfato de alumínio ter sido testado com a adição de 1,0 mg/L de polieletrólito aniônico, seus resultados foram inferiores aos dos outros coagulantes. Os resultados para o cloreto férrico, Tanfloc SG e Tanfloc SL são melhores que os do sulfato e são iguais entre si. É importante observar que o teste com Tanfloc SL foi feito com a adição de 1,0 mg/L de polieletrólito catiônico.

Assim, pela análise dos gráficos apresentados, para o esgoto puro as remoções de DQO foram maiores para o Tanfloc SG. Para a diluição de 0,5%, os resultados de Tanfloc SG, Tanfloc SL e Panfloc foram estatisticamente semelhantes entre si e melhores que os resultados do cloreto férrico e sulfato de alumínio. O sulfato de alumínio, mesmo com adição de polieletrólito, apresentou resultados inferiores. Para a diluição de 2,0%, os coagulantes cloreto férrico, Tanfloc SG e Tanfloc SL apresentaram resultados equivalentes. O Panfloc apresentou resultados semelhantes a esses coagulantes para esta diluição, porém foi necessária a adição de polieletrólito. Para a diluição de 5,0%, os coagulantes cloreto férrico, Tanfloc SG e Panfloc apresentaram resultados equivalentes. O Tanfloc SL também apresentou resultados estatisticamente semelhantes a esses coagulantes para esta diluição, mas foi necessária a adição de polieletrólito.

Para avaliar se as remoções de DQO de cada coagulante variam com a concentração de lixiviado no esgoto, foi aplicado o teste ANOVA para as remoções de DQO de cada coagulante nas diferentes diluições de lixiviado em esgoto.

A Tabela 11 mostra os resultados do teste ANOVA para as remoções de DQO de cada coagulante em cada uma das diluições analisadas e as Figuras 6 a 9 mostram a comparação dos resultados de remoção de DQO por coagulante em cada diluição.

Tabela 11. Resultados do teste ANOVA para cada coagulante e porcentagens diferentes de lixiviado

Coagulante	p
Cloreto Férrico	0,543
Tanfloc SG	0,067
Tanfloc SL	0,289
Panfloc	0,401
Sulfato de Alumínio	0,014

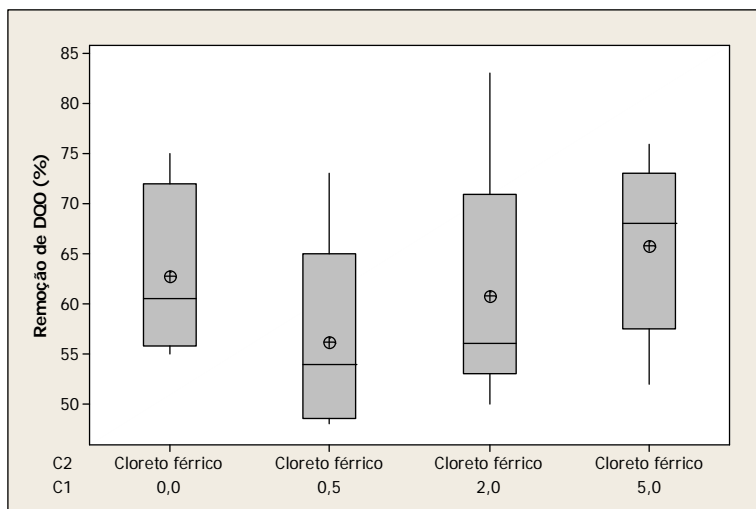


Figura 6- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO do cloreto férrico em diferentes diluições de lixiviado em esgoto

O resultado de $p = 0,543$ indica que as remoções de DQO para o cloreto férrico são estatisticamente iguais, ou seja, não há diferença entre os resultados do cloreto férrico para todas as diluições, e assim não há diminuição da eficiência do tratamento, quando aumenta-se a concentração de lixiviado na mistura a ser tratada.

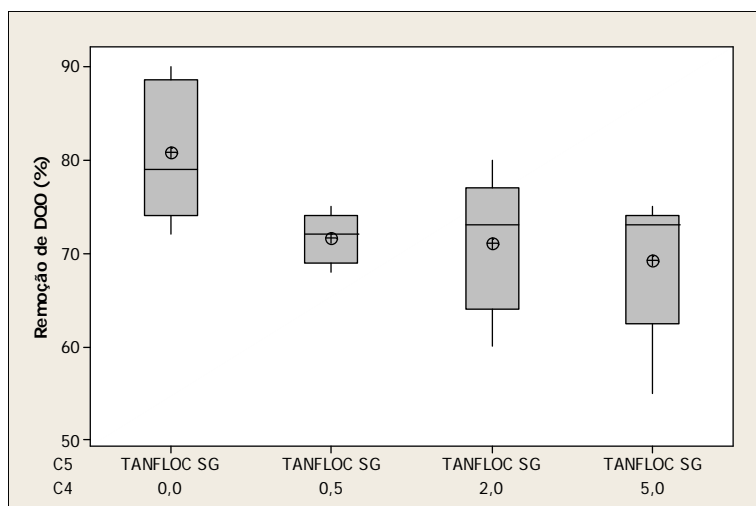


Figura 7- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO do Tanfloc SG em diferentes diluições de lixiviado em esgoto

O resultado de $p = 0,067$ indica que as remoções de DQO para o Tanfloc SG são estatisticamente iguais, ou seja, não há diferença entre os resultados do Tanfloc SG para todas as diluições.

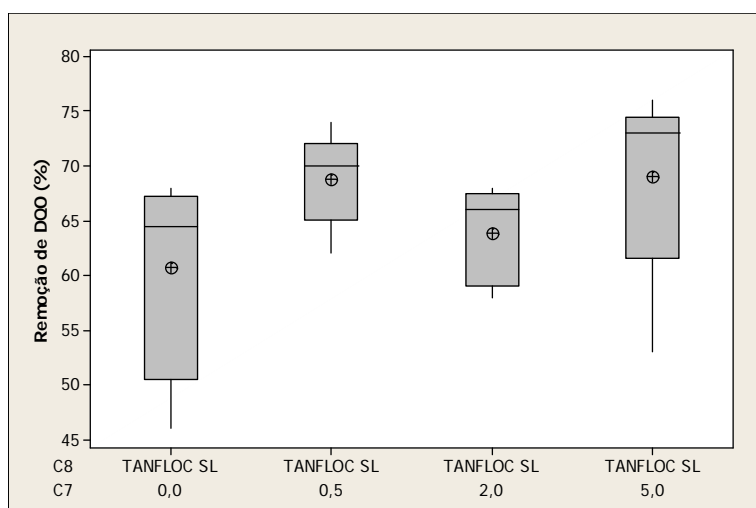


Figura 8- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO do Tanfloc SL em diferentes diluições de lixiviado em esgoto

O resultado de $p = 0,289$ indica que as remoções de DQO para o Tanfloc SL são estatisticamente iguais, ou seja, não há diferença entre os resultados do Tanfloc SL para todas as diluições.

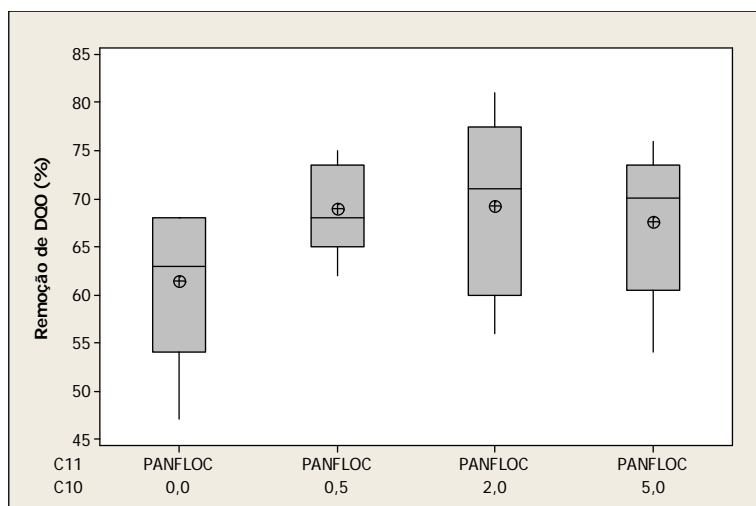


Figura 8- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO do Panfloc em diferentes diluições de lixiviado em esgoto

O resultado de $p = 0,401$ indica que as remoções de DQO para o Panfloc são estatisticamente iguais, ou seja, não há diferença entre os resultados do Panfloc para todas as diluições.

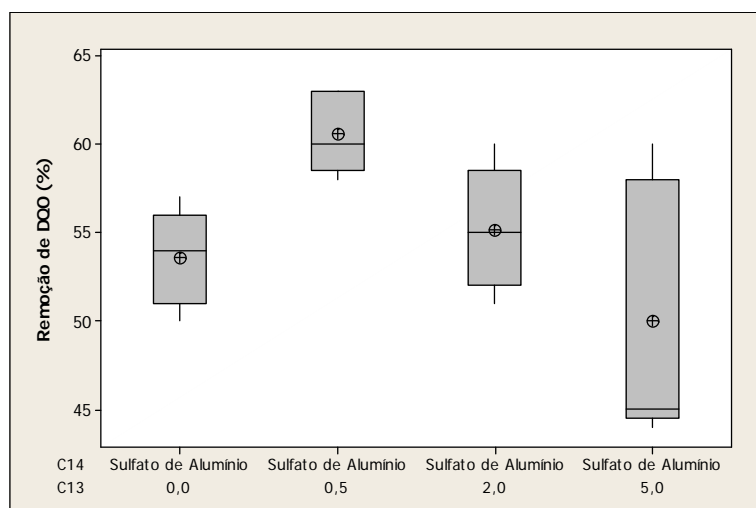


Figura 9- Resultado do teste ANOVA para remoções de DQO do sulfato de alumínio em diferentes diluições de lixiviado em esgoto

O resultado de $p = 0,014$ indica que as remoções de DQO para o sulfato de alumínio são estatisticamente diferentes em pelo menos uma das diluições.

Refazendo o testes sem os dados de 0,5% tem-se um $p = 0,280$. Isso mostra que o resultado com 0,5% de lixiviado em esgoto é o único diferente e os outros são iguais entre si. Para a diluição de 0,5%, o sulfato de alumínio tem a melhor remoção quando comparada com as outras diluições. Apenas nesse caso, foi observada uma remoção de DQO maior com a adição de lixiviado do que para amostra de esgoto puro, que é um resultado atípico.

As análises acima permitem concluir que para o cloreto férrico, Tanfloc SG, Tanfloc SL, e Panfloc, os resultados da avaliação estatística são iguais, ou seja, as remoções são as mesmas para qualquer diluição de lixiviado em esgoto ou para o esgoto puro. Então não houve interferência do lixiviado. Para o sulfato de alumínio, só os resultados com 0,5% são diferentes dos demais, os outros são iguais entre si. Ou seja, não há interferência do lixiviado, a não ser para a diluição de 0,5%, que é melhor do que com esgoto puro.



Terceira etapa

É importante ressaltar que este estudo não produziu resultados suficientes para avaliar a cadeia trófica do corpo receptor que recebe o lixiviado, porque para obter essas importantes informações seria necessário avaliar tanto a toxicidade aguda como a toxicidade crônica por um determinado período de tempo no corpo receptor. Além disso, seria necessário fazer o mesmo estudo com outros organismos vivos representantes de diferentes níveis tróficos (produtores, consumidores primários e consumidores secundários).

De acordo com o laudo de toxicidade, o fator de toxicidade (UT) da amostra bruta determinado pelo Labtox é 4,0 e o fator de toxicidade (UT) da amostra tratada com Tanfloc SG é 4,0.

Os resultados obtidos nos ensaios com *D. rerio* para a solução bruta e para amostra tratada mostraram que essas amostras atendem ao limite de toxicidade para efluentes, estabelecido na legislação vigente no Estado do Rio de Janeiro, no valor de 8 UT (NT-213, FEEMA). Ou seja, o coagulante utilizado não deixou residual tóxico no efluente tratado.

CONCLUSÕES

No presente trabalho, foram realizados diversos ensaios de laboratório para avaliar o processo de coagulação-floculação no tratamento de misturas de esgoto doméstico e lixiviado de aterro sanitário, tentando simular o que ocorre na ETE de Icaraí. Cabe ressaltar que como o tratamento ocorre no pH original da mistura (que não é necessariamente o pH ótimo da coagulação) e que as amostras mostraram variações significativas de composição durante todo o período de estudo, foi necessário realizar análises estatísticas dos resultados obtidos para melhor avaliação dos mesmos.

Os resultados obtidos mostram que a decantação primária (sem adição de coagulantes) não conseguiu atingir a remoção mínima de 30% de DQO.

Observou-se que, em geral, a menor concentração de coagulante (20 mg/L) produziu resultados maiores que 30% de remoção de DQO. Todos os coagulantes apresentaram remoções de DQO superiores à mínima estabelecida. Porém, os ensaios com o sulfato de alumínio necessitaram da adição de polieletrólito nas diluições de 0,5, 2,0 e 5,0% para atingir a remoção mínima de 30% de DQO. No tratamento com Panfloc também foi necessária a adição de polieletrólito na diluição de 2,0% e com o Tanfloc SL na diluição de 5,0%.

Os resultados foram estatisticamente avaliados segundo duas diferentes análises:

Na primeira, analisou-se, em cada diluição estudada, se as remoções de DQO dos diferentes coagulantes eram semelhantes entre si. Em esgoto puro, o Tanfloc SG apresentou os melhores resultados. Na diluição de 0,5% o Tanfloc SG, Tanfloc SL e Panfloc apresentaram resultados equivalentes. Na diluição de 2,0% o Tanfloc SG, Tanfloc SL e cloreto férrico demonstraram o mesmo desempenho. Na diluição de 5,0% o Tanfloc SG, Panfloc e cloreto férrico apresentaram os melhores resultados.

A segunda análise estatística teve como objetivo verificar se a remoção de DQO variava com a concentração de lixiviado. O cloreto férrico, Tanfloc SG, Tanfloc SL e Panfloc não apresentaram influência do lixiviado. Para o sulfato de alumínio, observou-se um resultado atípico, a remoção foi melhor na concentração de 0,5%. A terceira análise comparou os resultados do cloreto férrico e do Tanfloc SG em cada diluição. No esgoto puro e na diluição de 0,5%, o Tanfloc SG foi mais eficiente. Para as diluições de 2,0 e 5,0% ambos os resultados foram estatisticamente semelhantes.

O Tanfloc SG foi indicado como um coagulante eficiente para o tratamento combinado de lixiviado em esgoto, por apresentar desempenho melhor ou igual aos demais coagulantes para todas as concentrações de lixiviado em esgoto analisadas. Além disso, produz o sobrenadante bastante límpido após o processo de clarificação e ainda, não foi necessário adicionar polieletrólito para atingir a meta pré-estabelecida (remoção mínima de DQO de 30%).

O ensaio de toxicidade foi realizado para a solução com maior concentração de lixiviado em esgoto estudada (5,0%). Foram analisadas a amostra bruta e a amostra tratada com o coagulante Tanfloc SG. Os resultados



mostraram que o fator de toxicidade (UT) calculado para ambas as amostras foi igual a 4,0, que é menor que o limite estabelecido pela legislação vigente no Estado do Rio de Janeiro (NT 213 - FEEMA, 1990).

Conclui-se, portanto, que a alternativa de introduzir o lixiviado em uma ETE que apresente a configuração semelhante à ETE Icaraí (tratamento físico-químico e emissário submarino) é viável no sentido de não apresentar decréscimo da eficiência do tratamento. Além disso, o coagulante Tanfloc SG parece possuir o melhor desempenho para esta finalidade dentre os coagulantes estudados.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao programa Prosab da FINEP, à Caixa Econômica Federal, ao apoio do CNPq, uma entidade do governo brasileiro voltada ao desenvolvimento científico e tecnológico; Águas de Niterói e à CLIN - Companhia de Limpeza Urbana de Niterói.

Um agradecimento especial para a Profa. Daniele Maia Bila (UERJ) pelo auxílio nas análises estatísticas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR 12713 - Ecotoxicologia aquática – Toxicidade aguda - Método de ensaio com *Daphnia* spp. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Normas Técnicas, 2003.
2. APHA, AWWA, WPCF. Standard Methods for Examination of Water and Wastewater. New York: 21th ed., 2005.
3. COSSU, R. et al. Biological Removal of Nutrients in Co-treatment of Leachate and Sewage. In: Proceedings of International Training Seminar: Management and Treatment of MSW Landfill Leachate, 1998, Venice, p. XXXIII-1 a XXXIII-13. Cagliari (Italy): CISA – Sanitary Environmental Engineering Centre, 1998.
4. DIAMADOPOULOS, E. et al. Combined Treatment of Landfill Leachate and Domestic Sewage in a Sequencing Batch Reactor. Water Science & Technology, v. 36, p. 61-68, 1997.
5. EBERT, R. Estudo de Regulamentos para Recebimento de Efluentes Não Domésticos no Sistema Público de Esgotos. In: Anais do 20º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999, Rio de Janeiro. Rio de Janeiro: Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental, 1999.
6. EHRIG, H. J. Co-treatment in Domestic Sewage Facilities. In: Proceedings of International Training Seminar: Management and Treatment of MSW Landfill Leachate, 1998, Venice, p. XI-1 a XI-10. Cagliari (Italy): CISA – Sanitary Environmental Engineering Centre, 1998.
7. FATMA. Portaria nº17 - Estabelece os limites máximos de toxicidade aguda para efluentes de diferentes origens e dá outras providências. Florianópolis, 18 abril de 2002.
8. 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.
9. FEEMA. NT-213, aprovada pela Deliberação CECA no1.948 de 04 de setembro de 1990. Critérios e padrões para controle de toxicidade em efluentes líquidos industriais. Diário Oficial [do Estado do Rio de Janeiro], Rio de Janeiro, 18 de outubro de 1990.
10. GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, LEI Nº 2.661 DE 27 DE DEZ. DE 1996. Disponível em <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/c8aa0900025feef6032564ec0060dfff/5a35845b2e69709d032564fb005de9a4?OpenDocument>, último acesso em 25/07/08.
11. GOVERNO DO ESTADO DO RIO DE JANEIRO, LEI Nº 4.692 DE 29 DE DEZ. DE 2005. Disponível em <http://alerjln1.alerj.rj.gov.br/CONTLEI.NSF/c8aa0900025feef6032564ec0060dfff/9c125f8ce1f48f26832570ed00728b70?OpenDocument>, último acesso em 25/07/08
12. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística (IBGE). Pesquisa Nacional de Saneamento Básico - PNSB 2000. Rio de Janeiro, 2002.
13. MARTTINEN, S. K., KETTUNEN, R. H., RINTALA, J. A. Occurrence and Removal of Organic Pollutants in Sewages and Landfill Leachates. The Science of the Total Environment, p. 1-12, v. 301, 2003.
14. QASIM, S; CHIANG, W. Sanitary Landfill Leachate. Editora Technomic Publishing Company, Inc., Lancaster, U.S.A., 1994.
15. DI BERNARDO, L, Comunicação pessoal sobre Técnicas de Tratabilidade, 1993/1995.