

UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO  
ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS

FERNANDA DE MATOS FERRAZ

ESTUDO DE TRATABILIDADE DOS  
LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS -  
ÊNFASE NO TRATAMENTO CONSORCIADO  
COM ESGOTO SANITÁRIO EM SISTEMAS  
AERÓBIOS

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos – 2014

FERNANDA DE MATOS FERRAZ

ESTUDO DE TRATABILIDADE DOS  
LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS -  
ÊNFASE NO TRATAMENTO CONSORCIADO  
COM ESGOTO SANITÁRIO EM SISTEMAS  
AERÓBIOS

Tese apresentada a Escola de Engenharia  
de São Carlos, da Universidade de São  
Paulo, como parte dos requisitos para  
obtenção do título de Doutora em  
Ciências: Engenharia Hidráulica e  
Saneamento

Orientador: Prof. Tit. Jurandyr Povinelli

VERSÃO CORRIGIDA

São Carlos – 2014

AUTORIZO A REPRODUÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO,  
POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS  
DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

D345e de Matos Ferraz, Fernanda  
Estudo de tratabilidade dos lixiviados de aterros sanitários - ênfase no tratamento consorciado com esgoto sanitário em sistemas aeróbios / Fernanda de Matos Ferraz; orientador Jurandyr Povinelli. São Carlos, 2014.

Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação e Área de Concentração em Hidráulica e Saneamento -- Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, 2014.

1. Análise de componentes principais (PCA). 2. Biofiltro aerado submerso. 3. Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier. 4. Lixiviados de aterros sanitários. 5. Lodos ativados. 6. PCR-DGGE. 7. Resíduos sólidos domiciliares. 8. Substâncias húmicas. I. Título.

## FOLHA DE JULGAMENTO

Candidata: Bacharel **FERNANDA DE MATOS FERRAZ**.

Título da tese: "Estudo de tratabilidade dos lixiviados de aterros sanitários – ênfase no tratamento consorciado com esgoto sanitário em sistemas aeróbios".

Data da defesa: 14/01/2014

### Comissão Julgadora:

Prof. Titular **Jurandyr Povinelli (Orientador)**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Prof. Associado **Vladir Schalch**  
(Escola de Engenharia de São Carlos/EESC)

Profa. Dra. **Eny Maria Vieira**  
(Instituto de Química de São Carlos/IQSC)

Prof. Dr. **Marcus César Avezum Alves de Castro**  
(Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho"/UNESP- Rio Claro)

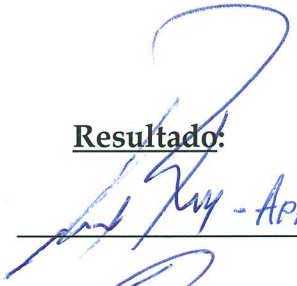
Prof. Titular **Pedro Além Sobrinho**  
(Escola Politécnica/USP)

Coordenadora do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Hidráulica e Saneamento:

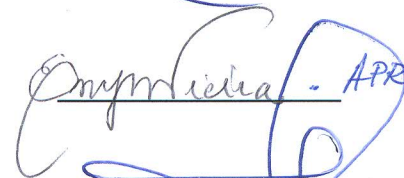
Profa. Associada **Maria Bernadete A. Varesche Silva**

Presidente da Comissão de Pós-Graduação:  
Prof. Titular **Denis Vinicius Coury**

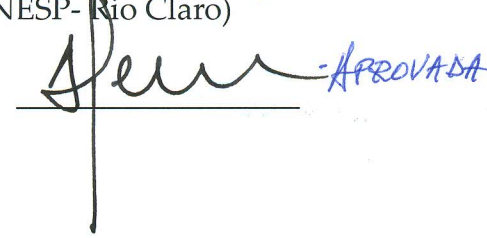
### Resultado:

 - APROVADA

 - APROVADA

 - APROVADA

 - APROVADA

 - APROVADA

ESCOLA DE ENGENHARIA DE SÃO CARLOS  
Serviço de Pós-Graduação  
Protocolado em 14/01/2014



*Aos meus pais, José Carlos Ferraz e Vera Lúcia de Matos Ferraz, por não terem poupado esforços para que eu pudesse investir em tudo que me trouxesse felicidade plena.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida e as inúmeras graças que me foram concedidas durante a execução desta Tese.

Aos meus pais, José Carlos e Vera, e meus irmãos, Henrique, Ariadne e Mel, pelo apoio incondicional em todos os momentos da minha vida.

Ao meu melhor amigo e namorado, Eduardo, por todo amor e companheirismo.

Ao Prof. Jurandyr Povinelli, pela confiança de ter continuado a me orientar no Doutorado; pela amizade e compreensão nos momentos em que precisei me ausentar e pelo incentivo constante para que eu buscasse meu melhor.

À Dra Maria Rosária Marques Moreno, por ter sido meu referencial de que as dificuldades seriam superadas, dada a plena confiança que tenho em sua conduta médica.

À Profa. Dra Eny Maria Vieira, por ter se mostrado sempre muito solícita e ter viabilizado o uso de equipamentos na Central Analítica do IQSC, o que foi decisivo para elucidação das questões levantadas nesta Tese.

À Profa Dra Aline Thaís Bruni, pelos ensinamentos transmitidos desde minha iniciação científica, pelos muitos conselhos, gargalhadas e amizade inestimável.

Aos Professores Dr José Roberto Campos, Dr Marco Antônio Penalva Reali, Dr Luiz Antônio Daniel, Dr Valdir Schalch, Dr Eugênio Foresti e Dr José Carlos Cintra, pelo conhecimento adquirido em suas disciplinas cursadas durante o Doutorado.

Ao técnico Roberto Bérnago, pela construção dos reatores, feita com muito esmero e dedicação.

Ao técnico Alcino de Paula, pela grande amizade e imensurável ajuda prestada durante a operação dos reatores.

Aos técnicos Júlio César Trofino, Paulo Fragiácomo, Natália Santos, Maria Aparecida P. Viudes (Cidinha), Bianca Rodrigues, Aline Musetti, Sabrina Marini, Eloisa Pozzi e Isabel Sakamoto pela amizade, auxílio e grande aprendizado.

Às secretárias Sá, Rose, Valderes, Cecília, Márcia e o técnico André, por todo auxílio gentilmente prestado.

À Fernanda e Flávia do setor de Contabilidade, pelas incansáveis orientações e grande aprendizado de questões contábeis que me proporcionaram.

À Daniela Cordeiro, pelos bons anos de convívio, pela amizade e as importantes sugestões para esta Tese.

Aos amigos Aurélia, Rodrigo Córdoba, Raphael-Jovi e Liana-Lianícola, que tive o prazer de conhecer e que tornaram extremamente agradáveis os anos que passamos juntos.

À Ana Luiza-Malvee, por sempre me fazer rir com suas histórias malvinas.

À querida Rafaella Campos, por sua presença decisiva no momento em que mais foi preciso, por sua confiança, amizade, e pelo exemplo deixado de que, quando as vaidades individuais são postas de lado, os trabalhos em equipe são sempre bem sucedidos e muito mais agradáveis.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP) pelo auxílio financeiro concedido e aos Assessores responsáveis pela análise dos Processos nº 2010/51955-2 (Auxílio Pesquisa) e nº 2011/50627-4, pela atenção aos relatórios e comentários.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo auxílio financeiro concedido em 2010 ( Processo Nº141710/2010-1).

À São Carlos Ambiental, pela autorização para coleta do lixiviado do aterro sanitário municipal.

À Faber-Castell e Foz do Brasil por doação do lodo aeróbio.

*“Viver por um projeto, uma causa, uma missão, um ideal ou mesmo uma utopia, é o que imprime sentido à vida. E uma vida plena de sentido é, ainda que afetada por dores e sofrimentos, o que nos imprime felicidade”*

***Frei Betto***

## RESUMO

FERRAZ, F.M. **Estudo de tratabilidade dos lixiviados de aterros sanitários - ênfase no tratamento consorciado com esgoto sanitário em sistemas aeróbios**. 2014. 198 p + Anexos. Tese (Doutorado) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

Esta Tese foi dedicada à duas alternativas para tratamento dos lixiviados de aterros sanitários. A primeira delas, o tratamento consorciado do lixiviado com esgoto sanitário em sistemas aeróbios, teve como objetivo principal verificar se a remoção da matéria orgânica do lixiviado seria devida à biodegradação ou à simples diluição no esgoto sanitário. Para responder esse questionamento, propôs-se o método tentativo “equivalente em ácido húmico” (Eq.AH). Em ensaios com reatores de lodos ativados (10 L) operados em batelada, avaliaram-se as remoções de matéria orgânica e nitrogênio para diferentes misturas de lixiviado e esgoto sanitários brutos e pré-tratados, com proporções volumétricas de lixiviado de 0, 0,2, 2 e 5 %. O tratamento foi mais eficiente para a mistura esgoto bruto e lixiviado pré-tratado por “air stripping” (para remoção da amônia) na proporção volumétrica de 2 %. Essa condição foi avaliada em reatores piloto de lodos ativados (95 L) e biofiltro aerado submerso (178 L), alimentados continuamente com tempo de detenção hidráulica (TDH) de 24 h. O reator piloto de lodos ativados removeu 59 % do COD e a eficiência de nitrificação foi de 60 %; enquanto que o biofiltro removeu 83 % do COD e eficiência de nitrificação foi de 77 %. Com o método tentativo Eq.AH, verificou-se que a remoção da matéria orgânica do lixiviado pré-tratado se deu por biodegradação parcial com o esgoto sanitário, resultado confirmado por espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier. As remoções do COD Eq.AH nos reatores piloto de lodos ativados e biofiltro aerado submerso foram de, respectivamente, 47 e 71 %. Adicionalmente, o monitoramento da remoção da matéria orgânica pôde ser

realizado com eficácia pelo teste de coloração com nanquim, utilizando o método de classificação de tonalidades proposto nesta Tese. A segunda alternativa proposta nesta Tese consistiu no tratamento dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal em reatores de lodos ativados. Os resultados, todavia, foram insatisfatórios: indicaram que essa alternativa se mostrou inviável: após 20 dias de aeração nos reatores de bancada alimentados em batelada, a remoção da matéria orgânica foi inferior a 40 % e a remoção do nitrogênio foi devida à volatilização da amônia.

**Palavras-chave:** Análise de componentes principais (PCA), biofiltro aerado submerso, espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier, lixiviados de aterros sanitários, lodos ativados, PCR-DGGE, resíduos sólidos domiciliares, substâncias húmicas.

## ABSTRACT

FERRAZ, F.M. **Study of tractability of sanitary landfill leachate – Emphasis on co-treatment with domestic wastewater in aerobic systems.**. 2014. 198 p + appendix. Thesis (Doctorate) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo.

This Thesis was dedicated to two alternatives for landfill leachate treatment. The first one, the aerobic co-treatment of leachate and domestic wastewater in aerobic systems, aimed to verify if the organic matter of leachate was removed by biodegradation or dilution with domestic wastewater. To answer this questioning, it was proposed the tentative method “equivalent in humic acid” (Eq.HA). In the experiments with bench-scale activated sludge reactors (10 L) operated in batch mode, it was evaluated the organic matter and nitrogen removal from mixtures containing raw and pre-treated leachate and domestic wastewater, at the volumetric ratios of 0, 0.2, 2 and 5 %. The treatment was mostly efficient when it was used the mixture domestic wastewater and leachate pre-treated by air stripping (for ammonia removal), at a volumetric ratio of 2 %. This condition was also evaluated in a pilot-scale activated sludge reactor (95 L) and a submerged aerobic biofilter (178 L), operated under continuous-flow regime with a 24-h hydraulic retention time. The pilot-scale activated sludge reactor removed 59 % of DOC and nitrification efficiency was 60 %; whereas the submerged aerobic biofilter removed 83 % of DOC and nitrification efficiency was 77%. Using the Eq.HA approach, it was determined that pre-treated leachate organic matter removal was due to partial biodegradation with domestic wastewater, which was confirmed by Fourier transform infrared spectroscopy. The removals of COD Eq.HA were 47 % for the pilot-scale activated sludge reactor and 71 % for the submerged aerobic biofilter. Additionally, organic matter could be assessed with the India ink reverse stain test, using the proposed method for tonalities

classification. The second alternative proposed by this Thesis consisted in the treatment of raw and pre-treated leachate by lime addition, using activated sludge reactors. The results did not indicate the feasibility of this alternative: after 20 days of aeration, the organic matter removal was lesser than 40 %, and nitrogen was mostly removed by ammonia volatilization.

**Key-words:** activated sludge, humic acid, Fourier transform infrared spectroscopy, PCR-DGGE, principal component analysis (PCA), submerged aerobic biofilter.



## LISTA DE ABREVIATURAS

|         |   |
|---------|---|
| ABNT    | Associação Brasileira de Normas Técnicas  |
| Af      | Afluente  |
| AH      | Ácidos húmicos  |
| ANOVA   | <i>Analysis of variance</i>   |
| BAS     | Biofiltro aerado submerso   |
| BAS-0 % | Biofiltro aerado submerso controle, alimentado apenas com esgoto sanitário        |
| BAS-2 % | Biofiltro aerado submerso alimentado com lixiviado 2 % (volume/volume)            |
| BAS-5 % | Biofiltro aerado submerso alimentado com lixiviado 5 % (volume/volume)            |
| CONAMA  | Conselho Nacional de Meio Ambiente  |
| COD     | Carbono orgânico dissolvido   |
| COT     | Carbono orgânico total  |
| DBO     | Demanda bioquímica de oxigênio  |
| DGGE    | Eletroforese em gel por gradiente desnaturante                                    |
| DQO     | Demanda química de oxigênio   |
| EA      | Efluente anaeróbio  |
| EESC    | Escola de Engenharia de São Carlos  |
| Ef      | Efluente  |
| Eq. AH  | Equivalente em ácido húmico   |
| ES      | Esgoto sanitário  |
| ETE     | Estação de tratamento de esgoto   |
| IQSC    | Instituto de Química de São Carlos  |
| IS      | Índice de Shannon-Wiener  |
| IVL     | Índice volumétrico do lodo  |
| LA      | Lodos ativados  |
| LAC     | Reator de lodos ativados controle, alimentado apenas com esgoto sanitário         |
| LA-2 %  | Reator de lodos ativados alimentado com lixiviado na proporção volumétrica de 2 % |
| LA-5 %  | Reator de lodos ativados alimentado com lixiviado na proporção volumétrica de 5 % |
| LBr     | Lixiviado bruto   |

|         |  |
|---------|--|
| LBr/EA  | Mistura lixiviado bruto/efluente anaeróbio       |
| LBr/ES  | Mistura lixiviado bruto/esgoto sanitário         |
| LPT     | Lixiviado pré-tratado por “air stripping”        |
| LPT/EA  | Mistura lixiviado pré-tratado/efluente anaeróbio |
| LPT/ES  | Mistura lixiviado bruto/esgoto sanitário         |
| NA      | Não se aplica                                    |
| NAT     | Nitrogênio amoniacal total                       |
| ND      | Não detectado                                    |
| Nitriif | Eficiência de nitrificação                       |
| NTK     | Nitrogênio total Kjeldahl                        |
| OD      | Oxigênio Dissolvido                              |
| PCA     | <i>Principal component analysis</i>              |
| PCR     | Reação de Polimerização em Cadeia                |
| PV      | Proporção volumétrica                            |
| RAC     | Reator anaeróbio compartimentado                 |
| Rem     | Eficiência de remoção                            |
| rpm     | Rotação por minuto                               |
| RSU     | Resíduos Sólidos Urbanos                         |
| SH      | Substâncias húmicas                              |
| ST      | Sólidos totais                                   |
| STF     | Sólidos totais fixos                             |
| STV     | Sólidos totais voláteis                          |
| SST     | Sólidos suspensos totais                         |
| SSF     | Sólidos suspensos fixos                          |
| SSV     | Sólidos suspensos voláteis                       |
| SS      | Sólidos sedimentáveis                            |
| TA      | Tanque de aeração                                |
| TDC     | Tempo de detenção celular                        |
| TDH     | Tempo de detenção hidráulica                     |
| T.Op.   | Tempo de operação das bateladas                  |

## LISTA DE SÍMBOLOS

|            |   |
|------------|---|
| $x_1$      | Equivalente em ácido húmico do esgoto sanitário antes do tratamento aeróbio                                       |
| $x_2$      | Equivalente em ácido húmico da mistura lixiviado/esgoto antes do tratamento aeróbio                               |
| $y_1$      | Equivalente em ácido húmico do esgoto sanitário após o tratamento aeróbio   |
| $y_2$      | Equivalente em ácido húmico da mistura lixiviado/esgoto após do tratamento aeróbio                                |
| $\Delta_1$ | Contribuição do lixiviado à matéria de difícil degradação da mistura lixiviado/esgoto antes do tratamento aeróbio |
| $\Delta_2$ | Matéria refratária devida à adição de lixiviado ao esgoto sanitário   |
| $\theta_c$ | Tempo de residência celular   |

## LISTA DE FIGURAS

|   |    |
|---|----|
| <b>FIGURA 1</b> - MODELO DIDÁTICO SIMPLIFICADO DE UM ATERRO SANITÁRIO (ADAPTADO DE SOUTO, 2009).....  | 33 |
| <b>FIGURA 2</b> - ETAPAS DA DIGESTÃO ANAERÓBIA NAS CÉLULAS DO ATERRO SANITÁRIO (SOUTO, 2009).....   | 35 |
| <b>FIGURA 3</b> - ESQUEMA DO PROCESSO DE LODOS ATIVADOS (MISTURA COMPLETA) E REPRESENTAÇÃO DO FLOCO NO TANQUE DE AERAÇÃO. FONTE: METCALF E EDDY (2003) E KEIDING AND NIELSEN (1997) ADAPTADOS PELA AUTORA.....  | 42 |
| <b>FIGURA 4</b> - CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O COD “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (EQ.AH). FONTE: A AUTORA.....  | 59 |
| <b>FIGURA 5</b> – ESQUEMA DA EXECUÇÃO PROPOSTA PARA O MÉTODO TENTATIVO “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (A) ANTES E (B) APÓS O TRATAMENTO AERÓBIO. FONTE: A AUTORA. ....   | 63 |
| <b>FIGURA 6</b> - CURVA DE CALIBRAÇÃO PARA O COT “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (EQ.AH). FONTE: A AUTORA. ....   | 64 |
| <b>FIGURA 7</b> – TESTE DE COLORAÇÃO COM NANQUIM EM (A) AMOSTRA DO REATOR DE LODOS ATIVADOS PILOTO ALIMENTADO APENAS COM ESGOTO, COM APRESENTAÇÃO DO (B) MÉTODO PROPOSTO PARA CLASSIFICAÇÃO DOS TONS OBSERVADOS E (C) A ÁREA CALCULADA PELO SOFTWARE <i>IMAGE PRO-PLUS</i> PARA ESSA MICROGRAFIA. FONTE: A AUTORA. ....   | 65 |
| <b>FIGURA 8</b> - VISTA AÉREA DO ATERRO SANITÁRIO DE SÃO CARLOS-SP, COM INDICAÇÃO DO PONTO DE COLETA DO LIXIVIADO. FONTE: GOOGLE EARTH.....   | 68 |
| <b>FIGURA 9</b> - RESERVATÓRIO DE ARMAZENAMENTO DO LIXIVIADO COLETADO: (1) TUBULAÇÃO PARA COLETA DE LIXIVIADO NA PARTE INTERNA DA PLANTA EXPERIMENTAL. FOTO DA AUTORA.....  | 68 |
| <b>FIGURA 10</b> - INSTALAÇÃO EXPERIMENTAL DO SUBPROJETO 1: (1) TORRE DE “AIR STRIPPING”; (2) TORRES DE ABSORÇÃO; (3): RESERVATÓRIO PARA ARMAZENAMENTO DO LIXIVIADO; (4): COMPRESSOR DE AR; (5): ROTÂMETRO; (6): PARTE SUPERIOR DAS TORRES DE ABSORÇÃO; (7): DIFUSOR DE AR DAS TORRES DE ABSORÇÃO; (8): BOMBA DOSADORA. FOTOS DA AUTORA.....  | 71 |
| <b>FIGURA 11</b> – UNIDADES EXPERIMENTAIS PARA PRECIPITAÇÃO QUÍMICA DO LIXIVIADO: (1) TUBULAÇÃO PARA COLETA DO LIXIVIADO BRUTO ARMAZENADO NO (2) RESERVATÓRIO DE 3 M <sup>3</sup> ; (3) RESERVATÓRIO COM AGITADOR MECÂNICO; E (4) TUBULAÇÃO PARA COLETA DO SOBRENADANTE E/OU REMOÇÃO DO LODO GERADO. FOTOS DA AUTORA. ....  | 72 |
| <b>FIGURA 12</b> - ESQUEMA DOS PROCESSOS DE “AIR STRIPPING” E ABSORÇÃO DE AMÔNIA: (1) TORRE DE “AIR STRIPPING”; (2 E 3) TORRES DE ABSORÇÃO; (4) BOMBA DOSADORA; (5) COMPRESSOR DE AR; (A-B) PONTOS DE AMOSTRAGEM; (C-D) PONTOS DE AMOSTRAGEM E DESCARGA DAS TORRES DE ABSORÇÃO; (E-F) REGISTROS PARA ALIMENTAÇÃO DAS TORRES DE ABSORÇÃO (BONMATÍ AND FLOTATS (2003), ADAPTADOS PELA AUTORA).....  | 73 |
| <b>FIGURA 13</b> - REATOR ANAERÓBIO COMPARTIMENTADO. FOTO DA AUTORA. ....   | 74 |
| <b>FIGURA 14</b> - CORTE LONGITUDINAL DO REATOR ANAERÓBIO COMPARTIMENTADO: (1) ESGOTO EFLUENTE DO TRATAMENTO PRELIMINAR; (2) PONTOS DE AMOSTRAGEM; (3) DESCARGA DE FUNDO; (4) TUBULAÇÃO DE PVC DE DISTRIBUIÇÃO DO ESGOTO; (5) TUBOS COLETORES DO ESGOTO TRATADO EM CADA CÂMARA; (6) TUBULAÇÃO EM PVC DE DESCARGA DO LODO DO DECANTADOR DE PLACAS; (7) TUBO DE COLETA DO EFLUENTE TRATADO FINAL; (8) PLACA DE MADEIRA DO DECANTADOR DE PLACAS; (9) TRAVAMENTO EM CAIBRO DE 5 X 5 CM; (10) GRADE DE AÇO INOX; (11) VERTEDOR TRIANGULAR. FONTE: POVINELLI (1999). .... | 75 |
| <b>FIGURA 15</b> - REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA. FONTE DA PERSPECTIVA: KATO (1982), ADAPTADO PELA AUTORA. FOTO DA AUTORA.....  | 76 |
| <b>FIGURA 16</b> - REATORES DE LODOS ATIVADOS PILOTO: (1) TUBULAÇÃO DE ALIMENTAÇÃO; (2) AGITADOR DO TANQUE DE AERAÇÃO; (3) DIFUSORES DE AR; (4) TUBULAÇÃO DE RECIRCULAÇÃO DO LODO; (5) DECANTADORES. FOTOS DA AUTORA. ....  | 78 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>FIGURA 17</b> - SISTEMA DE ALIMENTAÇÃO DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS PILOTO: (1) TANQUES DE ALIMENTAÇÃO; (2) DESCARGA DE FUNDO; (3) EXTRAVASOR; (4) TUBULAÇÃO DE DISTRIBUIÇÃO DO ESGOTO SANITÁRIO; (5) REATORES DE LODOS ATIVADOS PILOTO; (6) TANQUE DE EQUALIZAÇÃO. FOTOS DA AUTORA. ....   | 78  |
| <b>FIGURA 18</b> -BIOFILTRO AERADO SUBMERSO: (1) MÓDULO 1; (2) MÓDULO 2; (3) MÓDULO 3; (4) MÓDULO 4; (5) VISORES; (6) REGISTRO DE ALIMENTAÇÃO; (7) REGISTRO DE DESCARGA; (8) ANÉIS “RASCHIG” COMO MATERIAL SUPORTE; (9) PLACA PERFURADA COM 4 MANGUEIRAS PARA DISTRIBUIÇÃO DE AR. FOTOS DA AUTORA.....   | 79  |
| <b>FIGURA 19</b> – BIOFILTRO AERADO SUBMERSO (BAS) CONTROLE: (1) PONTO DE COLETA DO AFLUENTE; (2) PONTO DE COLETA DO EFLUENTE TRATADO. FOTO DA AUTORA.....   | 80  |
| <b>FIGURA 20</b> – REMOÇÃO DE COR DO LIXIVIADO BRUTO APÓS O AJUSTE DE PH COM CAL. FONTE: FERRAZ, 2010. ....  | 88  |
| <b>FIGURA 21</b> - COMPARAÇÃO ENTRE DOS ESPECTROS DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER DAS AMOSTRAS DE LIXIVIADO BRUTO, LIXIVIADO PRÉ-TRATADO, ÁCIDO HÚMICO SIGMA-ALDRICH E ÁCIDO FÚLVICO EXTRAÍDO NO INSTITUTO DE QUÍMICA DE SÃO CARLOS, COM AS PRINCIPAIS BANDAS DE ABSORÇÃO INDICADAS.....  | 95  |
| <b>FIGURA 22</b> – MICROGRAFIAS OBTIDAS POR MICROSCOPIA ELETRÔNICA DE VARREDURA, COM AUMENTO DE 5 000 VEZES, NAS AMOSTRAS DE (A) LIXIVIADO BRUTO, (B) LIXIVIADO ALCALINIZADO A PH 11 E (C) MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO NA PROPORÇÃO VOLUMÉTRICA DE 2 %. ....  | 97  |
| <b>FIGURA 23</b> – REMOÇÃO DOS SÓLIDOS TOTAIS PELO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, APÓS 20 DIAS DE OPERAÇÃO, NAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS (A) 1, (B) 2, (C) 3 E (D) 4. ....  | 99  |
| <b>FIGURA 24</b> - REMOÇÃO DA DBO <sub>5,20</sub> BRUTA PELO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, OPERADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS, NAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS (A) 1, (B) 2, (C) 3 E (D) 4. ....   | 101 |
| <b>FIGURA 25</b> - REMOÇÃO DO COT PELO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, OPERADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS, NAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS (A) 1, (B) 2, (C) 3 E (D) 4.....  | 103 |
| <b>FIGURA 26</b> - REMOÇÃO DA DQO TOTAL PELO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, OPERADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS, NAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS (A) 1, (B) 2, (C) 3 E (D) 4. ....   | 104 |
| <b>FIGURA 27</b> - REMOÇÃO DA DQO SOLÚVEL PELO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, OPERADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS, NAS CONDIÇÕES EXPERIMENTAIS DOS ENSAIOS (A) 1, (B) 2, (C) 3 E (D) 4. ....   | 105 |
| <b>FIGURA 28</b> – EFICIÊNCIAS DE REMOÇÃO DO “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (REM."EQ.A.H") EM FUNÇÃO DAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE LIXIVIADO, NOS 4 ENSAIOS REALIZADOS COM REATOR DE LA EM ESCALA DE BANCADA. ....   | 110 |
| <b>FIGURA 29</b> – APLICAÇÃO DO TESTE DE COLORAÇÃO COM NANQUIM E DO MÉTODO PROPOSTO PARA QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NÃO ASSIMILADO EM AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA (A-B) NO ENSAIO 1 (LIXIVIADO BRUTO/ESGOTO SANITÁRIO 2 %) E (C-D) ENSAIO 3 (LIXIVIADO BRUTO/EFLUENTE ANAERÓBIO 2 %). ....             | 111 |
| <b>FIGURA 30</b> – APLICAÇÃO DO TESTE DE COLORAÇÃO COM NANQUIM E DO MÉTODO PROPOSTO PARA QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NÃO ASSIMILADO EM AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA NO ENSAIO 1 (LIXIVIADO BRUTO/ESGOTO SANITÁRIO 5 %) E (C-D) ENSAIO 3 (LIXIVIADO BRUTO/EFLUENTE ANAERÓBIO 5 %). ....                   | 112 |
| <b>FIGURA 31</b> – APLICAÇÃO DO TESTE DE COLORAÇÃO COM NANQUIM E DO MÉTODO PROPOSTO PARA QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NÃO ASSIMILADO EM AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA (A-B) NO ENSAIO 2 (LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO 2 %) E (C-D) ENSAIO 4 (LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/EFLUENTE ANAERÓBIO 2 %). .... | 112 |

|  |     |
|--|-----|
| <b>FIGURA 32</b> – APLICAÇÃO DO TESTE DE COLORAÇÃO COM NANQUIM E DO MÉTODO PROPOSTO PARA QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NÃO ASSIMILADO EM AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA (A-B) NO ENSAIO 2 (LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO 5 %) E (C-D) ENSAIO 4 (LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/EFLUENTE ANAERÓBIO 5 %).  | 113 |
| <b>FIGURA 34</b> – MICROSCOPIA ÓTICA COMUM DO LODO DOS REATORES CONTROLE: (A) PROTOZOÁRIO FIXO SEMELHANTE A <i>VORTICELLA</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X, NO ENSAIO 1 APÓS 2 DIAS DE OPERAÇÃO; (B) PROTOZOÁRIO LIVRE NATANTE, SEMELHANTE À <i>ASPIDISCA</i> SP, COM AUMENTO DE 800X, NO ENSAIOS 1 APÓS 20 DIAS DE OPERAÇÃO; (C) BACTÉRIAS COLONIAIS, COM AUMENTO DE 400X, NO ENSAIO 3, APÓS 2 DIAS DE OPERAÇÃO; (C) ROTÍFERO, COM AUMENTO DE 200 X, NO ENSAIO 3 APÓS 20 DIAS DE OPERAÇÃO.  | 119 |
| <b>FIGURA 35</b> – MICROSCOPIA ÓTICA COMUM DO LODO APÓS 20 DIAS DE AERAÇÃO: (A) PROTOZOÁRIO RIZÓPODE SEMELHANTE A <i>ARCELLA</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X, NO REATOR “0,2 %” DO ENSAIO 3; (B) PROTOZOÁRIO RIZÓPODE SEMELHANTE A <i>ARCELLA</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X, NO REATOR “2 %” DO ENSAIO 3; (C) PROTOZOÁRIO FIXO SEMELHANTE A <i>EPYSTILYS</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X, NO REATOR “5 %” DO ENSAIO 2; (D) PROTOZOÁRIO FIXO SEMELHANTE A <i>EPYSTILYS</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X, NO REATOR “0,2 %” DO ENSAIO 4; (E) PROTOZOÁRIO FIXO SEMELHANTE A <i>VORTICELLA</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X, NO REATOR “2 %” DO ENSAIO 4; (F) PROTOZOÁRIO CILIADO, SEMELHANTE AO <i>PARAMECIUM</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X, NO REATOR “5 %” DO ENSAIO 4. | 119 |
| <b>FIGURA 36</b> – MICROSCOPIA ÓTICA COMUM DO LODO APÓS 20 DIAS DE AERAÇÃO: (A) ROTÍFERO, COM AUMENTO DE 400 X, NO REATOR “0,2 %” DO ENSAIO 1; (B) ROTÍFERO, COM AUMENTO DE 100 X, NO REATOR “2 %” DO ENSAIO 1; (C) ROTÍFERO, COM AUMENTO DE 400 X, NO REATOR “5 %” DO ENSAIO 1; (D) PROTOZOÁRIO FIXO SEMELHANTE A <i>EPYSTILYS</i> SP, COM AUMENTO DE 400 X, NO REATOR “0,2 %” DO ENSAIO 2; (E) PROTOZOÁRIO FIXO SEMELHANTE A <i>EPYSTILYS</i> SP, COM AUMENTO DE 400 X, NO REATOR “2 %” DO ENSAIO 2 (F) BACTÉRIAS COLONIAIS SEMELHANTES À <i>ZOOGLA</i> , COM AUMENTO DE 200X, NO REATOR “5 %” DO ENSAIO 2.  | 120 |
| <b>FIGURA 37</b> – PRESENÇA DE (A) HIFAS, COM AUMENTO DE 400 X E (B) NEMATÓIDES, COM AUMENTO DE 200 X.   | 120 |
| <b>FIGURA 38</b> - ESPECTROS DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER DAS AMOSTRAS DE AFLUENTE E EFLUENTE DOS ENSAIOS 1 E 3, PARA AS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE (A) 2 % E (B) 5 %.   | 122 |
| <b>FIGURA 39</b> - ESPECTROS DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER DAS AMOSTRAS DE AFLUENTE E EFLUENTE DOS ENSAIOS 2 (E2) E 4 (E4), COM AS PRINCIPAIS BANDAS DE ABSORÇÃO INDICADAS PELOS NÚMEROS 1 – 5.   | 123 |
| <b>FIGURA 40</b> – AMOSTRAS DOS ENSAIOS EM BATELADA: (A) AFLUENTE LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO 2 %, (B) EFLUENTE LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO 2 %, (C) AFLUENTE LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO 5 % E (D) EFLUENTE LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO 5 %.  | 124 |
| <b>FIGURA 41</b> – REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM FUNÇÃO DO TEMPO NOS ENSAIOS EM SISTEMAS CONTÍNUOS: ST NOS REATORES DE LODOS ATIVADOS (A) CONTROLE (LAC) E (B) ALIMENTADO COM LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO (LPT/ES) A 2 E 5 %; STV NOS REATORES DE LODOS ATIVADOS (C) CONTROLE E (D) ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES A 2 E 5 %.   | 127 |
| <b>FIGURA 42</b> – REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM FUNÇÃO DO TEMPO NOS ENSAIOS EM SISTEMAS CONTÍNUOS: SST (A) NO REATOR DE LODOS ATIVADOS CONTROLE E (C) NO REATOR DE LODOS ATIVADOS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES 2 %; SSV (B) NO REATOR DE LODOS ATIVADOS CONTROLE E (D) NO REATOR DE LODOS ATIVADOS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES 2 %.   | 128 |

|   |     |
|---|-----|
| <b>FIGURA 43</b> – REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM FUNÇÃO DO TEMPO NOS ENSAIOS EM SISTEMAS CONTÍNUOS: DQO TOTAL (A) NO REATOR DE LAC E (C) NOS REATORES LA-2 % E LA-5 %; DQO SOLÚVEL (C) NO REATOR LAC E (D) NOS REATORES LA-2 % E LA-5 %.....   | 131 |
| <b>FIGURA 44</b> – REMOÇÃO DE MATÉRIA ORGÂNICA EM FUNÇÃO DO TEMPO NOS ENSAIOS EM SISTEMAS CONTÍNUOS: DBO <sub>5,20</sub> NOS REATORES (A) LAC E (B) LA-2 % E LA-5 %; COD NOS REATORES (C) LAC E (D) LA-2 % E LA-5 %.....  | 132 |
| <b>FIGURA 45</b> – REMOÇÃO DE NITROGÊNIO EM FUNÇÃO DO TEMPO NOS ENSAIOS EM SISTEMAS CONTÍNUOS: NTK (A) NO REATOR LAC E (B) NOS REATORES LA-2 % E LA-5 %; NAT (C) NO REATOR LAC E (D) NOS REATORES LA-2 % E LA-5 %.....  | 134 |
| <b>FIGURA 46</b> – NAT REMOVIDO E NITRATO PRODUZIDO (A) NO REATOR LAC E (B) NOS REATORES LA-2% E LA-5%, E EFICIÊNCIA DE NITRIFICAÇÃO E REMOÇÃO DA ALCALINIDADE (C) NOS REATORES LA-2 % E LA-5% E (D) NO LAC. ....   | 135 |
| <b>FIGURA 47</b> – CONCENTRAÇÃO DE NH <sub>3</sub> NOS AFLUENTES DOS REATORES CONTROLE (LAC) E ALIMENTADOS COM LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO NAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE 2 % (LA-2 %) E 5 % (LA-5%).....  | 137 |
| <b>FIGURA 49</b> – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS NOS ENSAIOS COM REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA PILOTO: (A) SCORES E (B) LOADINGS. ....   | 140 |
| <b>FIGURA 49</b> – APLICAÇÃO DO MÉTODO “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (EQ.AH) NOS ENSAIOS COM OS REATORES PILOTO DE LODOS ATIVADOS: (A) COD “EQ.AH” PARA O ESGOTO SANITÁRIO, ANTES E APÓS A AERAÇÃO; (B) COD “EQ.AH” PARA A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO (LPT/ES) ANTES E APÓS A AERAÇÃO; (C) COD “EQ.AH” NA MISTURA LPT/ES DEVIDO À ADIÇÃO DE LPT, ANTES E APÓS A AERAÇÃO; (D) EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DO COD “EQ.AH”. .... | 142 |
| <b>FIGURA 50</b> – BOX-PLOT DA REMOÇÃO DO COD “EQ.AH” EM FUNÇÃO DAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE LIXIVIADO PRÉ-TRATADO, NOS ENSAIOS COM OS REATORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA PILOTO.....   | 143 |
| <b>FIGURA 51</b> - ESPECTROS DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER DAS AMOSTRAS DE AFLUENTE E EFLUENTE DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA PILOTO, CONTROLE (LAC) E ALIMENTADO COM A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO A 2 (LA-2 %) E 5 % (LA-5 %), COM TDH DE 24 H.....   | 144 |
| <b>FIGURA 52</b> - ESPECTROS DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER DAS AMOSTRAS DE LODO DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS (LA) EM ESCALA PILOTO OPERADOS COM TDH DE 24 H, E ALIMENTADOS COM LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO NAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE 2 (LA-2 %) E 5 % (LA-5 %). ....   | 146 |
| <b>FIGURA 53</b> - RELAÇÃO ENTRE AS MEDIDAS DE COD NOS EFLUENTES DOS REATORES PILOTO DE LODOS ATIVADOS E O COD NO TANQUE DE AERAÇÃO, ESTIMADO QUANTITATIVAMENTE COM TESTE DE COLORAÇÃO POR NANQUIM.....   | 147 |
| <b>FIGURA 54</b> – APLICAÇÃO DO TESTE DE COLORAÇÃO COM NANQUIM E QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NÃO ASSIMILADO EM AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DOS REATORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA PILOTO: (A-B) LAC CONTROLE E (C-D) MISTURA LPT/ES 2 %. ....  | 148 |
| <b>FIGURA 55</b> – MICROSCOPIA ÓTICA COMUM DAS AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DO REATOR LAC: (A) 1 - PROTOZOÁRIO RASTEJANTE SEMELHANTE À <i>ASPIDISCA</i> SP, COM AUMENTO DE 200X, 2 - PROTOZOÁRIO FIXO SEMELHANTE A <i>VORTICELLA</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X; (B) 3 - ROTÍFERO, COM AUMENTO DE 200 X; (C) 4 – OLIGOCHAETA SEMELHANTE <i>TUBIFEX</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X; (D) 5 – TARDÍGRADO, COM AUMENTO DE 200 X. ....              | 149 |
| <b>FIGURA 56</b> – MICROSCOPIA ÓTICA COMUM DAS AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DO REATOR DE LA-2 % ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES: (A) 1 - TARDÍGRADO, COM AUMENTO DE 200 X; (B) 2 - PROTOZOÁRIO CILIADO SEMELHANTE AO <i>PARAMECIUM</i> SP, COM AUMENTO DE 200X, 3 - TECAMEBA SEMELHANTE A <i>ARCELLA</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X; (C) 4 –   |     |

|   |     |
|---|-----|
| NEMATÓIDE E OVOS DE NEMATÓIDES, COM AUMENTO DE 200 X; (D) 5 – PROTOZOÁRIO RASTEJANTE, SEMELHANTE À <i>ASPIDISCA</i> SP, COM AUMENTO DE 200 X. ....  | 149 |
| <b>FIGURA 57</b> – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS EM FUNÇÃO DO TEMPO: (A) ST NO BAS-0 % E (B) ST NO BAS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES A 2 E 5 %; (C) STV NO BAS-0 % E (D) STV NO BAS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES A 2 E 5 % . ....  | 153 |
| <b>FIGURA 58</b> – VARIAÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS EM FUNÇÃO DO TEMPO: (A) SST NO BAS-0 % E (B) SSV NO BAS-0 %; (C) SST NO BAS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES A 2 E 5 % E (D) SSV NO BAS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES A 2 E 5 % . ....  | 154 |
| <b>FIGURA 59</b> – REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM FUNÇÃO DO TEMPO: DQO TOTAL (A) NO BAS CONTROLE E (B) NO BAS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES 2 %; DQO SOLÚVEL (C) NO BAS CONTROLE E (D) NO BAS ALIMENTADO COM A MISTURA LPT/ES 2 % . ....  | 156 |
| <b>FIGURA 60</b> – REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA EM FUNÇÃO DO TEMPO: DBO (A) NO BAS-0 % E (B) NO BIOFILTRO ALIMENTADO COM LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO A 2 E 5 %; COD (C) NO BAS- 0 % E (D) NO BIOFILTRO ALIMENTADO LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO A 2 E 5 % . ....   | 157 |
| <b>FIGURA 61</b> – VARIAÇÃO TEMPORAL DA CONCENTRAÇÃO DE NTK (A) NO BAS-0 % E (B) NO BAS-2 % E BAS-5 % , E DE NAT(C) NO BAS-0 % E (D) NO BAS-2 % E BAS-5 % . ....  | 159 |
| <b>FIGURA 62</b> – NAT REMOVIDO E NITRATO PRODUZIDO (A) NO BAS- 0 % E (B) NO BAS-2 % E BAS-5 % , E EFICIÊNCIA DE NITRIFICAÇÃO E REMOÇÃO DA ALCALINIDADE (C) NO BAS-2 % E BAS-5 % , E (D) NO BAS-0 % . ....  | 160 |
| <b>FIGURA 63</b> – CONCENTRAÇÃO DE NH <sub>3</sub> NOS AFLUENTES DOS REATORES BAS-0 % , BAS-2 % E BAS-5 % . ....  | 161 |
| <b>FIGURA 64</b> – ANÁLISE DE COMPONENTES PRINCIPAIS NOS ENSAIOS COM REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA PILOTO: (A) SCORES E (B) LOADINGS . ....  | 164 |
| <b>FIGURA 65</b> – APLICAÇÃO DO MÉTODO “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (EQ.AH) NOS ENSAIOS COM OS BIOFILTROS: (A) COD “EQ.AH” PARA O ESGOTO SANITÁRIO (BAS-0 %), ANTES E APÓS A AERAÇÃO; (B) COD “EQ.AH” PARA A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO (LPT/ES) ANTES E APÓS A AERAÇÃO; (C) COD “EQ.AH” NA MISTURA LPT/ES DEVIDO À ADIÇÃO DE LPT, ANTES E APÓS A AERAÇÃO; (D) EFICIÊNCIA DE REMOÇÃO DO COD “EQ.AH” . .... | 166 |
| <b>FIGURA 66</b> – <i>BOX-PLOT</i> DA REMOÇÃO DO COD “EQ.AH” EM FUNÇÃO DAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE LIXIVIADO PRÉ-TRATADO, NOS ENSAIOS COM O BIOFILTRO AERADO SUBMERSO. ....  | 167 |
| <b>FIGURA 67</b> - ESPECTROS DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER DAS AMOSTRAS DE AFLUENTE E EFLUENTE DOS BIOFILTROS CONTROLE (BAS-0%) E ALIMENTADO COM A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO NAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE 2 (BAS-2 %) E 5 % (BAS-5 %). ....   | 168 |
| <b>FIGURA 68</b> - ESPECTROS DE INFRAVERMELHO COM TRANSFORMADA DE FOURIER DAS AMOSTRAS DE LODO DOS BIOFILTROS CONTROLE (BAS-0%) E ALIMENTADO COM A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO NAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE 2 (BAS-2 %) E 5 % (BAS-5 %). ....  | 169 |
| <b>FIGURA 69</b> - RELAÇÃO ENTRE AS MEDIDAS DE COD NOS EFLUENTES DOS BIOFILTROS AERADOS SUBMERSOS E O COD ESTIMADO QUANTITATIVAMENTE COM TESTE DE COLORAÇÃO POR NANQUIM.....  | 170 |
| <b>FIGURA 70</b> – APLICAÇÃO DO TESTE DE COLORAÇÃO COM NANQUIM E QUANTIFICAÇÃO DO CARBONO NÃO ASSIMILADO EM AMOSTRAS DOS REATORES: (A-B) BAS-0 % , (C-D) BAS-2 % E (E-F) BAS-5 % . ....   | 171 |



|   |     |
|---|-----|
| <b>FIGURA 71</b> – MICROSCOPIA ÓTICA COMUM DO LODO DO BAS-2 %: (A) 1 - TARDÍGRADO, COM AUMENTO DE 100 x, 2 – ROTÍFERO, COM AUMENTO DE 100 x;(B) 3 - PROTOZOÁRIO CILIADO SEMELHANTE AO <i>PARAMECIUM</i> SP, COM AUMENTO DE 200 x; (c) 1 - TARDÍGRADO, COM AUMENTO DE 100 x, 2 – ROTÍFERO, COM AUMENTO DE 100 x.....                             | 172 |
| <b>FIGURA 72</b> – PERFIL DE DGGE PARA OS DOMÍNIOS (A) BACTERIA E (B) EUCARYA, NAS AMOSTRAS DOS REATORES PILOTOS DE LODOS ATIVADOS E BIOFILTRO AERADO SUBMERSO. ....  | 175 |
| <b>FIGURA 73</b> – OBSERVAÇÕES MICROSCÓPICAS DO INOCULO UTILIZADO NO SUBPROJETO 3: (1) AUMENTO DE 400x, PRESENÇA DE PROTOZOÁRIOS PEDUNCULADOS E (2) BACTÉRIAS FILAMENTOSOS; (3) AUMENTO DE 200x, PRESENÇA DE METAZOÁRIO SEMELHANTE A ROTÍFERO E (4) AUMENTO DE 200 x, PRESENÇA DE PROTOZOÁRIO RASTEJANTE SEMELHANTE À <i>ASPIDISCA</i> SP. .... | 180 |
| <b>FIGURA 74</b> - INÓCULO DO REATOR DE LODOS ATIVADOS DURANTE A FASE DE ADAPTAÇÃO COM LIXIVIADO BRUTO: (1) AUMENTO DE 200x, MICRORGANISMOS FILAMENTOSOS; (2) AUMENTO DE 100x, NEMATÓIDE E (3) ROTÍFEROS; (4) AUMENTO DE 200x, PROTOZOÁRIOS PEDUNCULADOS.....   | 181 |
| <b>FIGURA 75</b> - INÓCULO DO REATOR DE LODOS ATIVADOS DURANTE A FASE DE ADAPTAÇÃO COM LIXIVIADO PRETRATADO COM CAL: (1) AUMENTO DE 200x, MICRORGANISMO SEMELHANTE À <i>ARCELLA</i> ; (2) AUMENTO DE 100x, NEMATÓIDE; (3) AUMENTO DE 400x, PROTOZOÁRIOS PEDUNCULADOS; (4) AUMENTO DE 200x, ROTÍFERO. ....                                       | 181 |
| <b>FIGURA 76</b> – MICRORGANISMOS OBSERVADOS NAS AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DO REATOR DE LODOS ATIVADOS ALIMENTADO COM LIXIVIADO BRUTO, NO DECORER DOS 20 DIAS OPERAÇÃO: (1) AUMENTO DE 200x, NEMATÓIDE; (2) AUMENTO DE 100 x, FLOCO DISPERSO; (3) AUMENTO DE 800 x, PROTOZOÁRIOS PEDUNCULADOS.....  | 182 |
| <b>FIGURA 77</b> – MICRORGANISMOS OBSERVADOS NAS AMOSTRAS DO TANQUE DE AERAÇÃO DO REATOR DE LODOS ATIVADOS ALIMENTADO COM LIXIVIADO BRUTO, NO DECORER DOS 20 DIAS OPERAÇÃO: (1) AUMENTO DE 200x, NEMATÓIDE; (2) AUMENTO DE 100 x, FLOCO DISPERSO; (3) AUMENTO DE 800 x, PROTOZOÁRIOS PEDUNCULADOS.....  | 183 |

## LISTA DE TABELAS

|   |     |
|---|-----|
| <b>TABELA 1</b> - EXPERIMENTOS COM O REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA (ETAPA 1), UTILIZADO PARA AVALIAÇÃO DA TRATABILIDADE DA MISTURA LIXIVIADO/ESGOTO SANITÁRIO. ....   | 55  |
| <b>TABELA 2</b> - ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS E FREQUÊNCIA DE MONITORAMENTO DOS READORES (CONTINUA). ....  | 81  |
| <b>TABELA 3</b> – DESEMPENHO DAS TORRES DE “AIR STRIPPING” E DE ABSORÇÃO, UTILIZADAS PARA REMOÇÃO E RECOLHIMENTO DA AMÔNIA REMOVIDA DO LIXIVIADO PRÉ-TRATADO COM CAL (PH 11), APÓS 72 H DE AERAÇÃO. ....  | 90  |
| <b>TABELA 4</b> - EXEMPLOS DE APLICAÇÃO DO PROCESSO DE “AIR STRIPPING” PARA REMOÇÃO DA AMÔNIA DO LIXIVIADO DE ATERRO SANITÁRIO. ....  | 91  |
| <b>TABELA 5</b> – CONCENTRAÇÃO TOTAL DE METAIS NOS LIXIVIADOS BRUTO E ALCALINIZADO (PH 11), NA CAL UTILIZADA PARA AJUSTE DE PH E NO LODO DE CAL. ....   | 92  |
| <b>TABELA 6</b> - CARACTERIZAÇÃO FÍSICO-QUÍMICA DAS ÁGUAS RESIDUÁRIAS UTILIZADAS NESTA PESQUISA: LIXIVIADO BRUTO, LIXIVIADO ALCALINIZADO, LIXIVIADO PRÉ-TRATADO POR “AIR STRIPPING”, ESGOTO SANITÁRIO E EFLUENTE ANAERÓBIO. ....  | 93  |
| <b>TABELA 7</b> – PRINCIPAIS BANDAS DE ABSORÇÃO OBTIDAS PARA AS ÁGUAS RESIDUÁRIAS UTILIZADAS (BARBER ET AL., 2001; BU ET AL., 2010; MANTSH E CHAPMAN, 1996; SILVERSTEIN ET AL., 2005; STEVENSON ET AL., 1994). ....   | 96  |
| <b>TABELA 8</b> – APLICAÇÃO DO MÉTODO TENTATIVO “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (“Eq.A.H”) PARA OS ENSAIOS 1 E 2 COM O REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, OPERADO POR 20 DIAS. ....   | 108 |
| <b>TABELA 9</b> – APLICAÇÃO DO MÉTODO TENTATIVO “EQUIVALENTE EM ÁCIDO HÚMICO” (“Eq.A.H”) PARA OS ENSAIOS 3 E 4 COM O REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, OPERADO POR 20 DIAS. ....   | 109 |
| <b>TABELA 10</b> – CONVERSÃO DO NITROGÊNIO AMONÍACAL TOTAL (NAT) A NITRATO (NITRIFICAÇÃO) NOS QUATRO ENSAIOS REALIZADOS COM O REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, APÓS 20 DIAS DE OPERAÇÃO. ....   | 115 |
| <b>TABELA 11</b> - ÍNDICE VOLUMÉTRICO DO LODO (IVL), SÓLIDOS SEDIMENTÁVEIS (SD) E CONCENTRAÇÃO DE SÓLIDOS SUSPENSOS VOLÁTEIS NO TANQUE DE AERAÇÃO (SSVTA) DOS READORES DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA PILOTO, ALIMENTADOS CONTINUAMENTE COM ESGOTO SANITÁRIO (LAC) E LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO NAS PROPORÇÕES VOLUMÉTRICAS DE 2 % (LA-2 %) E 5 % (LA – 5 %). .... | 129 |
| <b>TABELA 12</b> – FREQUÊNCIA DA MICROFAUNA DOS READORES PILOTO DE LODOS ATIVADOS CONTROLE (LAC) E ALIMENTADO COM A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO A 2 % (LA-2 %) (ADAPTADO DE POVINELLI ET AL., 1989). ....  | 150 |
| <b>TABELA 13</b> – FREQUÊNCIA DA MICROFAUNA DOS READORES PILOTO DE LODOS ATIVADOS CONTROLE E ALIMENTADO COM LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO A 5 % (LA-5 %) (ADAPTADO DE POVINELLI ET AL., 1989). ....  | 151 |
| <b>TABELA 14</b> – FREQUÊNCIA DA MICROFAUNA NOS BIOFILTROS EM ESCALA PILOTO TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO (BAS-0 %) E A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO A 2 % (BAS-2 %) (ADAPTADO DE POVINELLI ET AL., 1989). ....   | 173 |
| <b>TABELA 15</b> – FREQUÊNCIA DA MICROFAUNA NOS BIOFILTROS EM ESCALA PILOTO TRATANDO ESGOTO SANITÁRIO (BAS-0 %) E A MISTURA LIXIVIADO PRÉ-TRATADO/ESGOTO SANITÁRIO A 5 % (BAS-5 %) (ADAPTADO DE POVINELLI ET AL., 1989). ....   | 174 |
| <b>TABELA 16</b> - REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO LIXIVIADO BRUTO, NO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, ALIMENTADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS. ....   | 178 |
| <b>TABELA 17</b> - REMOÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA DO LIXIVIADO PRÉ-TRATADO COM CAL, NO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, ALIMENTADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS. ....   | 179 |

|  |     |
|--|-----|
| TABELA 18 - REMOÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO DO LIXIVIADO BRUTO, NO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA, ALIMENTADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS. ....   | 179 |
| TABELA 19 - REMOÇÃO DA CONCENTRAÇÃO DE NITROGÊNIO DO LIXIVIADO PRÉ-TRATADO COM CAL, NO REATOR DE LODOS ATIVADOS EM ESCALA DE BANCADA ALIMENTADO EM REGIME DE BATELADA POR 20 DIAS. ....  | 179 |
| TABELA 20 – FREQUÊNCIA DE OBSERVAÇÃO DOS MICRORGANISMOS ENCONTRADOS NO LODO DO REATOR DE LA EM ESCALA DE BANCADA ALIMENTADO COM OS LIXIVIADOS BRUTO E ALCALINIZADO, NO DECORRER DOS 20 DIAS DE OPERAÇÃO (ADAPTADO DE POVINELLI ET AL., 1989). .... | 182 |

## SUMÁRIO

|  |           |
|--|-----------|
| <b>LISTA DE ABREVIATURAS</b> .....   | <b>16</b> |
| <b>LISTA DE SÍMBOLOS</b> .....   | <b>18</b> |
| <b>LISTA DE FIGURAS</b> .....  | <b>15</b> |
| <b>LISTA DE TABELAS</b> .....  | <b>15</b> |
| <b>1 INTRODUÇÃO</b> .....  | <b>26</b> |
| <b>2 OBJETIVOS</b> .....   | <b>29</b> |
| 2.1 OBJETIVOS DO TRATAMENTO CONSORCIADO .....  | 29        |
| 2.1.1 <i>Objetivo geral do tratamento consorciado</i> .....  | 29        |
| 2.1.2 <i>Objetivos específicos do tratamento consorciado</i> .....   | 29        |
| 2.2 OBJETIVOS DO TRATAMENTO AERÓBIO DOS LIXIVIADOS BRUTO E PRÉ-TRATADO COM CAL.....  | 30        |
| 2.2.1 <i>Objetivo geral do tratamento aeróbio dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal</i> ...                                   | 30        |
| 2.2.2 <i>Objetivos específicos do tratamento aeróbio dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal</i>                                | 30        |
| <b>3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....   | <b>31</b> |
| 3.1 A DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS NOS ATERROS SANITÁRIOS.....   | 31        |
| 3.2 O LIXIVIADO DE ATERROS SANITÁRIOS: FORMAÇÃO E PRINCIPAIS COMPONENTES   | 33        |
| 3.2.1 <i>Substâncias húmicas</i> .....   | 36        |
| 3.3 PROPOSTAS DE TRATAMENTO DO LIXIVIADO DE ATERROS SANITÁRIOS .....   | 38        |
| 3.3.1 <i>Processos físico-químicos, processos oxidativos avançados (POA) e membranas filtrantes</i>                                | 38        |
| 3.3.2 <i>Processos biológicos baseados em reatores aeróbios e seus desempenhos no tratamento do lixiviado</i> .....                | 40        |
| 3.3.3 <i>Tratamento consorciado do lixiviado de aterros sanitários com esgoto sanitário</i> ...                                    | 46        |
| <b>4 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....  | <b>53</b> |
| 4.1 ETAPAS EXPERIMENTAIS DO PROJETO DE PESQUISA .....  | 53        |
| 4.1.1 <i>Etapas experimentais do tratamento biológico aeróbio consorciado do lixiviado com esgoto sanitário</i>                    | 53        |
| 4.1.2 <i>Etapas experimentais do estudo de tratabilidade dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal em sistemas aeróbios</i> ..... | 67        |
| 4.2 ÁGUAS RESIDUÁRIAS.....   | 67        |
| 4.2.1 <i>O lixiviado</i> .....   | 67        |
| 4.2.2 <i>Esgoto sanitário bruto e efluente anaeróbio</i> .....   | 69        |
| 4.2.3 <i>Mistura lixiviado/esgoto sanitário e lixiviado/efluente anaeróbio</i> .....   | 69        |

|   |            |
|---|------------|
| 4.3 UNIDADES EXPERIMENTAIS DE TRATAMENTO DOS LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS.....                      | 69         |
| 4.3.1 Torre recheada aerada .....   | 70         |
| 4.3.2 Reator anaeróbio compartimentado .....  | 74         |
| 4.3.3 Reator de lodos ativados de bancada .....   | 76         |
| 4.3.4 reatores de lodos ativados em escala piloto .....   | 77         |
| 4.3.5 Biofiltro aerado submerso (BAS) .....   | 79         |
| 4.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS, ESPECTROSCÓPICAS E EXAMES MICROBIOLÓGICOS                                 | 81         |
| 4.4.1 Aplicação do método tentativo “equivalente em ácido húmico” (Eq.AH) .....                         | 82         |
| 4.4.2 Análise espectroscópica: infravermelho com transformada de Fourier.....                           | 82         |
| 4.4.3 Método proposto para quantificação do carbono no teste de coloração com nanquim                   | 83         |
| 4.4.4 Análise molecular: extração de DNA e amplificação por reação de polimerização em                  |            |
| cadeia (PCR) .....  | 83         |
| 4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....  | 85         |
| <b>5 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....</b>  | <b>87</b>  |
| 5.1 TRATAMENTO CONSORCIADO DO LIXIVIADO COM ESGOTO SANITÁRIO EM SISTEMAS AERÓBIOS.....                  | 87         |
| 5.1.1 Pré-tratamento do lixiviado de aterro sanitário por “air stripping” e absorção.....               | 87         |
| 5.1.2 Caracterização físico-química, espectroscópica e microscópica das águas residuárias               |            |
| 5.1.3 Desempenho do reator de lodos ativados em escala de bancada no tratamento                         |            |
| consorciado do lixiviado.....   | 98         |
| 5.1.4 Desempenho do reator de lodos ativados em escala piloto no tratamento da mistura                  |            |
| lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário.....   | 125        |
| 5.1.5 Desempenho do biofiltro aerado submerso em escala piloto no tratamento da mistura                 |            |
| lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário.....   | 152        |
| 5.1.6 PCR-DGGE.....   | 175        |
| 5.1.7 Considerações sobre o tratamento consorciado .....  | 177        |
| 5.2 TRATAMENTO AERÓBIO DOS LIXIVIADOS BRUTO E PRÉ-TRATADO COM CAL.....                                  | 178        |
| 5.2.1 Remoção da matéria orgânica e nitrogênio.....   | 178        |
| 5.2.2 Exames microscópicos .....  | 180        |
| <b>6 CONCLUSÕES.....</b>  | <b>184</b> |
| 6.1 CONCLUSÕES DO TRATAMENTO CONSORCIADO DOS LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS COM ESGOTO SANITÁRIO..... | 184        |
| 6.2 CONCLUSÕES DO TRATAMENTO AERÓBIO DOS LIXIVIADOS BRUTO E PRÉ-TRATADO COM CAL .....                   | 186        |
| <b>7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....</b>  | <b>187</b> |

|                  |        |
|------------------|--------|
| REFERÊNCIAS..... | 189    |
| ANEXO A.....     | CXCIX  |
| ANEXO B.....     | CCXXXV |
| ANEXO C .....    | CCXLIV |

## 1 INTRODUÇÃO

Há uma tendência por parte da Comunidade Europeia e dos EUA de reduzir as taxas de disposição final dos resíduos sólidos em aterros sanitários. Estatísticas recentes mostraram que entre 2001 e 2011, 19 % dos resíduos sólidos urbanos (RSU) produzidos nos países da União Europeia deixaram de ser dispostos em aterros sanitários, recebendo outros tratamentos. Em 2011, 37 % dos RSU produzidos nesses países foram dispostos em aterros sanitários, sendo de 35 % a meta para 2016. Ainda em 2011, a adoção de técnicas como reciclagem, compostagem e incineração aumentou, respectivamente, para 8, 5 e 6 % (European Commission, 2013).

Todavia, os aterros sanitários mantêm-se como alternativa mais utilizada no mundo e de baixo custo para disposição final de resíduos. Em 2012, 38 % dos resíduos sólidos urbanos de países desenvolvidos foram depositados em aterros sanitários, ao passo que nos países em desenvolvimento essa porcentagem foi ainda maior, 59 %. Os custos operacionais dos aterros sanitários podem ser até 60 % menores do que os de tecnologias como incineração, o que explica o fato de serem a alternativa de gerenciamento de resíduos sólidos mais adotada nos países em desenvolvimento (Banco Mundial, 2012).

No Brasil, embora as grandes cidades já encontrem dificuldades na obtenção de áreas para disposição de seus resíduos, os aterros sanitários continuarão sendo a solução adotada, principalmente depois de instituída a Política Nacional de Resíduos Sólidos – PNRS - (Lei 12.305/10, regulamentada pelo Decreto 7.404/10). Inclusive, visando a implementação bem sucedida da PNRS, foi elaborado em 2012 o Plano Nacional de Resíduos Sólidos, com objetivo de identificar problemas associados à geração de resíduos e oferecer metas e soluções adequadas a seu gerenciamento no âmbito da PNRS (Ministério do Meio Ambiente, 2012).

Se no caso dos aterros as fases sólida e gasosa já vêm sendo dominadas, o grande problema ambiental reside na fase líquida: o lixiviado, água residuária de caráter poluidor e que deve ser tratada antes de lançada nos recursos hídricos.

Em função da demanda pelo tratamento do lixiviado, constantemente gerado nos aterros sanitários, várias cidades brasileiras que dispõem de Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) têm lançado o lixiviado na rede coletora de esgoto sanitário, visando o tratamento consorciado dessas águas residuárias. Em contrapartida, os aterros sanitários recebem o lodo gerado nas ETE. Dentre as cidades da região Sudeste que se utilizam desse consórcio, têm-se Niterói-RJ (Santos, 2010) e aquelas da Região Metropolitana de São Paulo-SP (informação pessoal)<sup>1</sup>. No entanto, ainda é escasso o número de publicações sobre esse tema e, portanto, não há um consenso sobre as condições nas quais o lixiviado poderia ser lançado nas ETE sem que houvesse comprometimento (a curto ou longo prazo) de seu funcionamento.

Este trabalho consiste em um amplo estudo sobre o tratamento consorciado dos lixiviados de aterros sanitários em sistemas aeróbios, apresentando ensaios tanto com reatores de lodos ativados em escala de bancada operados em batelada, quanto com reatores de lodos ativados e biofiltro aerado submerso em escala piloto e alimentados continuamente.

Por facilidade, este trabalho se divide em duas partes: o tratamento consorciado, que recebeu maior ênfase; e o tratamento aeróbio dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal.

Um importante questionamento, ainda não esclarecido na literatura, é levantado nesta Tese: o lixiviado é efetivamente tratado com esgoto sanitário nos reatores aeróbios ou apenas diluído (permanecendo no efluente tratado a matéria orgânica de difícil degradação) ?

---

<sup>1</sup> SABESP. Mensagem eletrônica recebida em 6 set. 2013.



Espera-se que os resultados apresentados nesta Tese, respondendo o questionamento levantado, possam contribuir com a literatura dedicada ao tratamento consorciado dos lixiviados de aterros sanitários com esgoto sanitário.

## **2 OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVOS DO TRATAMENTO CONSORCIADO**

#### ***2.1.1 Objetivo geral do tratamento consorciado***

Avaliar, em sistemas aeróbios, a remoção da matéria orgânica e nitrogênio da mistura lixiviado/esgoto sanitário, com proporções volumétricas de lixiviado de 0, 0,2, 2 e 5 %.

#### ***2.1.2 Objetivos específicos do tratamento consorciado***

- a) Verificar o desempenho de reatores de lodos ativados em escala de bancada (operados em batelada) no tratamento das misturas: lixiviado bruto/esgoto sanitário, lixiviado pré-tratado por “air stripping”/esgoto sanitário, lixiviado bruto/efluente anaeróbio e lixiviado pré-tratado por “air stripping”/efluente anaeróbio, para as proporções volumétricas de lixiviado de 0, 0,2, 2 e 5 %;
- b) verificar as melhores condições operacionais dos ensaios de bancada em reatores pilotos de lodos ativados e biofiltro aerado submerso, operados em regime contínuo;
- c) verificar a tratabilidade da mistura lixiviado/esgoto sanitário com a aplicação de um método tentativo proposto nesta Tese e denominado “Equivalente em ácido húmico”;
- d) verificar se a concentração de metais pesados no efluente tratado atende a Resolução 380/06 do CONAMA (Ministério do Meio Ambiente, 2006).

## **2.2 OBJETIVOS DO TRATAMENTO AERÓBIO DOS LIXIVIADOS BRUTO E PRÉ-TRATADO COM CAL**

### ***2.2.1 Objetivo geral do tratamento aeróbio dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal***

Avaliar a tratabilidade dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal em reator de lodos ativados.

### ***2.2.2 Objetivos específicos do tratamento aeróbio dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal***

- a) Verificar o desempenho de reatores de lodos ativados em escala de bancada (operados em batelada) na remoção da matéria orgânica e nitrogênio dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal;
- b) caso seja viável a tratabilidade dos lixiviados no reator em escala de bancada, realizar os ensaios em reatores pilotos de lodos ativados e biofiltro aerado submerso, operados em regime contínuo.

### **3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

#### **3.1 A DISPOSIÇÃO FINAL DE RESÍDUOS SÓLIDOS NOS ATERROS SANITÁRIOS**

De acordo com a NBR 8419/1992, os aterros sanitários são definidos como “técnica de disposição de resíduos sólidos urbanos no solo, sem causar danos à saúde pública e à sua segurança, minimizando os impactos ambientais, método este que utiliza princípios de engenharia para confinar os resíduos sólidos à menor área possível e reduzi-los ao menor volume permissível, cobrindo-os com uma camada de terra na conclusão de cada jornada de trabalho, ou a intervalos menores, se for necessário” (ABNT, 1992).

A construção e modo de operação dos aterros sanitários estão intrinsecamente relacionados às características dos municípios, bem como os recursos disponíveis para instalação dessas unidades. No entanto, em termos gerais, o aterro sanitário consiste em células cuja função é o armazenamento e acondicionamento dos resíduos nelas depositados (Bidone e Povinelli, 2010).

Essas células podem ser tanto sobrepostas quanto construídas separadas umas das outras, mas em ambos os casos devem ser impermeabilizadas em sua base com o uso de materiais naturais ou sintéticos. A impermeabilização se faz necessária a fim de oferecer resistência à infiltração de líquidos através das células (ABNT, 1992; Bidone e Povinelli, 2010; Qasim e Chiang, 1994).

Os resíduos descarregados nessas células devem ser distribuídos em seu interior e compactados, de modo que haja redução do volume acondicionado. Uma vez atingida a capacidade de armazenamento das células, elas devem ser cobertas com uma camada de terra, evitando-se a propagação de moscas, ratos, baratas, dentre outros (Qasim e Chiang,

1994).

O lodo gerado em estações de tratamento de esgoto (ETE) é apontado como exemplo de material que poderia ser usado como cobertura das células de aterros sanitários (HA et al., 2006). Para tanto, o material precisa obrigatoriamente ser desidratado e estabilizado, caso contrário, o líquido que constitui o lodo percolaria as células dos aterros, contribuindo com a produção de lixiviado.

Os aterros sanitários dispõem de critérios de engenharia e normas específicas de operação visando a segurança no armazenamento dos resíduos. De acordo com a NBR 8419/1992, tais critérios referem-se aos sistemas de drenagem superficial, drenagem e tratamento do lixiviado, drenagem de gás e impermeabilização inferior e/ou inferior do aterro (ABNT, 1992).

Atingida a capacidade máxima de armazenamento do aterro sanitário, a unidade é fechada para novas disposições de resíduos e deve ser conduzido constante monitoramento ambiental e controle de vetores, conforme determina a NBR 8419/1992 (ABNT, 1992).

Nesse monitoramento são avaliados os sistemas de drenagem, emissão de gases e líquidos, bem como o tratamento destes (Qasim e Chiang, 1994). No caso do Estado de São Paulo, o Decreto estadual nº 32.955/91 determina no Art. 17, § 1º que em áreas onde há depósito de resíduos sólidos deve ser realizado o monitoramento de águas subterrâneas, em conformidade com exigências da Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – CETESB – (Secretaria do Meio Ambiente do Estado de São Paulo, 1991).

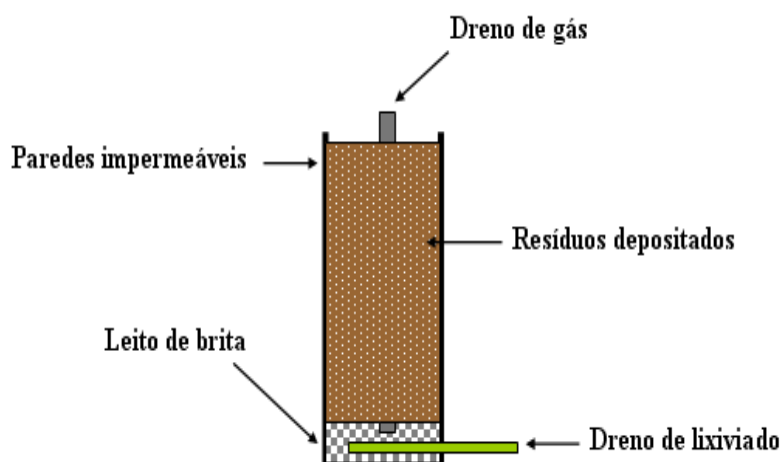
De acordo com a NBR 8419/1992, uma vez encerradas as atividades no aterro sanitário, “deve ser apresentado um plano de uso futuro da área do aterro sanitário” (ABNT, 1992).

### 3.2 O LIXIVIADO DE ATERROS SANITÁRIOS: FORMAÇÃO E PRINCIPAIS COMPONENTES

Antes que seja fornecida a definição de lixiviado, devem ser esclarecidos os processos microbiológicos que ocorrem nas células dos aterros sanitários, bem como o funcionamento dessas unidades.

O modelo didático simplificado de um aterro sanitário desenvolvido por Souto (2009) é mostrado na Figura 1. O autor sugere que o aterro seja visualizado como um reator biológico de grandes dimensões. Suas paredes impermeabilizadas e há sistemas de drenagem dos líquidos que possam percolar seu interior.

Nas células dos aterros sanitários ocorre o processo de decomposição da fração orgânica dos resíduos depositados. Uma vez que a massa dos resíduos contém ar, a degradação inicial dá-se por microrganismos aeróbios e, conforme se torna escassa a presença de oxigênio ao longo do tempo, há transição da fase aeróbia para anaeróbia de decomposição da matéria orgânica.



**Figura 1** - Modelo didático simplificado de um aterro sanitário (adaptado de Souto, 2009).

Durante a fase anaeróbia ácida, a matéria orgânica é convertida ao nitrogênio amoniacal total (soma de  $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$ ) e ácidos voláteis de cadeia longa (responsáveis pelos baixos valores de pH). Esses ácidos são convertidos aos ácidos de cadeia curta, principalmente o acetato. Na fase metanogênica, acetato e hidrogênio servem de substrato às arqueas, havendo aumento do pH, produção de metano ( $\text{CH}_4$ ) e dióxido de carbono ( $\text{CO}_2$ ).

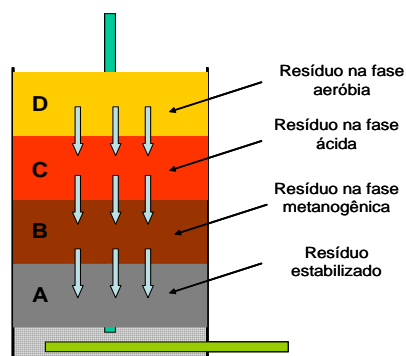
Na fase de maturação, a atividade dos microrganismos é reduzida devido à escassez de nutrientes. A concentração inicial da matéria orgânica biodegradável também é reduzida e a matéria remanescente é refratária (Bidone e Povinelli, 2010).

Devido à ação dos microrganismos decompositores e à umidade intrínseca dos resíduos acondicionados nos aterros sanitários é gerado o chorume, resíduo líquido de coloração escura e forte odor (Bidone e Povinelli, 2010).

Adotando-se a concepção de Souto (2009), de que o aterro sanitário seria um reator com topo aberto à atmosfera (Figura 1), nos períodos de chuva mais intensa, apesar do sistema de drenagem de águas pluviais, o aterro fica sujeito à infiltração em suas células. Conforme a saturação da massa dos resíduos é atingida, essas águas podem misturar-se com o chorume, gerando o lixiviado (Bidone e Povinelli, 2010).

De acordo com o modelo didático de Souto (2009) mostrado na Figura 2, nos aterros operados com células sobrepostas o lixiviado que se desloca da célula D para a célula C tem caráter ácido, porque nessa célula há predominância de ácidos voláteis (devido ao estágio inicial de decomposição da matéria orgânica). Ao atingir a célula B, o lixiviado apresenta caráter básico, em decorrência do metabolismo das arqueas metanogênicas. Ao percolar para a célula A, o lixiviado é retirado do aterro pelo sistema de drenagem de fundo. Portanto, as características do lixiviado drenado do aterro sanitário são devidas ao estágio de decomposição da massa de resíduos nas últimas camadas dessa estrutura. Todavia, ressalta-se que esse modelo tem caráter didático, não significando que em condições reais de operação

as células do aterro se apresentarão exatamente como mostrado na Figura 2.



**Figura 2** - Etapas da digestão anaeróbia nas células do aterro sanitário (Souto, 2009).

O líquido apresenta elevado potencial poluidor e sua composição varia de acordo com as fases da digestão anaeróbia e idade do aterro, além dos tipos de resíduos que nele são depositados (Renou et al., 2008).

Salienta-se que os termos líquido “novo” e “velho”, não estão relacionados às idades dos aterros sanitários, mas às características do líquido. O líquido é denominado “novo” quando apresenta baixos valores de pH, alto teor de matéria orgânica biodegradável e metais na forma solúvel. O líquido é “velho” apresenta pH maior que 7 e a matéria orgânica remanescente é predominantemente refratária, a exemplo das substâncias húmicas (Amaral et al., 2009; Bidone e Povinelli, 2010; Renou et al., 2008; Souto, 2009). As substâncias húmicas são associadas à coloração escura e DQO dos líquidos “velhos” (Moravia et al., 2013; Renou et al., 2009) e serão discutidas no subitem 3.2.1.

Kjeldsen et al. (2002) relatam que, passados 30 anos, a concentração dos metais no líquido “velho” é inferior a 0,02 % da concentração inicial de metais depositados nos aterros sanitários.



Encontrada em elevada concentração ( $> 800 \text{ mg L}^{-1}$ ) tanto no lixiviado “novo” quanto no “velho”, a amônia é a substância que mais contribui com caráter poluente dessa água residuária, justificando a necessidade de tratamento prévio antes do lançamento do lixiviado nos recursos hídricos (Bidone e Povinelli, 2010; Renou et al., 2008).

### **3.2.1 Substâncias húmicas**

As substâncias húmicas são originadas da decomposição de vegetais e atividade de microrganismos (metabolismo/catabolismo) presentes nos sedimentos, solo e água. A maior dificuldade em definir a estrutura e reatividade das substâncias húmicas se deve à sua grande heterogeneidade química e variabilidade geográfica (Piccolo, 2001; Stevenson, 1994).

De acordo com Piccolo (2001), inicialmente as substâncias húmicas foram classificadas em função sua solubilidade, sendo as principais frações os ácidos húmico e fúlvico e a humina. Quanto à solubilidade, os ácidos húmicos precipitam em meio ácido, enquanto os ácidos fúlvicos são solúveis em meio ácido ou básico, ao passo que a humina é a fração insolúvel, independente do pH do meio (Nuzzo et al., 2013).

Até a primeira metade do século XX, a composição das substâncias húmicas era avaliada apenas por análise elementar e determinação da acidez de grupos funcionais, o que sugeria similaridade entre os ácidos húmico e fúlvico. Em 1961, cientistas russos introduziram o conceito de que as substâncias húmicas seriam polímeros, hipótese ainda aceita apesar das incertezas a ela associadas. Sua formulação originou-se de estudos em laboratório, que indicaram ser possível a condensação em material húmico de moléculas simples como aminoácidos e componentes da lignina, por exemplo. Assim, assumiu-se que as

substâncias húmicas teriam estrutura polimérica semelhante à da lignina, apresentando propriedades coloidais. A crítica feita a esses experimentos é que eles se basearam em aplicações incorretas de procedimentos analíticos e modelos matemáticos válidos apenas a biopolímeros puros e isolados (Piccolo, 2001).

Outra hipótese, sustentada por evidências mais contundentes, sugere que as substâncias húmicas consistem de agregados supramoleculares e heterogêneos, ligados por fracas interações dispersivas (como as forças de van der Waals), e originados da decomposição de material biológico (Pédrot et al., 2010; Piccolo, 2001). Em função do pH do meio, a conformação das substâncias húmicas pode adquirir maior estabilidade por complexação com metais como ferro, atenuando os impactos dos metais como poluentes ambientais (Nuzzo et al., 2013).

Estudos baseados em análises espectroscópicas de infravermelho por transformada de Fourier mostraram que na estrutura dos ácidos húmico e fúlvico constam hidroxilas e ligações duplas de carbono em anéis aromáticos. De modo geral, os ácidos fúlvicos apresentam maior teor de grupos funcionais contendo oxigênio (carboxíla, hidroxila e grupamentos fenólicos) do que os ácidos húmicos (Nuzzo et al., 2013). Por conter mais grupos polares com heteroátomos como oxigênio e enxofre, os ácidos fúlvicos apresentam caráter hidrofílico, enquanto os ácidos húmicos apresentam caráter hidrofóbico (Imai et al., 1993).

Grande parte da fração refratária da matéria orgânica do lixiviado de aterros sanitários é constituída pelas substâncias húmicas (Kang et al., 2002; Moravia et al., 2013.; Renou et al., 2009).

Segundo Bu et al.(2010), o ácido húmico correspondeu a 45 % do carbono orgânico dissolvido (COD) em amostra de lixiviado, sendo 22 % a fração de ácido fúlvico. Predominaram sobre os hidrocarbonetos e polissacarídeos as substâncias húmicas e ácidos carboxílicos, reforçando o caráter refratário do lixiviado.

Kang et al. (2002) realizaram estudo sobre a caracterização das substâncias húmicas extraídas dos lixiviados de aterros sanitários da Coreia do Sul, com diferentes idades: menos de 5 anos, 5 a 10 anos e acima de 10 anos. Observou-se aumento no peso molecular das substâncias húmicas dos lixiviados com o aumento da idade dos aterros sanitários. O ácido húmico comercial Sigma-Aldrich foi utilizado como referência no estudo e, em comparação a ele, as substâncias húmicas dos lixiviados apresentaram menor grau de humificação, predominando as frações de menor peso molecular.

### **3.3 PROPOSTAS DE TRATAMENTO DO LIXIVIADO DE ATERROS SANITÁRIOS**

A escolha dos processos mais adequados ao tratamento do lixiviado depende das características dessa água residuária (Amaral et al., 2009) e em função da legislação ambiental local, é possível que não seja adotada uma única tecnologia, mas combinações que permitam produzir lixiviado tratado com qualidade compatível com padrões de lançamento. Apresentam-se nessa seção os processos mais utilizados para tratamento do lixiviado.

#### ***3.3.1 Processos físico-químicos, processos oxidativos avançados (POA) e membranas filtrantes***

Processos físico-químicos como coagulação-floculação se mostraram inviáveis devido às altas concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT) encontradas no lixiviado,

que resultam em elevada força iônica e dificultam a ação dos agentes de coagulantes (Souto, 2009).

Marañón et al. (2010) aplicaram cloreto férrico (1,7g/L e pH 5,3) ao lixiviado velho (DBO/DQO = 0,13) e obtiveram 73 % de remoção da DQO por coagulação-floculação. O volume de lodo gerado foi expressivo, 35 % do volume tratado de lixiviado, e a concentração de nitrogênio amoniacal total (NAT) manteve-se alta, cerca de 3000 mg L<sup>-1</sup>.

A remoção do NAT pelo processo de “air stripping” foi bem sucedida, com eficiências em torno de 100 % e em curto prazo de aeração. Quando se alcalinizou o lixiviado a pH 11, observou-se aceleração na remoção do NAT, acompanhada da remoção de cor. No entanto, a desvantagem desse procedimento é a geração de lodo em função da quantidade de hidróxido de cálcio utilizada para elevação do pH do lixiviado (Ferraz et al., 2013; Nurisepehr et al., 2012; Souto, 2009).

Do ponto de vista ambiental, é questionável a transferência da amônia da fase líquida para gasosa. Uma alternativa tecnicamente viável para essa questão é recuperação da amônia removida pelo processo de “air stripping” por meio do processo de absorção (Ferraz et al., 2013).

Em ensaios com torres de “air stripping” e de absorção para tratamento do lixiviado, Ferraz et al. (2013) recuperaram nas formas de sulfato de amônio e aquamônia, respectivamente, 80 e 87 % do NAT neutralizado por solução 0,4 mol H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub> L<sup>-1</sup> e água.

Quando foram empregados os Processos Oxidativos Avançados (POA), com aplicação de radiação ultravioleta (UV), ozônio (O<sub>3</sub>) e peróxido de hidrogênio (H<sub>2</sub>O<sub>2</sub>), verificou-se um alto consumo dos oxidantes na reação com o cloreto presente no lixiviado. De acordo com Pasqualini (2010), essa interferência foi associada à baixa eficiência dos POA na remoção de matéria orgânica. Na ozonização do lixiviado pré-tratado por “air stripping”, a máxima remoção de DQO obtida pela autora foi de 44 % para dose de 6 gO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>.

Moravia et al. (2013) estudaram o tratamento do lixiviado velho do aterro sanitário Central de Tratamento de Resíduos Sólidos de Belo Horizonte-MG por POA (Fenton)/membranas filtrantes. O lixiviado apresentou baixíssima razão DBO/DQO (0,03) e elevada concentração de NAT (1100 mg L<sup>-1</sup>). Utilizando 1,7 gH<sub>2</sub>O<sub>2</sub>/gDQO e FeSO<sub>4</sub>.7H<sub>2</sub>O e H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> na proporção de 1:5, as remoções de DQO e cor por Fenton foram de, respectivamente, 63 e 76 %. Todavia, houve geração de lodo, aumentando em duas vezes a concentração de sólidos totais. O efluente do POA foi submetido à microfiltração e nanofiltração, que permitiram a remoção praticamente completa da DQO, cor e sólidos totais. Apesar da remoção de 93 % do NAT, no efluente tratado a concentração de NAT (78 mg L<sup>-1</sup>) excedeu o padrão de lançamento estabelecido pela Resolução CONAMA 430/11.

### ***3.3.2 Processos biológicos baseados em reatores aeróbios e seus desempenhos no tratamento do lixiviado***

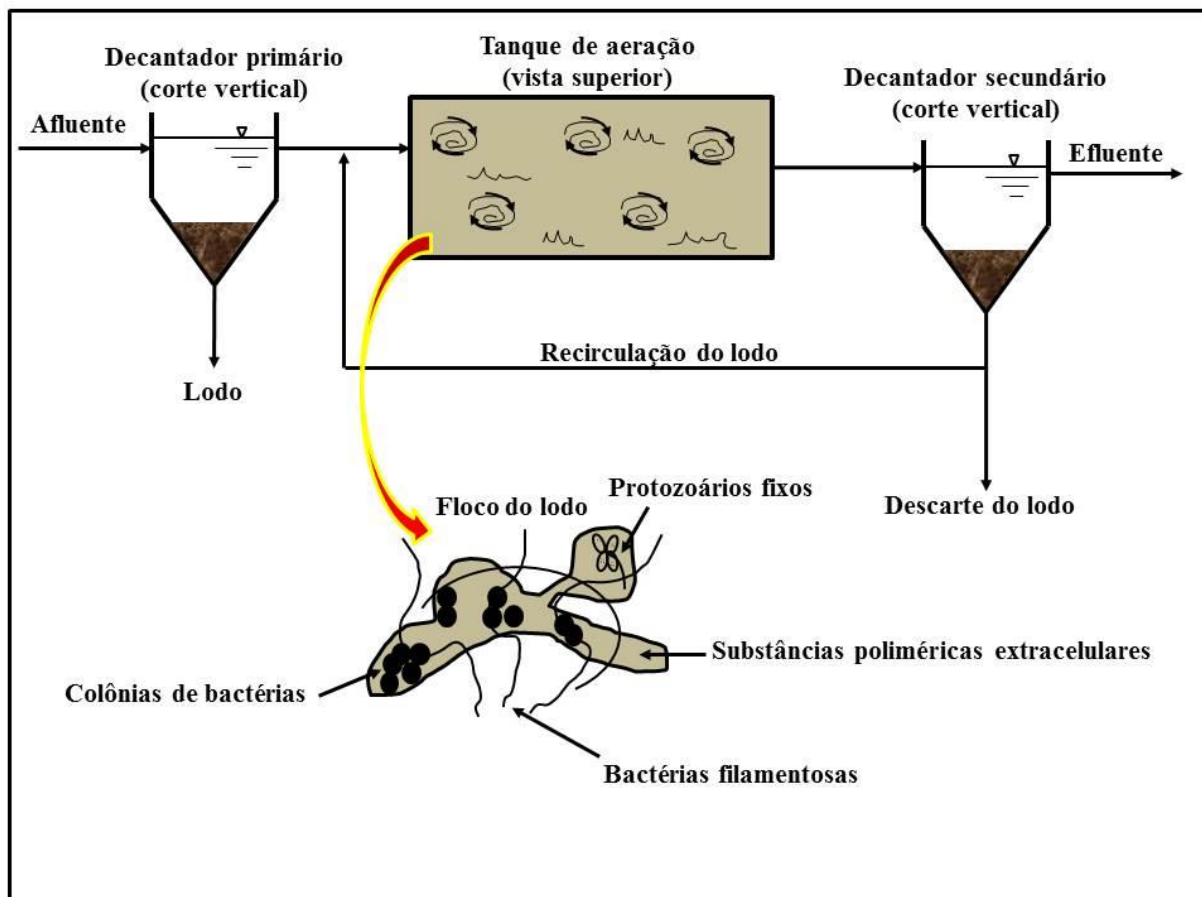
Os reatores de maior interesse a este trabalho são lodos ativados e biofiltro aerado submerso, por esse motivo a revisão bibliográfica apresentada dará ênfase a esses dois sistemas aeróbios.

### 3.3.2.1 *Reatores de lodos ativados e biofiltro aerado submerso*

Os reatores de lodos ativados são amplamente utilizados nas ETE do Brasil e do exterior como unidades secundárias de tratamento. De acordo com Metcalf e Eddy (2003), o processo de lodos ativados inclui os seguintes componentes básicos: um tanque de aeração no qual a biomassa é mantida em suspensão pela injeção de ar, decantadores primário e secundário para separação sólido-líquido e um sistema de recirculação para retorno da biomassa ao tanque de aeração (Figura 3).

Na Figura 3 também é mostrada a representação do floco de lodos ativados, que consiste em aglomerados de colônias de bactérias e protozoários em meio ao material particulado orgânico e inorgânico e substâncias extracelulares poliméricas, compostas por proteínas e carboidratos (Jenkins et al., 2003). A formação dos flocos ocorre pela capacidade dos microrganismos aderirem uns aos outros, o que seria viabilizado pelas substâncias extracelulares poliméricas. As bactérias filamentosas, por sua vez, são responsáveis pela forma e sustentação do floco ao constituírem uma “rede”, como mostrado na Figura 3.

Quanto à operação, os reatores de lodos ativados podem ser alimentados tanto em batelada quanto continuamente. O regime de batelada obedece a sequência: alimentação do reator, tempo de reação sob aeração, interrupção da aeração para sedimentação dos sólidos em suspensão e esvaziamento do reator pela retirada do efluente tratado. A operação em regime contínuo de alimentação se dá de acordo com o esquema da Figura 3 (Metcalf e Eddy, 2003). Neste trabalho, os ensaios foram conduzidos tanto com reatores em escala de bancada operados em regime de batelada quanto em reatores piloto alimentados continuamente.



**Figura 3** - Esquema do processo de lodos ativados (mistura completa) e representação do floco no tanque de aerção. Fonte: Metcalf e Eddy (2003) e Keiding and Nielsen (1997) adaptados pela Autora.

Ao contrário dos reatores de lodos ativados, o biofiltro aerado submerso é caracterizado pelo desenvolvimento de biomassa aderida no material utilizado como recheio desse reator (Metcalf e Eddy, 2003). A maior capacidade de retenção de sólidos em suspensão, dispensando decantador secundário, é uma das principais vantagens dos processos por biomassa aderida em relação aos lodos ativados. Por ser compacto, a instalação de um biofiltro pode se dar com 1/5 a 1/3 da área que seria necessária à instalação de um reator de lodos ativados. Além disso, o biofiltro suporta maior carga orgânica do que reatores de lodos ativados e em uma única unidade é possível remover matéria orgânica e nitrogênio (Farabegoli et al., 2009; Metcalf e Eddy, 2003; Morgan-Sagastume and Noyola, 2008).

### 3.3.2.2 Tratamento do lixiviado por processos biológicos aeróbios

A aplicação dos processos biológicos não apresentou resultados satisfatórios para remoção de matéria orgânica e nutriente, sobretudo para o lixiviado velho (Renou et al., 2008; Wiszniowski et al., 2007).

De acordo com as pesquisas publicadas, as baixas eficiências decorreram do baixo teor de matéria orgânica facilmente biodegradável (Wiszniowski et al., 2007) e elevada concentração de amônia (1000 - 1600 mg L<sup>-1</sup>), substância potencialmente tóxica aos microrganismos (Gabarró et al., 2012; Renou et al., 2008; Xu et al., 2010; Yusof et al., 2010).

Vadivelu et al. (2007) demonstraram que o crescimento das bactérias oxidadoras de nitrito foi totalmente inibido quando a concentração de amônia livre (NH<sub>3</sub>) e ácido nitroso atingiram valores de, respectivamente 6 mg L<sup>-1</sup> e 0,2 mg L<sup>-1</sup>. As bactérias oxidadoras de amônia parecem apresentar maior resistência à amônia livre e ao ácido nitroso do que as bactérias oxidadoras de nitrito. A oxidação da amônia em sistema de lodos ativados não sofreu interferência da amônia livre e ácido nitroso na concentração de, respectivamente, 16 mg L<sup>-1</sup> e 0,4 mg L<sup>-1</sup>.

De acordo com Anthonisen et al. (1976), a concentração de amônia livre é calculada pelas Equações 1 e 2:

$$NH_3 = 17/14 * \left( \frac{TAN * 10^{pH}}{K_b / K_w + 10^{pH}} \right), \quad (\text{Equação 1})$$

onde K<sub>b</sub> é a constante de ionização da amônia, K<sub>w</sub> é a constante de ionização da água e a razão K<sub>b</sub>/K<sub>w</sub> está associada à temperatura (°C) como:



$$K_b/K_w = e^{(6344/273+^{\circ}C)} \quad (\text{Equação 2})$$

Para lixiviados com características de lixiviado velho a 25°C, pH 8,45 e NAT de 1450 mg L<sup>-1</sup>, a concentração de amônia livre calculada pelas Equações 1 e 2 foi de 240 mg L<sup>-1</sup>, valor que poderia inibir a nitrificação em sistema de lodos ativados (Yusof et al., 2010).

Shiskowski et al. (1998) avaliaram a remoção de nitrogênio do lixiviado de aterros sanitários no sistema de lodos ativados. Para concentração de NAT no afluente do sistema em torno de 200 mg L<sup>-1</sup>, a remoção de nitrogênio por nitrificação/desnitrificação foi praticamente 100 %. Quando o reator foi operado com concentração de NAT no afluente de 1200 mg L<sup>-1</sup>, o sistema entrou em colapso.

Wei et al. (2012) avaliaram em reatores de batelada sequencial com lodo granular o tratamento de lixiviado velho bruto (razão DBO/DQO = 0,18) e pré-tratado com óxido manganoso e ácido fosfórico (razão DBO/DQO = 0,22), para remoção prévia do NAT. A concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) foi mantida em 4 000 mg L<sup>-1</sup> e o tempo de retenção celular (TRC) foi de 25-35 dias. Nos dois reatores a remoção média de DQO foi de 84 %. No reator alimentado com lixiviado pré-tratado, em que a concentração de NAT variou de 137-366 mg L<sup>-1</sup>, a remoção do NAT foi 92 %. No reator alimentado com lixiviado bruto, a concentração de NAT variou de 900 – 1 000 mg L<sup>-1</sup>, e a remoção de NAT foi de apenas 44 %. Segundo os autores, a concentração inicial de NAT exerce grande influência na eficácia dos reatores, tanto para remoção da matéria orgânica quanto para remoção de nitrogênio. A taxa específica de utilização da matéria orgânica foi inversamente proporcional às concentrações crescentes de NAT, como resultado da interferência do NAT no crescimento dos microrganismos heterotróficos. Para concentração de NAT no afluente em torno de 1 100 mg L<sup>-1</sup> e passadas 12 h de operação, houve acúmulo de

nitrito ( $80 \text{ mg L}^{-1}$ ) e nitrato ( $10 \text{ mg L}^{-1}$ ) no reator e diminuição na taxa de nitrificação. Esses resultados foram decorrentes da inibição das bactérias oxidadoras de amônia e de nitrito.

Stephenson et al. (2003) avaliaram o tratamento do lixiviado velho (razão DBO/DQO = 0,1) em um biofiltro aerado submerso de 770 L, recheado com areia (1,5 a 2,2 mm). Com pH próximo a 8, concentração inicial de NAT de  $581 \text{ mg L}^{-1}$  e concentração correspondente de amônia livre de  $192 \text{ mg L}^{-1}$ , a remoção de NAT foi 33 %. Essa porcentagem foi correspondente à amônia livre no lixiviado e a remoção de NAT se deu por volatilização da amônia ao invés de nitrificação, já que não houve produção de nitrito e nitrato. Quando o pH foi mantido em 7,2, a remoção do NAT aumentou para 99 %. No entanto, 91 % do NAT foi convertido a nitrito, que acumulou na concentração de  $524 \text{ mg L}^{-1}$ , inibindo a atividade das bactérias oxidadoras de nitrito.

Se para o lixiviado velho os processos biológicos mostraram-se pouco eficazes, para o lixiviado novo foram obtidas melhores eficiências de remoção de matéria orgânica e nitrogênio.

Zhu et al. (2013) testaram o tratamento de um lixiviado novo, com elevado teor de matéria orgânica biodegradável (razão DBO/DQO = 0,6), em sistema anaeróbio-aeróbio-anóxico operado com tempo de detenção hidráulica (TDH) próximo a 3 dias. Visando a remoção completa de nitrogênio sem adição de fonte externa de carbono para a desnitrificação, os reatores foram alimentados com a mistura lixiviado bruto/efluente anaeróbio/efluente aeróbio, variando entre 3 e 5 a razão DQO/NAT. Após 157 dias de operação, houve remoção de: 89-96 % da DQO afluente, que variou de 7 000 a 10 000  $\text{mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ ; e 98 % de remoção do nitrogênio total afluente (NT) ( $1\,300 - 1\,500 \text{ mg L}^{-1}$ ), tendo-se produzido efluente com concentração de NT inferior a  $40 \text{ mg L}^{-1}$ , que é o limite estabelecido pela legislação ambiental chinesa.

Gálvez et al. (2006) avaliaram o tratamento do lixiviado (razão DBO/DQO = 0,44) de um aterro sanitário próximo à cidade de Bristol (Inglaterra), utilizando o biofiltro aerado submerso. Os ensaios foram realizados em triplicata com reatores de 600 mL recheados com brita (6 a 10 mm), operados com TDH de 16 h. A carga orgânica volumétrica aplicada foi de 23,51 kgDQO m<sup>3</sup> d<sup>-1</sup>, a concentração de NAT variou de 2200 a 3800 mg L<sup>-1</sup> e a temperatura variou de 20 a 40°C. O melhor resultado foi obtido na temperatura de 40°C, com remoções de DQO e DBO de, respectivamente, 35 % e 74 %.

### ***3.3.3 Tratamento consorciado do lixiviado de aterros sanitários com esgoto sanitário***

Se o tratamento biológico do lixiviado se mostrou ineficiente, melhores resultados foram obtidos quando o lixiviado foi tratado de forma consorciada com esgoto sanitário.

De acordo com Aktaş e Ceçen (2001), para proporção volumétrica de 5 % e operação em batelada, um reator de lodos ativados de 2 L removeu 84 % da DQO e 95 % do NAT presentes na mistura lixiviado/esgoto sanitário, após 10 dias de aeração. Porém, a volatilização foi a principal causa da remoção da amônia, uma vez que apenas 17 % do NAT foi convertido às formas oxidadas de nitrogênio.

Çeçen e Çakiroğlu (2001) deram continuidade ao trabalho de Aktaş e Ceçen (2001) e avaliaram o desempenho do mesmo reator de lodos ativados de 2 L no tratamento da mistura lixiviado/esgoto sanitário para proporções volumétricas de 10 e 20 %. Para proporção volumétrica de lixiviado de 10 %, a remoção da DQO foi 74 %, diminuindo para 16 % quando se adicionou lixiviado na proporção volumétrica de 20 %.

A etapa final dessas pesquisas desenvolvidas em Istambul com o reator de lodos ativados de 2 L foi apresentada por Çeçen and Aktas (2004), tratando o mesmo lixiviado utilizado nos estudos anteriores. Os autores alteraram o regime de operação desse reator para fluxo semi-contínuo e, mantendo-se a proporção volumétrica da mistura lixiviado/esgoto sanitário em 20 %, houve 80 % de remoção da DQO e 54 % de remoção da amônia.

Borghetti et al. (2003) avaliaram o tratamento consorciado do lixiviado velho com esgoto sanitário em reatores de lodos ativados. O lixiviado adicionado ao esgoto consistiu na mistura de lixiviado velho e novo, com maior proporção de lixiviado velho (9:1). Nos ensaios em batelada foram utilizados reatores de 5 L e as proporções volumétricas variaram de 10 a 20 %. Nos ensaios em regime contínuo, foi utilizado um reator de 2 L e um decantador de 850 mL; as proporções volumétricas variaram de 5 a 20 % e os TDH foram de 2, 4 e 8 horas. Para proporção volumétrica de 15 %, a remoção da DQO nos ensaios em batelada foi de apenas 45 %, diminuindo para 25 % quando a proporção volumétrica aumentou a 20 %. A remoção de NAT foi também muito baixa: 17 e 19 % para as proporções volumétricas de 10 a 20 %. Nos ensaios com regime contínuo de alimentação, as melhores eficiências de remoção da DQO foram obtidas para o TDH de 4 h: 74 % para proporção volumétrica de 5 % e esse valor diminuiu a 42 % quando o lixiviado foi adicionado a 20 %. A remoção do NAT se manteve em torno de 80 % para TDH de 2 h e proporções volumétricas variando de 10 a 20 %.

O trabalho de Yu et al. (2010) traz maiores detalhes sobre as condições operacionais de um reator compartimentado de 3,8 m<sup>3</sup>, com zonas aneróbia/anóxica/aeróbia, alimentado em regime contínuo com a mistura lixiviado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 0,2 %. As condições ótimas de operação para remoção de matéria orgânica e nitrogênio foram: TDH de 11 horas, oxigênio dissolvido de 3 mg L<sup>-1</sup>, recirculação interna de 200 % (em relação à vazão de alimentação) e retorno de lodo de 80 % (em relação à vazão de

alimentação). Após monitoramento de 45 dias, as eficiências médias de remoção foram: 97% para o NAT, 60% para NT e 87% para matéria orgânica. Quando os ensaios foram realizados em um reator em escala real similar ao piloto, observou-se que a concentração de nitrato no compartimento aeróbio,  $5 \text{ mg L}^{-1}$ , foi inferior aquela medida nos ensaios com reator em escala piloto,  $16 \text{ mg L}^{-1}$ .

Kalka et al. (2010) avaliaram a toxicidade da mistura lixiviado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 15 %, após o tratamento em sistema anaeróbio-anóxico-aeróbio. As remoções de DBO (93 %) e NAT (97 %) foram idênticas às da condição controle (ensaios sem adição de lixiviado). O afluente da mistura foi cerca de 3 vezes mais tóxico aos biomarcadores testados do que o esgoto sanitário e, enquanto a toxicidade do esgoto tratado foi nula, a mistura tratada ainda se mostrou tóxica. Os autores associaram a toxicidade da mistura tratada à concentração remanescente de NAT ( $5,5 \text{ mg L}^{-1}$ ).

A continuação da pesquisa polonesa é relatada por Kalka (2012), que realizou ensaios de toxicidade para misturas contendo lixiviado em esgoto nas proporções volumétricas de 1 e 10 %. Os ensaios foram realizados com lixiviado novo e velho. As misturas contendo lixiviado novo e velho na proporção volumétrica de 1 % foram caracterizadas como tóxicas, porém, após o tratamento biológico a toxicidade dos efluentes foi reduzida, exceto para um dos quatro biomarcadores avaliados. Para proporção volumétrica de lixiviado novo de 10 %, o efluente tratado apresentou-se tóxico para três dos quatro organismos testados e como a remoção do NAT foi idêntica à condição controle, o autor associou a toxicidade da mistura à matéria orgânica recalcitrante. O autor estimou que a mistura de esgoto com lixiviado novo do estudo não seria tóxica se a adição de lixiviado não excedesse 0,05 %.

Litas et al. (2012) estudaram o tratamento consorciado do lixiviado velho na proporção volumétrica de 50 % em relação ao esgoto sintético, utilizando um reator piloto de lodos ativados de 300 L dotado de um módulo imerso de microfiltração. Com TDH de 9 dias,

a remoção de DQO variou de 95 a 99 %. A remoção do nitrogênio total variou de 76 a 95 % e foi atribuída à nitrificação e desnitrificação. Apesar das elevadas eficiências obtidas, o efluente final não atendeu aos padrões de lançamento da Grécia e os autores sugeriram pós-tratamento físico-químico.

Trabelsi et al. (2013) avaliaram o tratamento consorciado do lixiviado novo com esgoto sanitário em reatores de lodos ativados de 11 L, operados em TDH de 2 a 16 h. O efluente aeróbio foi tratado por coagulação-floculação com solução contendo 1 % de cloreto férrico ( $5 \text{ g L}^{-1}$ ) e sulfato de alumínio ( $2 \text{ g L}^{-1}$ ). As proporções volumétricas de lixiviado foram 10, 20, 30 e 50 %. A melhor remoção de DQO, 60 %, foi obtida para a proporção volumétrica de lixiviado de 30 %. Para as proporções volumétricas estudadas a remoção do NAT por nitrificação não ultrapassou 50 %, já que os baixos TDH não foram suficientes ao desenvolvimento das bactérias nitrificantes. A qualidade do efluente foi melhorada com a adição de sulfato de alumínio, que foi mais eficiente do que o cloreto férrico na remoção da DQO e NAT remanescentes.

Dentre as pesquisas sobre o tratamento consorciado do lixiviado no Brasil, destacam-se aquelas realizadas em Instituições como a Fundação Oswaldo Cruz (FIOCRUZ), Universidade Estadual da Paraíba (UEPB), Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ) e Universidade de São Paulo (USP).

Castro (2001) desenvolveu sua Tese na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) sobre o tratamento consorciado do lixiviado com esgoto em sistema australiano consistindo de lagoa anaeróbia ( $1 \text{ m}^3$ ) e lagoas de estabilização ( $0,7 \text{ m}^3$ ). A remoção de DQO para as proporções volumétricas de lixiviado de 6, 11 e 20 % foram, respectivamente, 47, 31 e 35 %.

Santos (2010) desenvolveu Tese de Doutorado na UFRJ sobre o tratamento consorciado do lixiviado em lagoas. Os ensaios foram realizados em duas linhas: linha 1 -

lagoa facultativa/lagoa de maturação; linha 2 - lagoa aerada/lagoa de sedimentação. As proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário foram de 0,2 a 2 %. Na linha 1, os resultados mais satisfatórios foram obtidos para adição de lixiviado na proporção volumétrica de 0,5 % e TDH de aproximadamente 16 dias. As remoções de DBO, DQO e NAT foram de, respectivamente, 71 %, 47 % e 49 %. Para as mesmas condições operacionais da linha 1, a linha 2 ofereceu melhores resultados. As remoções de DBO, DQO e NAT foram de, respectivamente, 78 %, 62 % e 60 %. A autora oferece grande contribuição à literatura ao estimar a geração de lixiviado e esgoto, para uma mesma população. Seus cálculos indicaram que a geração de lixiviado em relação à geração de esgoto variou de 0,09 a 0,13 %, faixa em que foram obtidos resultados satisfatórios para o tratamento consorciado.

As estimativas de Santos (2010) estão de acordo com as estimativas de Booth et al. (1996). A partir dos dados anuais de 1993 da ETE de Waterloo, no Canadá, Booth et al. (1996) estimaram a geração de lixiviado em relação ao esgoto entre 1994 e 2023. A proporção volumétrica calculada foi inferior a 0,2 %, com chances de diminuir frente ao possível aumento de vazão de esgoto no período estipulado.

Mannarino (2010) desenvolveu na FIOCRUZ Tese de Doutorado sobre a toxicidade do lixiviado no tratamento consorciado com esgoto sanitário. Dentre suas considerações, a autora observou que, para proporção volumétrica de até 1,5 %, a toxicidade da mistura tratada não ultrapassou 2 unidades de toxicidade (UT) para o biomarcador *Danio rerio*, sendo 8 UT o valor estabelecido pela legislação ambiental do Estado do Rio de Janeiro. Todavia, nos ensaios de ecotoxicidade crônica foi maior a presença dos hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) nos peixes expostos à mistura lixiviado/esgoto sanitário.

Em se tratando de experimentos com reator de lodos ativados em escala de bancada, destaca-se também o trabalho de Turetta (2011), desenvolvido no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC/USP. Nesse estudo foram utilizados: esgoto sanitário pré-tratado em

reator UASB (efluente anaeróbio), lixiviado bruto e lixiviado pré-tratado com cal. O reator de lodos ativados em escala de bancada, com volume de 10 L, foi operado por 20 dias e alimentado em regime de batelada com as seguintes proporções volumétricas de lixiviado no efluente anaeróbio: 0 % (controle), 2,5 %, 10 % e 20 %. Segundo a autora, o tratamento da mistura efluente anaeróbio com lixiviado bruto na proporção de 2,5 % foi o mais eficaz: houve 57 % de remoção da DQO e 100 % de remoção do NAT. Confirmando os resultados de Aktaş e Ceçen (2001), a autora ressalta que a remoção do NAT é devida à volatilização da amônia na forma livre.

Campos (2012) desenvolveu Dissertação de Mestrado na UEPB sobre o tratamento consorciado do lixiviado velho com esgoto sanitário em lagoas facultativa e de maturação, de 1 m<sup>3</sup>. A proporção volumétrica de lixiviado foi de 1 % e o TDH das lagoas 17 dias. As remoções obtidas para DQO e DBO foram 49 e 68 %. A remoção do NAT foi de 86 % e se deu pela volatilização da amônia. A concentração de NAT no efluente tratado manteve-se abaixo do limite de 20 mg L<sup>-1</sup> estabelecido pela Resolução CONAMA 430/2011.

Em continuidade ao trabalho de Campos (2012), Oliveira (2013) verificou a qualidade da mistura tratada pelas lagoas quanto à presença de coliformes termotolerantes e ovos de helmintos. As remoções obtidas foram de 99,76 % para os coliformes e 100 % para os ovos de helmintos.

Outro importante trabalho desenvolvido na EESC/USP e de grande relevância aos resultados desta Tese é a Dissertação de Campos (2013). A autora estudou o tratamento consorciado por lodos ativados das seguintes misturas: lixiviado bruto e solução de lactose 1 g L<sup>-1</sup>, lixiviado pré-tratado por “air stripping” e solução de lactose 1 g L<sup>-1</sup> e solução de ácido húmico e solução de lactose 1 g L<sup>-1</sup>. A lactose foi utilizada por ser um substrato de composição conhecida e facilmente biodegradável, eliminando possíveis interferentes presentes no esgoto sanitário. Os ensaios foram realizados em batelada sem inoculação dos



reatores e a proporção volumétrica de lixiviado e ácido húmico foi de 2 %. As remoções de DQO total e solúvel para as três misturas variou entre 91 e 94 %, enquanto na condição controle a eficiência foi de 97 %. A remoção de DBO foi de 99 % para todas as condições avaliadas. Para verificar se essas remoções de matéria orgânica foram devidas à diluição dos compostos recalcitrantes do lixiviado, a autora realizou análises espectroscópicas de infravermelho por transformada de Fourier. A comparação dos espectros das amostras de afluente e efluente evidenciou a degradação parcial da matéria orgânica. Os espectros das amostras de lodo dos reatores antes e após o tratamento foram idênticos, comprovando que a matéria orgânica não foi removida por adsorção no lodo, mas sim por sua degradação parcial.

## 4 MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 ETAPAS EXPERIMENTAIS DO PROJETO DE PESQUISA

#### 4.1.1 *Etapas experimentais do tratamento biológico aeróbio consorciado do lixiviado com esgoto sanitário*

Esse estudo foi dividido em 3 etapas:

- Etapa 1 – Avaliação da biodegradabilidade da mistura lixiviado/esgoto sanitário em reatores de lodos ativados em escala de bancada (operados em batelada), em função do pré-tratamento das águas residuárias, e das proporções volumétricas de lixiviado variando de 0 a 5%;
- Etapa 2 - Avaliação do desempenho do reator de lodos ativados em escala piloto (operado em regime contínuo de alimentação) em função do pré-tratamento do esgoto sanitário e lixiviado, e das proporções volumétricas de lixiviado variando de 0 a 5%;
- Etapa 3 - Avaliação do desempenho do biofiltro aerado submerso em escala piloto (operado em regime contínuo de operação) em função do pré-tratamento do esgoto sanitário e lixiviado, e das proporções volumétricas de lixiviado variando de 0 a 5%;
- Etapa 4 - Avaliação da tratabilidade da mistura lixiviado/esgoto sanitário por espectroscopia de infravermelho com transformada de Fourier e pela aplicação do

método tentativo “Equivalente em ácido húmico”, proposto para estimar a remoção da matéria não facilmente biodegradável.

#### *4.1.1.1 Descrição da etapa 1*

Essa etapa consistiu na operação de dois reatores de lodos ativados em escala de bancada para avaliação da biodegradabilidade da mistura lixiviado/esgoto sanitário nas proporções de 0, 0,2, 2 e 5%, que foram definidas com base na Revisão Bibliográfica.

A operação dos reatores de bancada foi em regime de batelada, para verificação dos efeitos dos pré-tratamentos do esgoto e lixiviado.

Nos experimentos (Tabela 1) foram utilizados tanto o lixiviado bruto quanto pré-tratado por “air stripping” para a remoção da amônia, substância que pode inibir a atividade dos microrganismos, conforme as referências citadas na Revisão Bibliográfica. Esse pré-tratamento incluiu a adição de cal comercial ao lixiviado para elevar seu pH a 11, acelerando a remoção de amônia pela torre de “air stripping”, como demonstraram Souto (2009) e Ferraz (2010). O pH do lixiviado foi ajustado a 11 porque esse valor foi considerado o mais viável para experimentos com “air stripping”, conciliando eficácia de remoção de amônia com economia na utilização de álcalis (Cotman e Gotvajn, 2010).

Foi utilizada cal comercial ao invés do hidróxido de cálcio padrão analítico pelo fato desse produto ser de baixo custo e também eficaz na alcalinização do lixiviado (Ferraz et al., 2013).

Para o pré-tratamento anaeróbio do esgoto sanitário foi utilizado um reator anaeróbio compartimentado em escala piloto.

**Tabela 1** - Experimentos com o reator de lodos ativados em escala de bancada (Etapa 1), utilizado para avaliação da tratabilidade da mistura lixiviado/esgoto sanitário.

| Ensaio | Proporção volumétrica | Águas residuárias | Aeração | Sedimentação | Duração |
|--------|-----------------------|-------------------|---------|--------------|---------|
|        | (%)                   |                   | (h)     | (h)          | (d)     |
| 1      | 0; 0,2; 2; 5          | LBr/ES            | 24      | 1            | 20      |
| 2      | 0; 0,2; 2; 5          | LPT/ES            | 24      | 1            | 20      |
| 3      | 0; 0,2; 2; 5          | LBr/EA            | 24      | 1            | 20      |
| 4      | 0; 0,2; 2; 5          | LPT/EA            | 24      | 1            | 20      |

LBr: lixiviado bruto; LPT: lixiviado pré-tratado por “air stripping”; ES: esgoto sanitário; EA: efluente anaeróbio.

Foram utilizadas misturas de lixiviado com esgoto sanitário e efluente anaeróbio para que se avaliasse como a redução prévia da carga orgânica do esgoto sanitário poderia interferir nos sistemas aeróbios alimentados com essas misturas.

Além da remoção de matéria orgânica, a remoção de nitrogênio também foi avaliada nos experimentos com o reator de lodos ativados em escala de bancada. A partir dos resultados dessa etapa foram definidas as condições operacionais dos reatores de lodos ativados (Etapa 2) e biofiltro aerado submerso (Etapa 3) em escala piloto, operados em regime contínuo de alimentação.

#### 4.1.1.1.1 Adaptação do inóculo e operação do reator de lodos ativados em escala de bancada

O inóculo dos reatores de lodos ativados, tanto em escala de bancada quanto piloto, foi o lodo aeróbio da indústria Faber Castell Ltda., localizada no município de São Carlos-SP.

A adaptação do inóculo se deu pela adição de esgoto sanitário ao lodo aeróbio na proporção volumétrica de 7:3. Essa mistura foi submetida à aeração por 24 h e após esse período, foram retirados 50 % do volume da mistura esgoto sanitário/lodo aeróbio, porém, sem interrupção no fornecimento de ar ao volume restante no tanque de adaptação.

O volume retirado do tanque de adaptação foi transferido a um recipiente para sedimentação dos sólidos em suspensão. Após 2 h, o sobrenadante foi descartado, retornando-se ao tanque de adaptação o volume de lodo que mantivesse em 30 % a proporção volumétrica desse inóculo no recipiente. O lodo excedente foi descartado e, por fim, o volume do tanque foi completado com esgoto sanitário bruto. Durante a adaptação do lodo aeróbio ao esgoto sanitário, o pH foi mantido próximo a 7 e a concentração de oxigênio dissolvido próxima a  $2 \text{ mg L}^{-1}$  (Coletti, 1997).

Esses procedimentos para adaptação do lodo aeróbio ao esgoto sanitário foram repetidos até o surgimento de microrganismos como rotíferos, ciliados fixos e nematóides, que são característicos das etapas mais avançadas de estabilização da matéria orgânica (Povinelli et al., 1989). Para tanto, foram realizadas análises físico-químicas e exames microbiológicos, que serão apresentados posteriormente.

Após o período de adaptação, 3 L de lodo aeróbio foram inoculados nas câmaras dos reatores de lodos ativados, completando-se seus volumes com 7 L das misturas das águas residuárias indicadas na Tabela 1. Os procedimentos descritos para adaptação do lodo aeróbio foram adotados para a operação dos reatores.

#### 4.1.1.2 *Descrição da etapa 2*

Os melhores resultados da Etapa 1 foram estudados em reator de lodos ativados em escala piloto e operado em regime contínuo de alimentação. O procedimento de adaptação do inóculo foi idêntico ao da Etapa 1.

A idade do lodo ( $\Theta_c$ ) adotada foi de 20 dias, valor utilizado em outras pesquisas sobre o tratamento da mistura lixiviado/esgoto sanitário em lodos ativados (Ceçen e Aktaş, 2001). O tempo de detenção hidráulica (TDH) foi de 24 h, valor intermediário em relação aquele usado por Ceçen e Aktaş (2001) (33 h) e Yu et al. (2010) (11 h).

Outro reator de LA em escala piloto, alimentado continuamente apenas com esgoto sanitário foi utilizado como reator controle. Os dois reatores foram operados em paralelo e alimentados continuamente, com o mesmo TDH e idade do lodo.

Na Etapa 2 avaliou-se o possível o acúmulo de metais pesados no lodo aeróbio, visando a possibilidade do uso agrícola desse material, conforme as especificações da Resolução CONAMA 380/06 (Ministério do Meio Ambiente, 2006).

Assim como na Etapa 1, a estabilização dos dois reatores foi monitorada em todos os ensaios através de análises físico-químicas e exames microbiológicos.

#### 4.1.1.3 *Descrição da etapa 3*

A utilização do biofiltro aerado submerso foi proposta considerando-se o caso de ETE compactas, que possam dispor desse tipo de reator e efetuar o tratamento da mistura lixiviado/esgoto sanitário.

Os ensaios dessa etapa foram avaliados em dois biofiltros, sendo um deles o reator controle. Assim como o reator de lodos ativados em escala piloto, os biofiltros foram operados com TDH de 24 h. Na Etapa 3 também foi investigado o possível acúmulo de metais no lodo dos biofiltros.

#### 4.1.1.4 Descrição da etapa 4

##### 4.1.1.4.1 Espectroscopia de infravermelho por transformada de Fourier

A espectrometria de infravermelho foi utilizada para investigar se os compostos de difícil degradação foram removidos pela biodegradação ou simples diluição.

Conforme a radiação na região do infravermelho é absorvida por uma molécula orgânica, ela é convertida em energia rotação e vibração, características de determinados grupos funcionais. O interessante é que os grupos funcionais possuem bandas de absorção bastante peculiares, que não se alteram em função da estrutura molecular. Com isso, é possível obter informações qualitativas sobre a estrutura do composto de interesse (Silverstein et al., 2005).

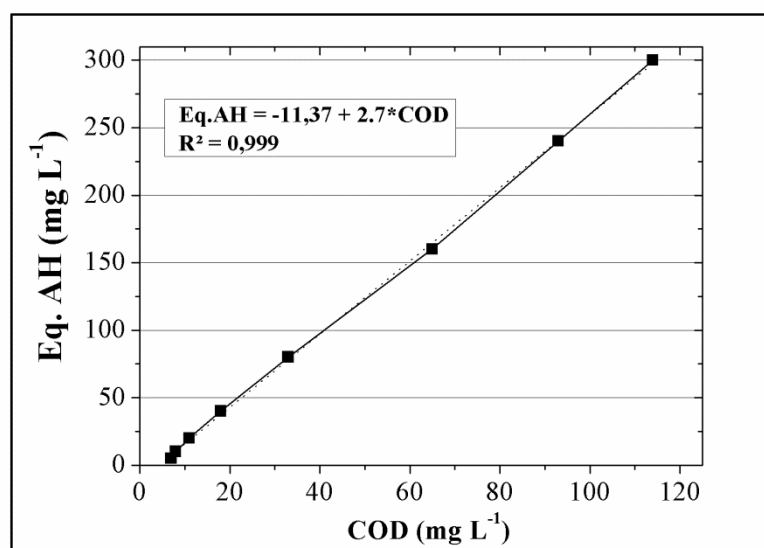
De acordo com a revisão bibliográfica apresentada, o lixiviado contém substâncias recalcitrantes como as substâncias húmicas. Assim, bandas de absorção características dos ácidos húmico e fúlvico foram utilizadas como indicadores para análise dos espectros das amostras antes e após o tratamento aeróbio.

#### 4.1.1.4.2 “Equivalente em ácido húmico”

Complementando a análise espectroscópica, Povinelli e Ferraz propõem o estabelecimento de um índice denominado “equivalente em ácido húmico”, para avaliar as substâncias orgânicas recalcitrantes antes e depois do tratamento. Para tanto, foram utilizadas medidas de carbono orgânico dissolvido (COD) para soluções padrão de ácido húmico.

Este procedimento consiste nas seguintes etapas:

- traçado da curva padrão concentração de COD x concentração de ácido húmico (AH):



**Figura 4** - Curva de calibração para o COD “equivalente em ácido húmico” (Eq.AH). Fonte: a autora.

- antes de iniciar o tratamento consorciado lixiviado/esgoto sanitário, coletou-se um volume de esgoto bruto e da mistura lixiviado/esgoto sanitário. As amostras foram filtradas em membrana de 0,45 µm. Nos líquidos resultantes da filtração mediu-se o COD e determinaram-se os valores “equivalentes em ácido húmico” na curva padrão, obtendo-se os



valores iniciais “ $x_1$ ” e “ $x_2$ ”. O termo “ $x$ ” relaciona-se aos afluentes da seguinte forma:

- $x_1$ : “equivalente em ácido húmico” do esgoto sanitário antes do tratamento aeróbio;
- $x_2$ : “equivalente em ácido húmico” da mistura lixiviado/sgoto sanitário antes do tratamento aeróbio;

c) o esgoto bruto e a mistura lixiviado/sgoto sanitário foram submetidos à aeração nos reatores de lodos ativados e biofiltro aerado submerso. Decorrido o tempo de aeração previsto, foram retiradas amostras de cada um dos reatores. As amostras foram filtradas em membrana de  $0,45 \mu\text{m}$  e lidos os valores de COD. Esses valores foram inseridos na curva de calibração e transformados em “equivalente de ácido húmico” para obtenção dos valores “ $y_1$ ” e “ $y_2$ ”. O termo “ $y$ ” relaciona-se aos efluentes da seguinte forma:

- $y_1$ : “equivalente em ácido húmico” do esgoto sanitário após o tratamento aeróbio;
- $y_2$ : “equivalente em ácido húmico” da mistura lixiviado/sgoto sanitário após o tratamento aeróbio;

d) de posse dos valores “ $x_1$ ”, “ $x_2$ ”, “ $y_1$ ” e “ $y_2$ ”, tem-se:

$$x_2 - x_1 = \Delta_1 \quad (\text{Equação 3})$$

$$y_2 - y_1 = \Delta_2, \quad (\text{Equação 4})$$

em que:

- $\Delta_1$ : valor do “equivalente em ácido húmico” da mistura lixiviado/esgoto sanitário antes do tratamento aeróbio. Ou seja,  $\Delta_1$  é a contribuição do lixiviado à matéria orgânica de difícil degradação da mistura lixiviado/esgoto sanitário;
- $\Delta_2$ : valor do “equivalente em ácido húmico” presente na mistura lixiviado/esgoto sanitário após o tratamento aeróbio. Ou seja,  $\Delta_2$  corresponde à matéria refratária devida à adição de lixiviado ao esgoto sanitário.

Foram comparados os valores de  $\Delta_1$  e  $\Delta_2$  para tentativamente avaliar se houve degradação, mesmo que parcial, ou simples diluição dos orgânicos recalcitrantes presentes no lixiviado. A interpretação dos resultados foi a seguinte:

- se  $\Delta_2 = 0$ , houve degradação total dos recalcitrantes;
- se  $\Delta_1 > \Delta_2$  e  $\Delta_2 > 0$ , houve degradação parcial dos recalcitrantes;
- se  $\Delta_1 = \Delta_2$ , não houve degradação dos recalcitrantes.

Para o esgoto sanitário e efluente anaeróbio, a estimativa da remoção do "Eq.A.H" (Rem. "Eq A.H") no efluente tratado, em termos de concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) é calculada pela Equação 5:

$$\bullet \text{ Rem. "Eq. A.H" (mg L}^{-1}\text{)} = x_1 - y_1 = \Delta_0, \quad (\text{Equação 5})$$

em que  $\Delta_0$  é a concentração do "Eq. A.H" removido do esgoto sanitário bruto ou efluente anaeróbio.

A estimativa da remoção do "Eq.A.H" (Rem. "Eq A.H") no esgoto sanitário tratado ou efluente anaeróbio, em termos de porcentagem é calculada pela Equação 6:

- $\text{Rem. "Eq. A.H" (\%)} = 100 * (\Delta_0 / x_1)$  (Equação 6)

Para as misturas contendo esgoto ou efluente anaeróbio e os lixiviados bruto e pré-tratado, a estimativa da remoção do "Eq.A.H" (Rem. "Eq A.H") após o tratamento aeróbio, em termos de concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) é calculada pela Equação 7:

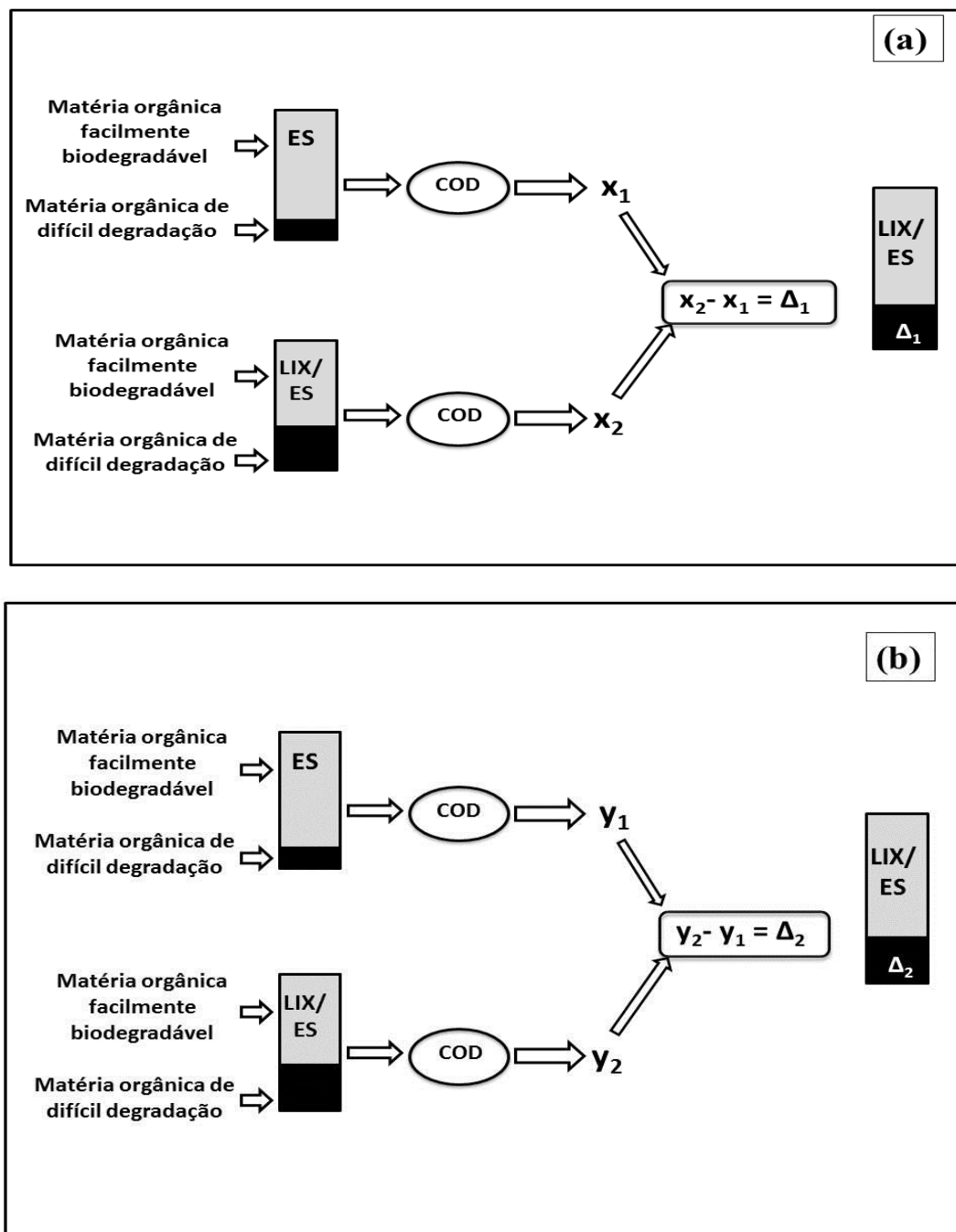
- $\text{Rem. "Eq. A.H" (mg L}^{-1}\text{)} = \Delta_1 - \Delta_2 = \Delta_{0m}$ , (Equação 7)

em que  $\Delta_{0m}$  é a concentração do "Eq. A.H" removido da mistura LIX/ES bruta.

A estimativa da remoção do "Eq.A.H" (Rem. "Eq A.H") nas misturas tratadas, em termos de porcentagem é calculada pela Equação 8:

- $\text{Rem. "Eq. A.H" (\%)} = 100 * (\Delta_{0m} / \Delta_1)$  (Equação 8)

A execução proposta para esse método tentativo pode também ser verificada no esquema da Figura 5.

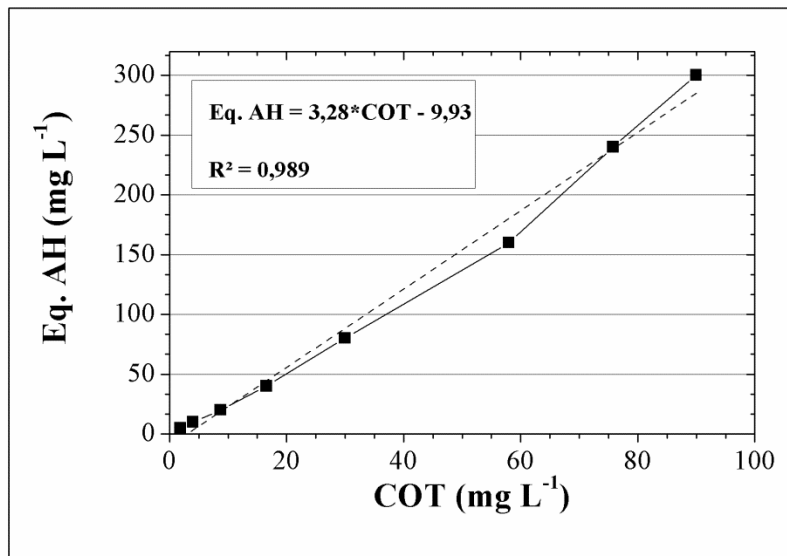


**Figura 5** – Esquema da execução proposta para o método tentativo “equivalente em ácido húmico” (a) antes e (b) após o tratamento aeróbio. Fonte: a autora.

(\*) LIX: lixiviado; ES: esgoto sanitário; COD: carbono orgânico dissolvido.

Inicialmente, foram realizados testes com medidas de carbono orgânico total (COT), em que as amostras eram acidificadas a pH 2 e posteriormente filtradas. No entanto, como o ácido húmico é utilizado como indicador de compostos recalcitrantes e precipita em pH 2,

parte desse ácido orgânico seria removida das amostras após a acidificação e filtração. Por este motivo, as medidas de COT foram substituídas pelas de COD, que resultaram em melhores respostas ao método tentativo. A curva de calibração para as medidas de COT é mostrada na Figura 6.

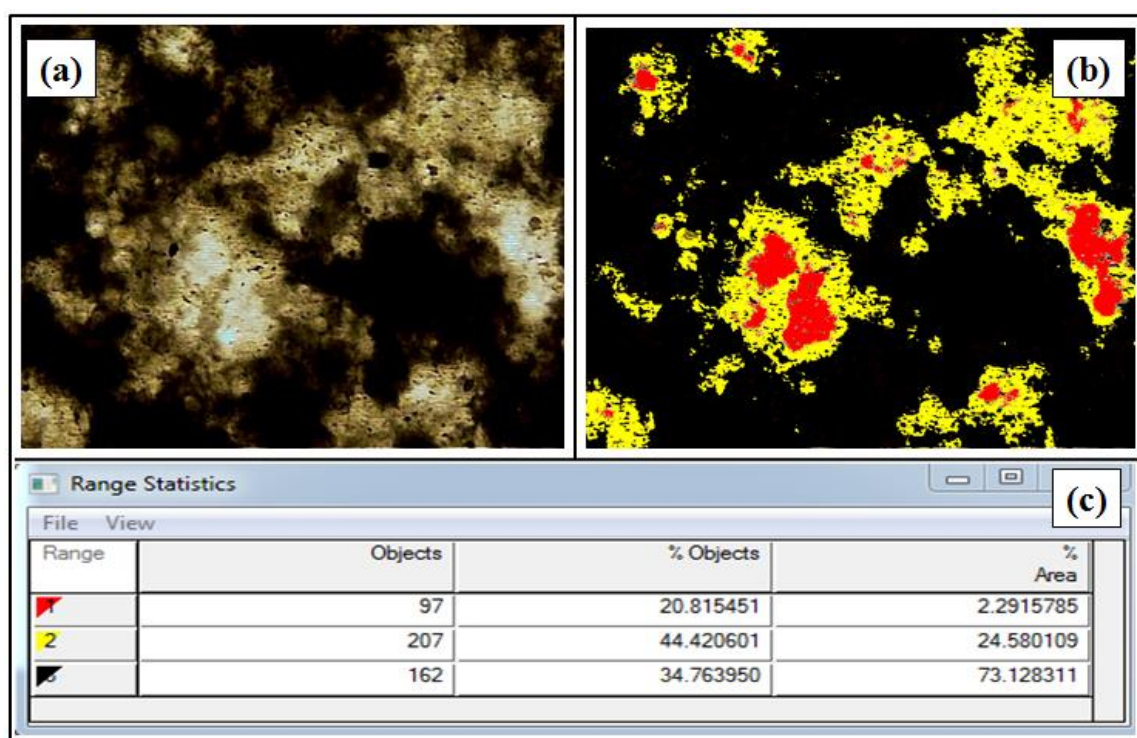


**Figura 6** - Curva de calibração para o COT “equivalente em ácido húmico” (Eq.AH). Fonte: a autora.

#### 4.1.1.4.3 Teste de coloração com nanquim e método de classificação dos tons

Por fim, para complementar as informações obtidas com a análise de infravermelho e com o método “Eq.A.H” foi empregada a técnica microscópica de coloração negativa tinta da Índia ou nanquim (também conhecida como tinta da China). O nanquim consiste em suspensão aquosa contendo partículas negras de carbono (Jenkins et al., 2003) que colorem de negro amostras de lodo aeróbio. Porém, caso haja carbono não assimilado pelos

microrganismos, as lâminas apresentarão pontos claros contrastando com as áreas coloridas de negro (Jenkins et al., 2003), como mostrado na Figura 7.



**Figura 7** – Teste de coloração com nanquim em (a) amostra do reator de lodos ativados piloto alimentado apenas com esgoto, com apresentação do (b) método proposto para classificação dos tons observados e (c) a área calculada pelo *software Image Pro-Plus* para essa micrografia. Fonte: a autora.

Com essa técnica, pôde-se avaliar qualitativamente a interferência do lixiviado no tratamento aeróbio consorciado em função do carbono não assimilado pelos microrganismos, nas diferentes condições experimentais estudadas.

Na tentativa de melhor extrair as respostas do teste com nanquim, propôs-se nesta Tese um método para quantificar a área das lâminas ocupada pelo carbono não assimilado, utilizando o *software Image Pro-Plus*. O procedimento consiste em separar as tonalidades observadas nas lâminas em classes distintas.

Na Figura 7 constam imagens da lâmina original após coloração com nanquim e após a classificação das tonalidades encontradas. Manualmente, informa-se ao *software* que o tom dourado intenso e brilhante da Figura 7a dever ser a “classe 1”, o tom dourado mais opaco, “classe 2” e o negro do nanquim, “classe 3”. Com o comando de contagem do *software*, obtém-se a porcentagem da área correspondente ao carbono não assimilado pelos microrganismos, em relação às demais áreas.

Nos exames das lâminas, além do aumento de 100x indicado por Jenkins et al. (2003), o microscópio foi operado com a seguinte configuração: zero de contraste, nitidez + 7, nível zero de azul e vermelho e exposição manual variando de 1/1000 para amostras de brilho muito intenso a 1/250 para brilho moderado.

O método proposto consiste na aquisição de pelo menos quatro imagens em diferentes campos da lâmina. O carbono não assimilado é dado como a média da área ocupada pela classe 1. No exemplo da Figura 7b, a área do carbono não assimilado da micrografia da Figura 7a foi de 2,29 % (Figura 7c).

Dessa forma, foi possível comparar quantitativamente o teor de carbono não assimilado entre as amostras dos reatores aeróbios estudados, verificando-se qual sistema foi mais eficaz na remoção da matéria orgânica, juntamente com a análise de infravermelho e o “Eq.A.H”.

Espera-se que esse método possa servir como ferramenta de baixo custo e de fácil execução, para detecção de possíveis interferências do lixiviado nos reatores biológicos das ETE que realizam tratamento consorciado. A intenção não é que esse teste substitua as

análises de DQO ou DBO, mas que sirva como análise preliminar e de rápida resposta sobre o desempenho dos reatores.

#### ***4.1.2 Etapas experimentais do estudo de tratabilidade dos lixiviados bruto e pré-tratado com cal em sistemas aeróbios***

Para o estudo de tratabilidade, foram realizados ensaios com lixiviado bruto e pré-tratado com cal, em reatores de lodos ativados em escala de bancada inoculados com lodo aeróbio. Os reatores foram submetidos à aeração por 24h e operados em batelada por 20 dias.

## **4.2 ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

### ***4.2.1 O lixiviado***

Em todos os ensaios foi utilizado o lixiviado do aterro sanitário do município de São Carlos-SP, cuja caracterização físico-química é apresentada na seção “Resultados e Discussões”. O ponto de coleta foi a lagoa de armazenamento de lixiviado, mostrada na Figura 8.





**Figura 8** - Vista aérea do aterro sanitário de São Carlos-SP, com indicação do ponto de coleta do lixiviado. Fonte: Google Earth.

O lixiviado coletado foi armazenado em um reservatório de 3 m<sup>3</sup> instalado na planta experimental (Figura 9). Esse volume de 3 m<sup>3</sup> foi considerado o mais adequado em termos de custo de transporte e demanda de uso, principalmente no caso da operação dos reatores em escala piloto alimentados em regime contínuo.



**Figura 9** - Reservatório de armazenamento do lixiviado coletado: (1) tubulação para coleta de lixiviado na parte interna da planta experimental. Foto da autora.

#### **4.2.2 Esgoto sanitário bruto e efluente anaeróbio**

O esgoto sanitário bruto foi coletado da rede pública da região residencial próxima à EESC, após passar por tratamento preliminar: gradeamento, peneiramento e sedimentação. Uma bomba autoescorvante foi utilizada para recalque do esgoto sanitário até o reator anaeróbio compartimentado e caixas de alimentação dos demais reatores.

#### **4.2.3 Mistura lixiviado/esgoto sanitário e lixiviado/efluente anaeróbio**

Os lixiviados bruto e pré-tratado foram misturados ao esgoto sanitário bruto e efluente anaeróbio nas proporções volumétricas de 0, 0,2, 2 e 5 %. Essas proporções volumétricas foram adotadas com base nos melhores resultados dos processos aeróbios apresentados na Revisão Bibliográfica.

### **4.3 UNIDADES EXPERIMENTAIS DE TRATAMENTO DOS LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS**

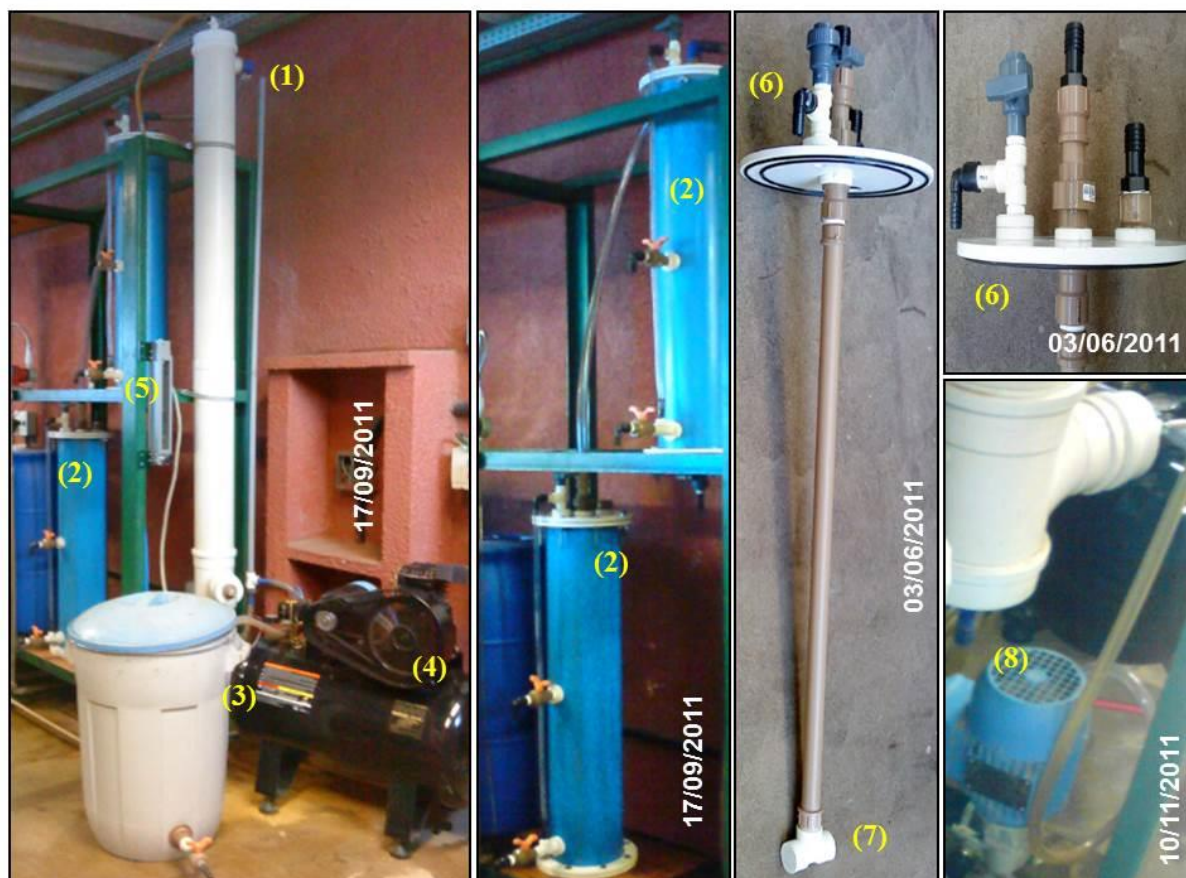
As unidades experimentais foram descritas isoladamente, na ordem em que foram propostas para comporem os experimentos desta Tese.

### 4.3.1 Torre recheada aerada

Embora a elevada concentração de amônia (variando de 1000 – 1600 mg L<sup>-1</sup>) presente no lixiviado tenha sido associada aos resultados insatisfatórios dos processos biológicos aplicados ao tratamento dessa água residuária, na maioria das publicações citadas na Revisão Bibliográfica não houve remoção prévia de amônia por “air stripping”. O objetivo desse pré-tratamento foi verificar se seria possível aumentar a eficiência do tratamento biológico da mistura lixiviado/esgoto sanitário.

A torre, mostrada na Figura 10, foi a mesma utilizada por Ferraz et al. (2013) e consistiu de um tubo de PVC de 0,15 m (6”) de diâmetro e 2,24 m de altura, sendo 1,85 m preenchidos com anéis do tipo “*Raschig*” de polietileno corrugado e com diâmetro de 15 mm. Esse material de recheio é sustentado por um fundo falso.

Antes do bombeamento para torre de “air stripping”, o lixiviado foi pré-tratado por precipitação química, a partir da adição de cal até que seu pH fosse ajustado para 11. Esse procedimento foi feito no reservatório com agitador mostrado na Figura 11. Após a alcalinização do lixiviado, o sobrenadante foi transferido para o reservatório da torre de “air stripping”, indicado pelo número “3” na Figura 10. Para atender a demanda de lixiviado pré-tratado, as bateladas na torre de “air stripping” foram realizadas com 100 L de lixiviado alcalinizado.



**Figura 10-** Instalação experimental do subprojeto 1: (1) torre de “air stripping”; (2) torres de absorção; (3): reservatório para armazenamento do lixiviado; (4): compressor de ar; (5): rotâmetro; (6): parte superior das torres de absorção; (7): difusor de ar das torres de absorção; (8): bomba dosadora. Fotos da autora.

Como indicado nas Figuras 10 e 12, o lixiviado alcalinizado foi armazenado em um tanque de 100 L e bombeado até o topo da torre, por uma bomba dosadora, com vazão de  $90 \text{ L h}^{-1}$ . A vazão de ar,  $4\,500 \text{ L h}^{-1}$ , foi fornecida em contracorrente por um compressor. A operação da torre se deu em regime de batelada, de modo que lixiviado alcalinizado fosse recirculado até que a concentração de NAT atingisse valores próximos a  $100 \text{ mg L}^{-1}$ . Esse valor foi determinado visando economia de energia e também porque ao ser misturado com esgoto sanitário na proporção volumétrica de 5%, por exemplo, a concentração NAT na

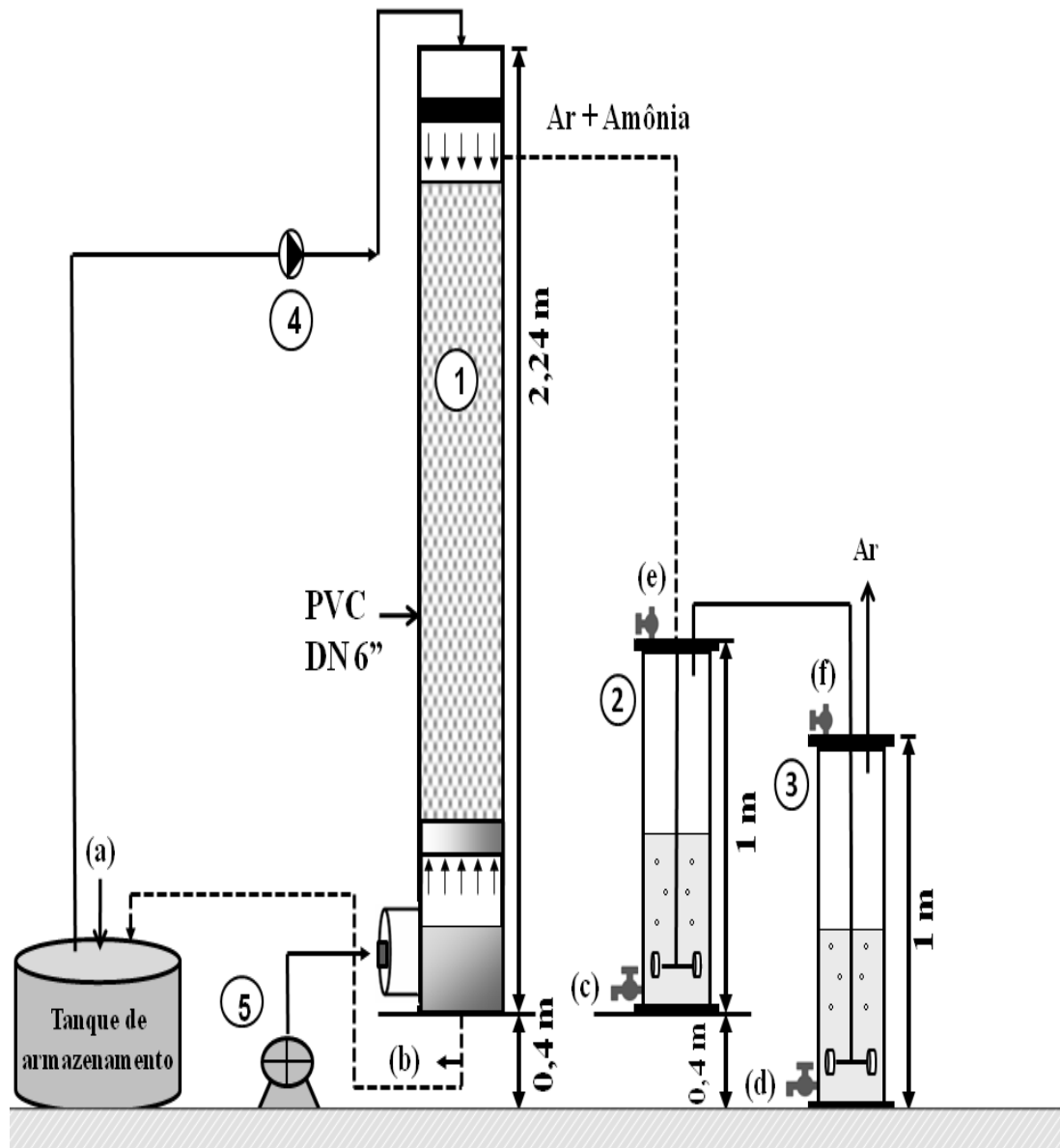


mistura manteve-se em entre 30-40 mg L<sup>-1</sup>, valor próximo aquele geralmente encontrado no esgoto sanitário.



**Figura 11** – Unidades experimentais para precipitação química do lixiviado: (1) tubulação para coleta do lixiviado bruto armazenado no (2) reservatório de 3 m<sup>3</sup>; (3) reservatório com agitador mecânico; e (4) tubulação para coleta do sobrenadante e/ou remoção do lodo gerado. Fotos da autora.

A amônia liberada da torre de “air stripping” foi recolhida nas torres de absorção (Figuras 10 e 12), que consistem de dois tubos de PVC com 20 cm de diâmetro, 1 m de altura e volume de 31,4 L. Para neutralização da amônia, as torres foram preenchidas com 20 L de água de torneira. O emprego de água mostrou-se opção tão eficaz quanto uma solução de ácido sulfúrico 0,4 M, porém, de maior simplicidade e segurança operacional (Ferraz et al., 2013).



**Figura 12-** Esquema dos processos de “air stripping” e absorção de amônia: (1) torre de “air stripping”; (2 e 3) torres de absorção; (4) bomba dosadora; (5) compressor de ar; (a-b) pontos de amostragem; (c-d) pontos de amostragem e descarga das torres de absorção; (e-f) registros para alimentação das torres de absorção (Bonmatí and Flotats (2003), adaptados pela autora).

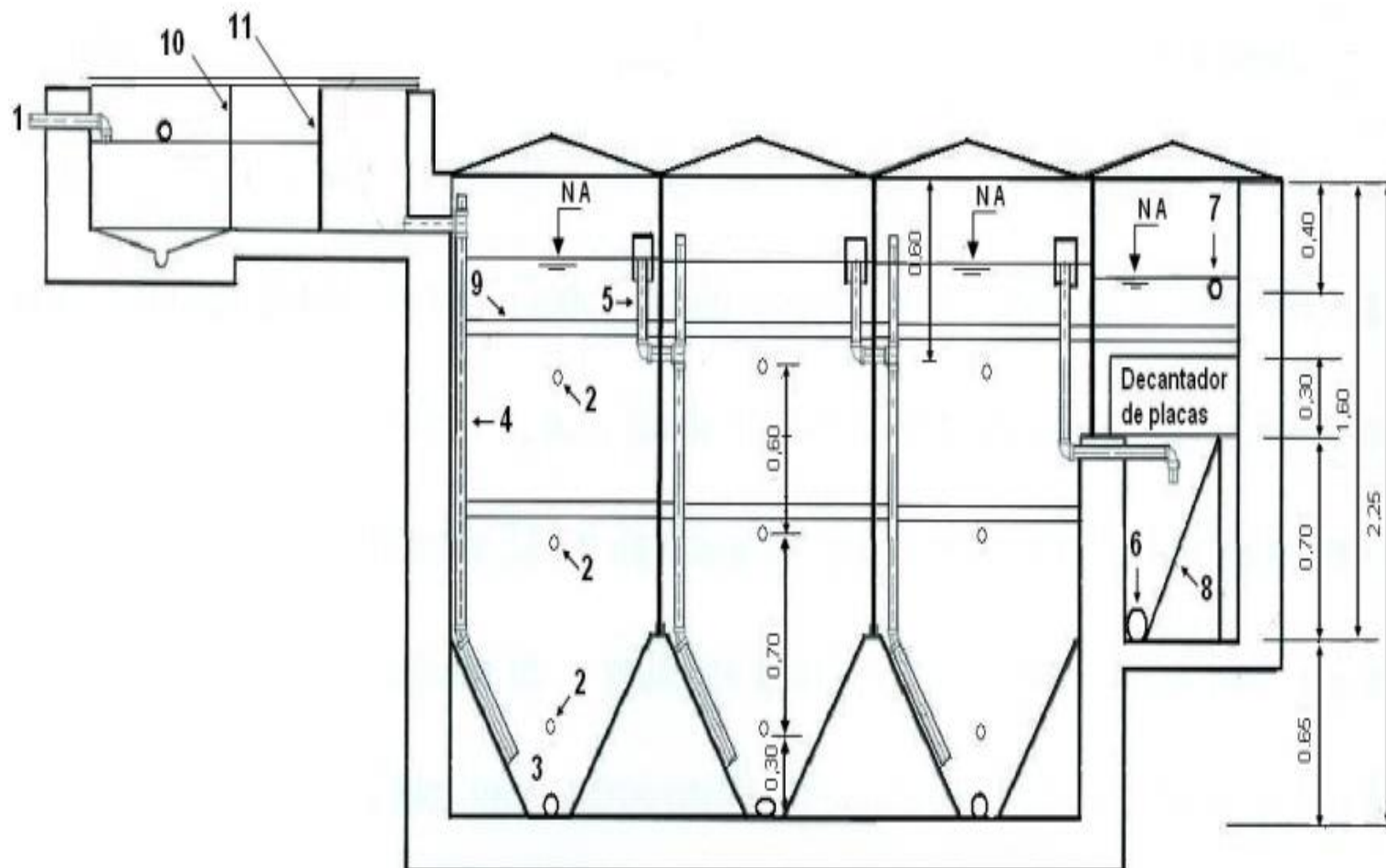
### 4.3.2 Reator anaeróbio compartimentado

Para pré-tratamento do esgoto sanitário coletado da rede pública próxima à EESC, foi utilizado o reator anaeróbio compartimentado existente no Departamento de Hidráulica e Saneamento da EESC (Figura 13).



**Figura 13** - Reator anaeróbio compartimentado. Foto da autora.

De acordo com o corte longitudinal mostrado na Figura 14, o reator anaeróbio compartimentado contém 4 câmaras que funcionam em série e estão interligadas por meio de tubulações, responsáveis pela distribuição do esgoto ao longo do reator. A quarta câmara consiste de um decantador de placas, cuja finalidade é a retenção de sólidos (Povinelli, 1999).

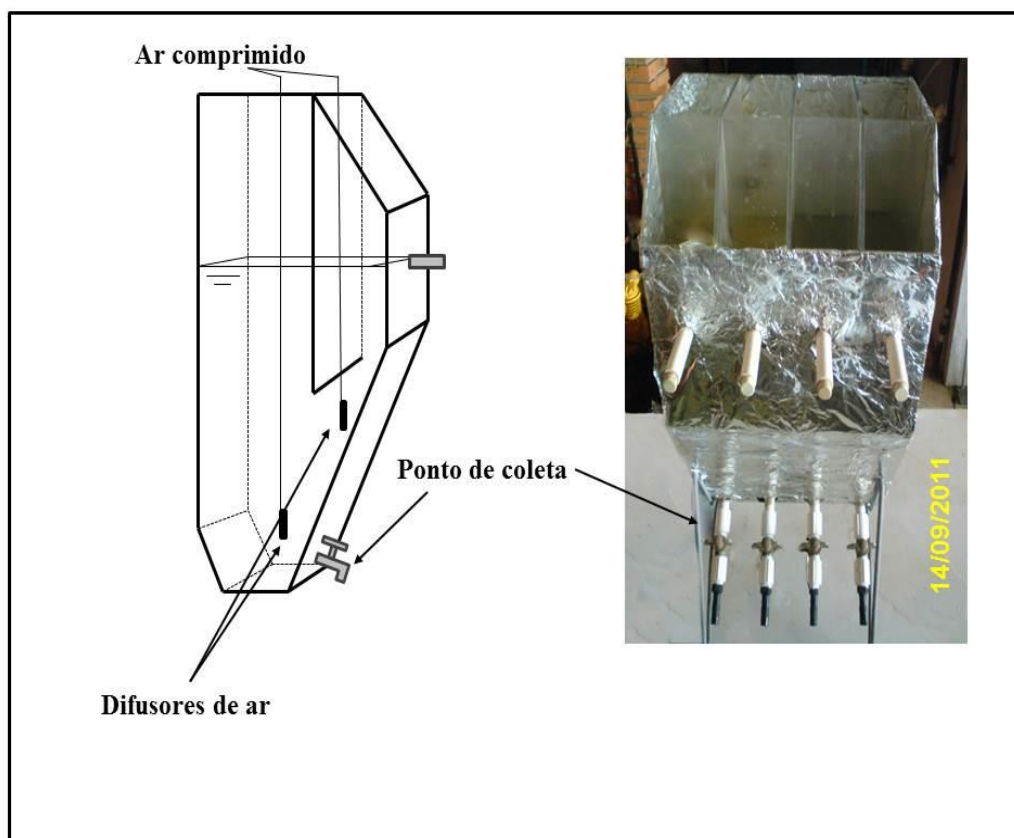


**Figura 14** - Corte longitudinal do reator anaeróbico compartimentado: (1) esgoto efluente do tratamento preliminar; (2) pontos de amostragem; (3) descarga de fundo; (4) tubulação de PVC de distribuição do esgoto; (5) tubos coletores do esgoto tratado em cada câmara; (6) tubulação em PVC de descarga do lodo do decantador de placas; (7) tubo de coleta do efluente tratado final; (8) placa de madeira do decantador de placas; (9) travamento em caibro de 5 x 5 cm; (10) grade de aço inox; (11) vertedor triangular. Fonte: Povinelli (1999).



### 4.3.3 Reator de lodos ativados de bancada

O reator de lodos ativados em escala de bancada é dividido em quatro câmaras, conforme mostrado na Figura 15, com volumes individuais de 10,2 L. Em cada câmara há um tanque de aeração e um decantador, separados por uma cortina fixa. Para evitar a proliferação de algas, o reator foi coberto contra incidência de luz, recurso também utilizado por Turetta (2011).



**Figura 15** - Reator de lodos ativados em escala de bancada. Fonte da perspectiva: Kato (1982), adaptado pela autora. Foto da autora.

O ar foi fornecido por compressores de aquários e distribuído nas câmaras por meio de pedras porosas. A vazão de ar foi ajustada de maneira que a concentração de oxigênio dissolvido no tanque de aeração fosse no mínimo  $2 \text{ mg L}^{-1}$ . O reator foi operado conforme as etapas experimentais dos subprojetos 1 e 2.

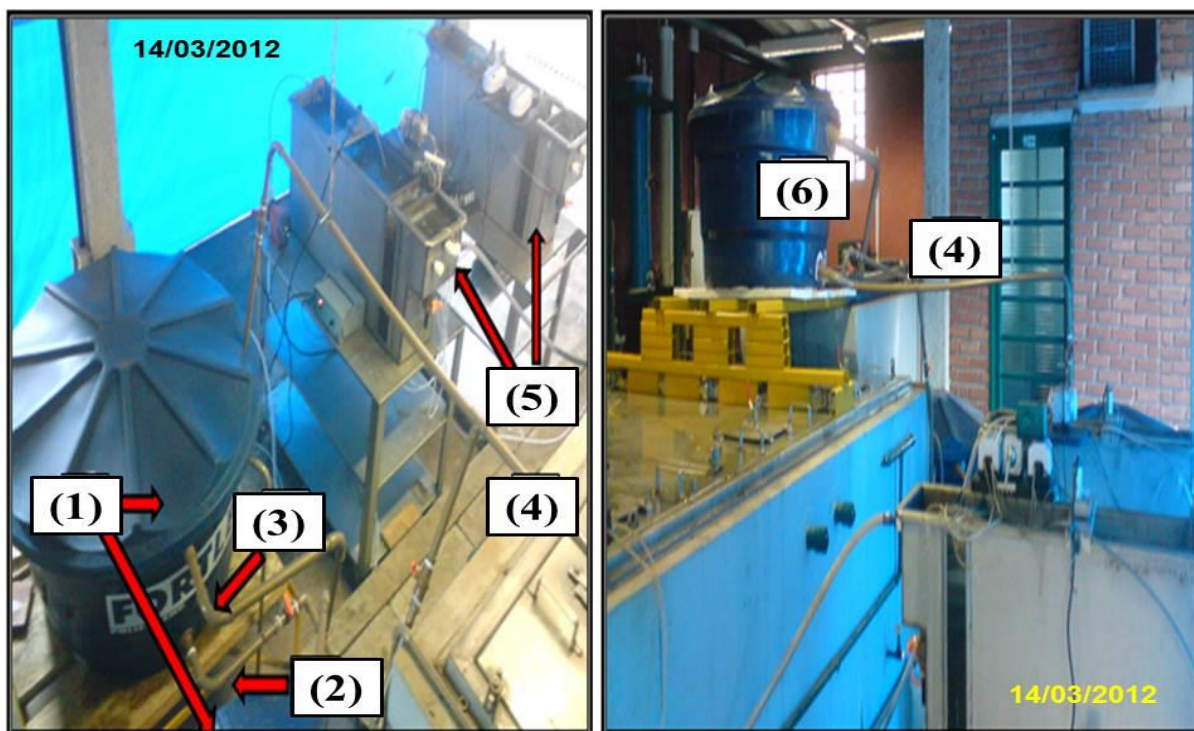
#### ***4.3.4 Reatores de lodos ativados em escala piloto***

Os dois reatores de lodos ativados em escala piloto são idênticos e consistem de dois tanques em aço inox com volume útil de 95 L (Figura 16). O sistema de alimentação desses reatores, mostrado na Figura 17, consistiu de um tanque de equalização (para regular a vazão de esgoto e reter o material grosseiro) que abastecia os dois reservatórios de alimentação dos reatores.

O ar foi fornecido por compressores e distribuído no tanque de aeração pelo uso de cortinas de ar fixadas no fundo do reator. A vazão de ar foi ajustada de maneira que a concentração de oxigênio dissolvido no tanque de aeração fosse no mínimo  $2 \text{ mg L}^{-1}$ . Em cada reator foi utilizado um agitador, também em aço inox e com quatro pás, para a homogeneização no tanque de aeração.



**Figura 16** - Reatores de lodos ativados piloto: (1) tubulação de alimentação; (2) agitador do tanque de aeração; (3) difusores de ar; (4) tubulação de recirculação do lodo; (5) decantadores. Fotos da autora.



**Figura 17** - Sistema de alimentação dos reatores de lodos ativados piloto: (1) tanques de alimentação; (2) descarga de fundo; (3) extravasor; (4) tubulação de distribuição do esgoto sanitário; (5) reatores de lodos ativados piloto; (6) tanque de equalização. Fotos da autora.

#### 4.3.5 Biofiltro aerado submerso (BAS)

Foram utilizados dois BAS em escala piloto para fins de comparação entre seus desempenhos e os dos lodos ativados.

Na Figura 18 é mostrado o BAS que foi alimentado com a mistura lixiviado/esgoto sanitário. Esse reator consistiu de um tubo de PVC com 38 cm de diâmetro interno, dividido em cinco módulos, e com volume total de 227 L. Os módulos 2 e 4 foram preenchidos com anéis de polietileno corrugados, do tipo “Raschig”, iguais aos utilizados na torre de “air stripping”.

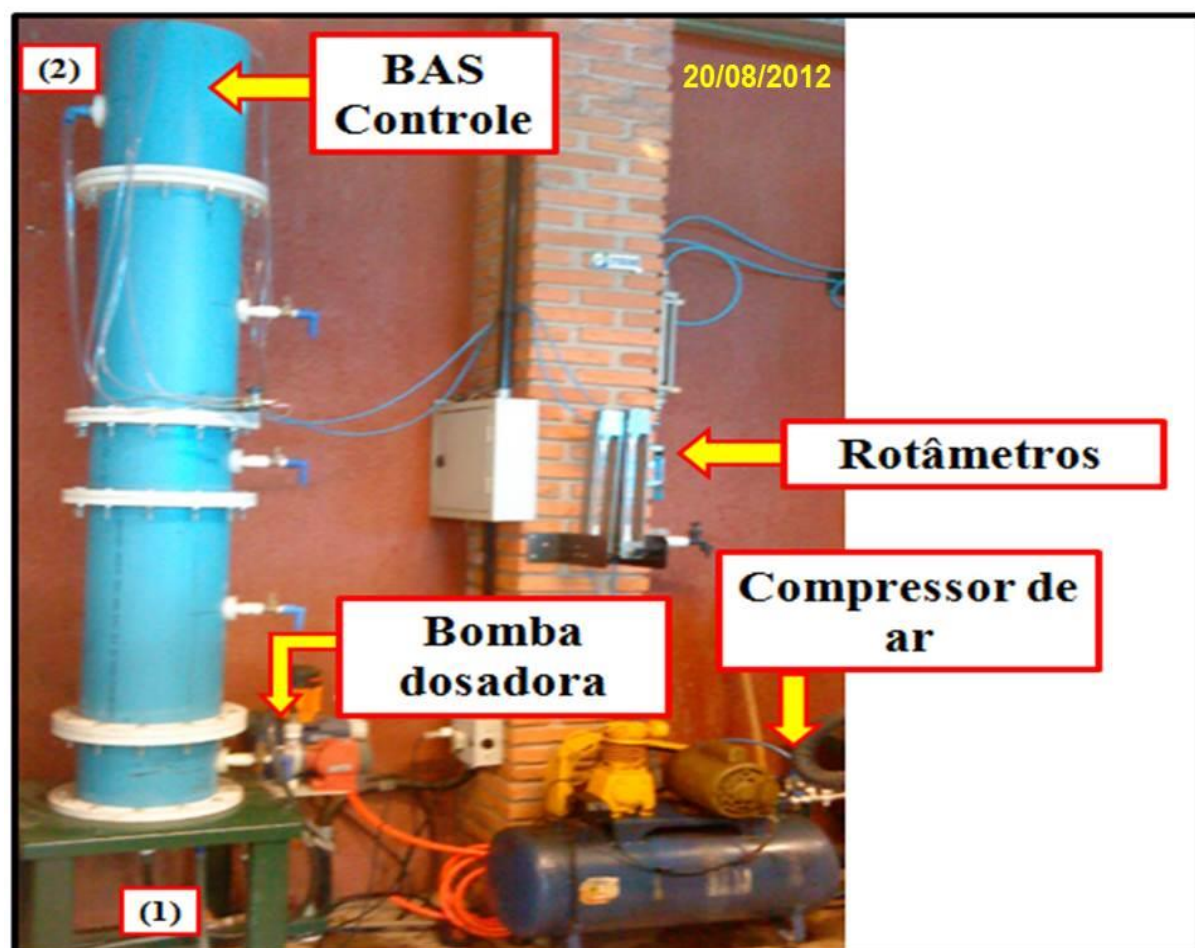


**Figura 18** -Biofiltro aerado submerso: (1) módulo 1; (2) módulo 2; (3) módulo 3; (4) módulo 4; (5) visores; (6) registro de alimentação; (7) registro de descarga; (8) anéis “Raschig” como material suporte; (9) placa perfurada com 4 mangueiras para distribuição de ar. Fotos da autora.



O ar comprimido foi distribuído no reator pelo uso de pedras porosas alocadas nos módulos 1 e 3. A vazão de ar foi ajustada de maneira que a concentração de oxigênio dissolvido no reator fosse no mínimo  $2 \text{ mg L}^{-1}$ .

O BAS controle, alimentado apenas com esgoto sanitário e mostrado na Figura 19, foi construído similarmente ao primeiro BAS. Seu volume útil, contudo, foi de 75 L, porque na ocasião de sua construção só havia disponibilidade de um tubo de PVC de menor diâmetro, em relação ao primeiro reator.



**Figura 19** – Biofiltro aerado submerso (BAS) controle: (1) ponto de coleta do afluente; (2) ponto de coleta do efluente tratado. Foto da autora.

#### 4.4 ANÁLISES FÍSICO-QUÍMICAS, ESPECTROSCÓPICAS E EXAMES MICROBIOLÓGICOS

As análises físico-químicas foram realizadas de acordo com APHA-AWWA (2005) e são apresentadas na Tabela 2.

**Tabela 2** - Análises físico-químicas e frequência de monitoramento dos reatores (continua).

| Variável   | Método - APHA-AWWA   | Frequência |
|--|--|------------|
| Alcalinidade ( $\text{mgCaCO}_3 \text{L}^{-1}$ )                               | Titulométrico (2320 –B)                                    | Semanal    |
| N-NTK <sub>total</sub> ( $\text{mgN L}^{-1}$ )                                 | Macro-Kjeldahl (4500 – Norg – B)                           | Semanal    |
| Condutividade ( $\mu\text{S cm}^{-1}$ )  | Método de laboratório - célula de condutividade (2510 – A) | Semanal    |
| DBO <sub>5,20</sub> ( $\text{mgO}_2 \text{L}^{-1}$ )                           | Respirométrico (5210 – D)                                  | Quinzenal  |
| DQO <sub>total</sub> ( $\text{mgO}_2 \text{L}^{-1}$ )                          | Colorimétrico (5220 – D)                                   | Semanal    |
| Carbono orgânico total ( $\text{mgC L}^{-1}$ )                                 | Combustão a elevada temperatura (5310 –B)                  | Semanal    |
| P- $\text{PO}_4^-$ ( $\text{mgPO}_4^- \text{L}^{-1}$ )                         | Colorimétrico (4500-P – E e J)                             | Semanal    |
| Índice Volumétrico de Lodo (IVL)   | Gravimétrico (2710 D)                                      | Semanal    |
| Metais ( $\text{mg L}^{-1}$ ): As, Ba, Cd, Zn, Pb, Hg, Mo, Ni, Fe, Se, Cu e Cr | Espectrometria de absorção atômica com chama (3111 B e D)  | Mensal     |
| N- $\text{NO}_2^-$ ( $\text{mgN L}^{-1}$ )                                     | Colorimétrico/FIA (4500 – $\text{NO}_3^-$ – B/I)           | Semanal    |
| N- $\text{NO}_3^-$ ( $\text{mgN L}^{-1}$ )                                     | Espectrofotométrico UV/FIA (4500 – $\text{NO}_3^-$ – B/I)  | Semanal    |
| N-amoniaco ( $\text{mgN L}^{-1}$ )   | Titulométrico (4500 – $\text{NH}_3$ –C)                    | Semanal    |

**Tabela 2** – Continuação.

| <b>Variável</b>  | <b>Método – APHA-AWWA</b>              | <b>Frequência</b> |
|--|--|-------------------|
| Oxigênio dissolvido (mg L <sup>-1</sup> )                                | Eletrodo de membrana (4500-G)          | Diário            |
| pH   | Eletrométrico (4500 – H <sup>+</sup> ) | Diário            |
| Série de sólidos – ST, SF, SV,<br>SST, SSF e SSV – (mg L <sup>-1</sup> ) | Gravimétrico – APHA (2540 – B, D e E)  | Semanal           |
| Temperatura (°C)   | Método de laboratório (2550 – B)       | Diário            |

Os exames microbiológicos foram realizados em microscópio óptico comum, visando a identificação da morfologia dos microrganismos e acompanhamento microscópico das sucessões do sistema de lodos ativados e dos biofiltros, de acordo com Povinelli et al. (1989). A frequência para esses exames foi semanal.

#### **4.4.1 Aplicação do método tentativo “equivalente em ácido húmico” (Eq.AH)**

A aplicação do método tentativo “Eq.AH” foi realizada nas amostras dos afluentes e efluentes, de acordo com a metodologia descrita no subitem 4.1.1.4.

#### **4.4.2 Análise espectroscópica: infravermelho com transformada de Fourier**

O preparo das amostras para análise de infravermelho incluiu o procedimento de liofilização. Cerca de 1 mg da amostra liofilizada foi misturada a 100 mg de KBr para

confeção das pastilhas que sobre as quais incidia a radiação na região do infravermelho na faixa de 400 a 4000  $\text{cm}^{-1}$ . Essa análise foi realizada no IQSC-USP, em um espectrofotômetro de infravermelho com transformada de Fourier, da marca BOMEM B-102.

#### ***4.4.3 Método proposto para quantificação do carbono no teste de coloração com nanquim***

Para monitoramento do carbono não assimilado pela biomassa dos reatores, foi realizado o teste de coloração com nanquim (Jenkins et al., 2003) associado ao método proposto nesta Tese (descrito no subitem 3.1.1.4) para quantificação do carbono solúvel, em função da classificação dos tons observados nas lâminas.

#### ***4.4.4 Análise molecular: extração de DNA e amplificação por reação de polimerização em cadeia (PCR)***

A análise molecular se deu pelas técnicas reação de polimerização em cadeia/eletroforese em gel por gradiente desnaturante (PCR/DGGE), que permitiram a avaliação da diversidade de microrganismos nas melhores condições operacionais avaliadas.

A extração de DNA foi realizada de acordo com o protocolo descrito por Griffiths et al. (2000). Na PCR foram utilizados os *primers* 968FGC e 1392R específicos para o fragmento de DNAr 16S, para o domínio Bacteria (Nielsen et al., 1999). Para o domínio



Eukarya, foram utilizados os *primers* 1427FGC e 1616R, específicos para o fragmento de DNAr 18S (van Hannen et al., 1998).

A PCR foi realizada de acordo com o procedimento modificado de van Hannen et al. (1998): 1 ciclo de desnaturação a 94°C por 5 min, seguido de 30 ciclos a 94°C por 0,5 min, 56°C por 0,5 min e 72°C por 1.5 min, com ciclo final de 72°C por 7 min. Os gradientes desnaturantes uréia e formamida foram, respectivamente, 45 % e 65 % para o domínios Bacteria e 40 % e 55 % para o domínio Eukarya. A eletroforese se deu a 75 V por 16 h (Hannen et al., 1998), e a análise do gel foi realizada pelo software *BioNumerics Version 2.5*.

Para análise de similaridade entre as amostras, foram construídos dendrogramas a partir dos coeficientes de Pearson. Para análise da diversidade dos domínios Bacteria e Eukarya, utilizou-se o índice de Shannon-Wiener (IS), que foi calculado pela Equação 9:

$$IS = -\sum(P_i \ln(P_i)), \quad (\text{Equação 9})$$

onde  $P_i$  é a probabilidade da banda em uma linha de corrida do gel, calculada por:

$$P_i = n_i/N, \quad (\text{Equação 10})$$

em que  $n_i$  é altura de um pico individual e  $N$  soma de todas as alturas dos picos nas curvas densiométricas (Abreu et al., 2010).

#### 4.5 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

Para melhor observar as eficiências dos reatores, aplicou-se o teste de hipótese ANOVA (*Analysis of Variance*). Com esse teste foi possível verificar se as diferenças entre as médias de dois ou mais experimentos eram significativas ou devidas ao acaso. Definindo-se o nível de significância de interesse ( $\alpha$ ), como 0,05 ou 0,01, por exemplo, verificou-se a resposta do teste comparando os valores de F (distribuição de Fisher) calculado e tabulado (F crítico). Sendo F calculado superior ao F tabulado, a diferença entre as médias não era devida ao acaso; do contrário, as médias foram consideradas estatisticamente iguais (Moore, 1995).

Além do teste ANOVA, foi utilizada a Análise de Componentes Principais (PCA – *principal component analysis*), que consiste de uma técnica matemática capaz de reduzir as dimensões da matriz de dados, facilitando o reconhecimento de padrões (Brereton, 2003).

A aplicação desse método em estudos sobre o tratamento biológico de águas residuárias foi considerada bem sucedida (Ferraz et al., 2009) e, nesta Tese, foi aplicada para identificação das condições operacionais e parâmetros físico-químicos que mais influenciaram o desempenho dos reatores aeróbios.

Nos ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada, os dados foram autoescalados e organizados em uma matriz. As variáveis utilizadas foram DQO solúvel, COT, eficiência de nitrificação (nitrif) e proporções volumétricas de lixiviado (PV (%)). As combinações de águas residuárias foram utilizadas como variável classe, da seguinte forma: lixiviado bruto/esgoto sanitário (LBr/ES), classe 1; lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário (LPT/ES), classe 2; lixiviado bruto/efluente anaeróbio (LBr/EA), classe 3; e lixiviado pré-tratado/efluente anaeróbio (LPT/EA), classe 4.

Nos ensaios com os reatores de lodos ativados e biofiltros em escala piloto, os dados também foram autoescalados e organizados em uma matriz. As variáveis utilizadas foram

COD, DBO, DQO solúvel, eficiência de nitrificação (nitrif) e proporções volumétricas (PV (%)). A variável classe foi a concentração de amônia livre ( $\text{NH}_3$ ) e os dados foram organizados da seguinte forma: de 0 a  $0,5 \text{ mgNH}_3 \text{ L}^{-1}$ , classe 1; de  $0,5$  a  $2 \text{ mgNH}_3 \text{ L}^{-1}$ , classe 2; de  $2$  a  $3 \text{ mgNH}_3 \text{ L}^{-1}$ , classe 3. Os valores foram estabelecidos de acordo com a concentração calculada de amônia livre, no decorrer do monitoramento dos reatores, utilizando as Equações 1 e 2.

## 5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

Devido ao grande número experimentos realizados, os resultados obtidos foram apresentados em função dos dois subprojetos que constituíram esta Tese.

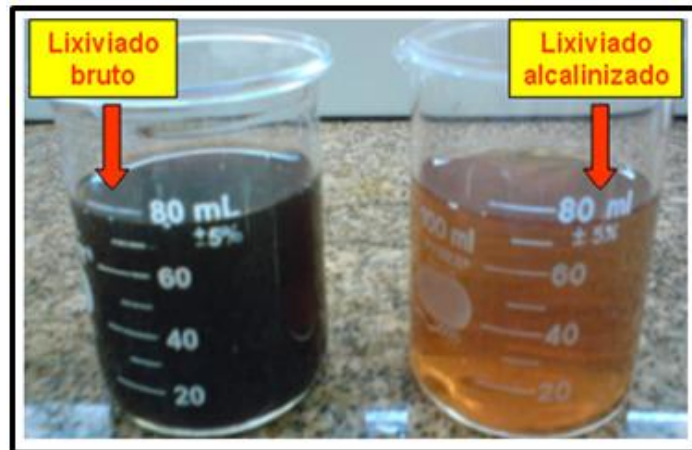
### 5.1 TRATAMENTO CONSORCIADO DO LIXIVIADO COM ESGOTO SANITÁRIO EM SISTEMAS AERÓBIOS

Nessa seção os resultados serão apresentados e discutidos na seguinte ordem: pré-tratamento do lixiviado por “air stripping”; caracterização físico-química, espectroscópica (infravermelho por transformada de Fourier) e microscópica (microscopia eletrônica de varredura) das águas residuárias; ensaios realizados com o reator de lodos ativados em escala de bancada; e ensaios realizados com os reatores de lodos ativados e biofiltros aerados submersos, ambos em escala piloto e alimentados continuamente.

#### 5.1.1 *Pré-tratamento do lixiviado de aterro sanitário por “air stripping” e absorção*

Como não houve nova coleta de lixiviado no aterro sanitário entre a execução das bateladas e ensaios em escala piloto, não houve alterações importantes na alcalinidade dessa água residuária. Dessa forma, o consumo de cal foi praticamente o mesmo para ajustar o pH

do lixiviado de cada batelada: cerca de 25 g de cal por litro de lixiviado. Após agitação e sedimentação do lodo gerado, houve mudança na cor do sobrenadante (Figura 20).



**Figura 20** – Remoção de cor do lixiviado bruto após o ajuste de pH com cal. Fonte: Ferraz, 2010.

Operou-se a torre de “air stripping” até que a concentração de NAT no lixiviado fosse cerca de 100-150 mg L<sup>-1</sup>. Esse valor foi determinado ao se adicionar o lixiviado pré-tratado ao esgoto sanitário nas proporções volumétricas avaliadas (0 a 5 %): a concentração de NAT nessa mistura foi próxima daquela encontrada no esgoto sanitário e no efluente do reator anaeróbio compartimentado.

Fixando concentração final de NAT em torno de 100 mg L<sup>-1</sup>, a eficiência da torre de “air stripping” variou de 60 a 80 % (Tabela 3). Nas torres de absorção, a eficiência de recuperação do NAT como aquamônia variou de 57 a 90 % (Tabela 3).

Ferraz (2010) observou que a frequência de substituição do líquido absorvente influenciou a eficiência da absorção do NAT. Atingida a saturação, foi praticamente nula a neutralização do NAT continuamente borbulhado nessas torres de absorção.

Com a constante injeção de ar pode ocorrer o arraste ou dessorção do NAT que havia sido previamente neutralizado, reduzindo a eficiência total de recolhimento. Dessa forma, a

água das torres de absorção foi substituída diariamente em cada batelada. Em todas as bateladas, o pH da água de torneira foi próximo a 6,5.

Nas duas torres de absorção a variação de pH com a neutralização do NAT foi de 6,5 a 10, após 24 h de operação. A saturação do meio se deu para valores de pH próximos a 10. Portanto, uma vez atingido esse valor as torres de absorção eram esvaziadas, lavadas e recarregadas com 20 L de água de torneira (pH 6,5).

Para fins de comparação, são apresentados na Tabela 4 os resultados de publicações relevantes sobre o tratamento do lixiviado por “air stripping”. Nas publicações citadas, tanto o volume de lixiviado a ser tratado quanto a massa de amônia removida foram muito inferiores aos valores utilizados nas bateladas desta Tese. Consequentemente, os trabalhos citados apresentam maior coeficiente de transferência de massa.

No trabalho de Pi et al.(2009), por exemplo, o lixiviado foi aquecido a 50°C e a vazão de ar empregada foi 15 vezes superior a desta Tese, enquanto a massa de amônia a ser removida foi praticamente igual à massa média de NAT das bateladas realizadas. Os resultados desta Tese consistiram de condições operacionais mais eficazes e econômicas, devido ao menor consumo de ar e uso de lixiviado à temperatura ambiente.

Salienta-se que, exceto pelo trabalho de Ferraz et al. (2013) em nenhuma das referências citadas houve recolhimento da amônia e, exceto pelos trabalho de Ferraz et al. (2013) e Souto (2009), o processo de “air stripping” se deu em pequenos recipientes simulando tanques ao invés de torres recheadas.

**Tabela 3** – Desempenho das torres de “air stripping” e de absorção, utilizadas para remoção e recolhimento da amônia removida do lixiviado pré-tratado com cal (pH 11), após 72 h de aeração.

| Torre de “air stripping” |                      |                      |                        |                       |              |                    |                    | Torres de absorção  |         |         |                    |
|--------------------------|----------------------|----------------------|------------------------|-----------------------|--------------|--------------------|--------------------|---------------------|---------|---------|--------------------|
| Vol.lix                  | Qar                  | Qlix                 | NAT <sub>inicial</sub> | NAT <sub>final</sub>  | Massa<br>NAT | k <sub>L</sub> a   | NAT <sub>REM</sub> | Meio de<br>absorção | Torre 1 | Torre 2 | NAT <sub>REC</sub> |
| (L)                      | (L h <sup>-1</sup> ) | (L h <sup>-1</sup> ) | (mg L <sup>-1</sup> )  | (mg L <sup>-1</sup> ) | (g)          | (h <sup>-1</sup> ) | (%)                |                     |         | (%)     |                    |
| 100                      | 4 500                | 90                   | 520                    | 150                   | 1,5          | 0,017              | 71                 | Água                | 57      | 33      | 90                 |
| 100                      | 4 500                | 90                   | 420                    | 80                    | 0,8          | 0,023              | 81                 | Água                | 50      | 30      | 80                 |
| 100                      | 4 500                | 90                   | 520                    | 150                   | 1,5          | 0,017              | 71                 | Água                | 57      | 33      | 90                 |
| 100                      | 4 500                | 90                   | 283                    | 9                     | 0,09         | 0,048              | 66                 | Água                | 39      | 38      | 77                 |
| 100                      | 4 500                | 90                   | 456                    | 178                   | 1,78         | 0,017              | 61                 | Água                | 45      | 18      | 63                 |
| 100                      | 4 500                | 90                   | 541                    | 95                    | 0,95         | 0,024              | 82                 | Água                | 41      | 19      | 57                 |
| 100                      | 4 500                | 90                   | 380                    | 135                   | 1,35         | 0,014              | 64                 | Água                | 40      | 19      | 59                 |

Vol.: volume; Lix.: lixiviado; NAT: nitrogênio amoniacal total; Qar: vazão de ar; Qlix: vazão de lixiviado; k<sub>L</sub>a: coeficiente de transferência de massa.

**Tabela 4** - Exemplos de aplicação do processo de “air stripping” para remoção da amônia do lixiviado de aterro sanitário.

| Referência                | pH | Vol. | T    | Qar                  | Massa de NAT | NAT <sub>0</sub>      | NAT <sub>f</sub> | Remoção do NAT     | k <sub>La</sub> | Tempo |
|---------------------------|----|------|------|----------------------|--------------|-----------------------|------------------|--------------------|-----------------|-------|
|                           |    | (L)  | (°C) | (L h <sup>-1</sup> ) | (g)          | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)              | (h <sup>-1</sup> ) | (h)             |       |
| Marttinen et al. (2002)   | 11 | 1,0  | 20   | 2                    | 0,15         | 150                   | 89               | 41                 | 0,0212          | 24    |
| Gotvajn et al. (2009)     | 11 | 0,8  | N.I  | 120                  | 1,84         | 2 300                 | 460              | 80                 | 0,0322          | 50    |
| Pi et al. (2009)          | 11 | 10   | 50   | 70 000               | 12,43        | 1 243                 | 198              | 89                 | 0,0765          | 24    |
| Souto et al. (2008)       | 12 | 12   | 25   | 3 600                | 22,8         | 1 900                 | 0                | 100                | 0,0684          | 144   |
| Cotman and Gotvajn (2010) | 11 | 1    | N.I  | 120                  | 0,48         | 480                   | 50               | 90                 | 0,0942          | 24    |
| Guo et al. (2010)         | 11 | 10   | N.I  | 900                  | 13,5         | 1 350                 | 150              | 89                 | 0,1221          | 18    |
| Nurisepehr et al. (2012)  | 10 | 2    | N.I  | 1 500                | 2,96         | 1 480                 | 1 000            | 32                 | 0,0131          | 30    |
| Ferraz et al. (2013)      | 11 | 12   | 25   | 1 600                | 23,44        | 1 953                 | 20               | 99                 | 0,0154          | 288   |

Qar: vazão de ar; Af: afluente; Ef: efluente; Vol. lix: volume de lixiviado tratado; NAT: nitrogênio amoniacal total; Rem: remoção; k<sub>La</sub>: coeficiente de transferência de massa.; N.I: não informado.



Quanto à concentração de metais, a adição de cal resultou em elevada remoção de metais presentes no lixiviado bruto: a eficiência foi de 80-90 %, principalmente para ferro, zinco e manganês (Tabela 5). A concentração de metais tanto no lodo de cal quando no lixiviado alcalinizado (pH 11) foi inferior ao limite máximo determinado pelas Resoluções CONAMA 397/08 (atualizada pela Resolução 430/11) e 375/06.

**Tabela 5** – Concentração total de metais nos lixiviados bruto e alcalinizado (pH 11), na cal utilizada para ajuste de pH e no lodo de cal.

| Metais | LBr  | LAlc | Resolução          |     | Lodo                | Resolução |
|--------|------|------|--------------------|-----|---------------------|-----------|
|        |      |      | CONAMA             | Cal |                     | CONAMA    |
|        |      |      | 430/11             |     |                     | 380/06    |
|        |      |      | mg L <sup>-1</sup> |     | mg kg <sup>-1</sup> |           |
| Zn     | 0,5  | 0,1  | 5                  | 5   | 17                  | 2800      |
| Pb     | 0,2  | 0,1  | 0,5                | 64  | 66                  | 300       |
| Cd     | 0,02 | 0,01 | 0,2                | 6   | 7                   | 39        |
| Ni     | 0,3  | 0,2  | 2                  | 14  | 18                  | 420       |
| Fe     | 3,8  | 0,4  | 15                 | 142 | 240                 | ND        |
| Mn     | 0,1  | 0,02 | 1                  | 20  | 22                  | ND        |
| Cu     | 0,1  | 0,03 | 1                  | 8   | 8                   | 1500      |
| Cr     | 0,3  | 0,1  | 0,5                | 11  | 18                  | 1000      |

ND: não determinado; LBr: lixiviado bruto; LAlc: lixiviado alcalinizado (pH 11).

### **5.1.2 Caracterização físico-química, espectroscópica e microscópica das águas residuárias**

Na Tabela 6 é apresentada a caracterização físico-química das águas residuárias utilizadas nos ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada: lixiviados bruto e pré-tratado por “air stripping”, esgoto sanitário e efluente do reator anaeróbio compartimentado.

**Tabela 6** - Caracterização físico-química das águas residuárias utilizadas nesta pesquisa: lixiviado bruto, lixiviado alcalinizado, lixiviado pré-tratado por “air stripping”, esgoto sanitário e efluente anaeróbio.

| Variável   | Lixiviado bruto |       | Lixiviado pré-tratado |       | Esgoto sanitário |      | Efluente anaeróbio |     |
|--|-----------------|-------|-----------------------|-------|------------------|------|--------------------|-----|
|  | Min             | Máx   | Min                   | Máx   | Min              | Máx  | Min                | Máx |
| pH   | 8,3             | 9,0   | 9,3                   | 9,5   | 6,4              | 7,6  | 6,5                | 7,3 |
| Alcalinidade total (mg CaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> ) | 6000            | 7570  | 2649                  | 5000  | 111              | 200  | 132                | 200 |
| Condutividade (µS cm <sup>-1</sup> )                       | 14800           | 28300 | 8450                  | 12300 | 363              | 505  | -                  | -   |
| DBO <sub>5,20</sub> (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )    | 433             | 588   | 218                   | 304   | 115              | 269  | 94                 | 115 |
| DQO <sub>bruta</sub> (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> )   | 4425            | 4860  | 2772                  | 3900  | 216              | 440  | 156                | 241 |
| NTK (mg L <sup>-1</sup> N)                                 | 920             | 977   | 12                    | 250   | 29               | 50   | 37                 | 43  |
| NAT (mg L <sup>-1</sup> N)                                 | 790             | 821   | 9                     | 150   | 27               | 37   | 31                 | 38  |
| N-orgânico (mg L <sup>-1</sup> )                           | 130             | 156   | 3                     | 100   | 2                | 13   | 3                  | 5   |
| N-NO <sub>2</sub> (mg L <sup>-1</sup> N)                   | 0,07            | 0,3   | 0                     | 0,1   | 0,07             | 0,3  | 0,07               | 0,3 |
| N-NO <sub>3</sub> (mg L <sup>-1</sup> N)                   | 0               | 0     | 0                     | 0     | 0                | 0    | 0                  | 0   |
| ST(mg L <sup>-1</sup> )                                    | 8446            | 15980 | 6558                  | 9140  | 562              | 1078 | 250                | 556 |
| STV(mg L <sup>-1</sup> )                                   | 4974            | 8447  | 5749                  | 6976  | 120              | 390  | 90                 | 356 |
| STF(mg L <sup>-1</sup> )                                   | 3472            | 7533  | 2118                  | 3778  | 172              | 202  | 156                | 200 |
| SDT (mg L <sup>-1</sup> )                                  | 8247            | 15565 | 6248                  | 8700  | 495              | 1003 | 183                | 470 |

(\*) Min: valores mínimos; Máx: valores máximos.

O lixiviado bruto utilizado nessa pesquisa pode ser classificado como velho em função do baixo teor de matéria orgânica biodegradável (relação DBO/DQO entre 0,09 e 0,12), e elevada concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) e de NAT.

A DQO do lixiviado pré-tratado foi até 40 % menor do que a do lixiviado bruto, porém, essa remoção não foi devida a atividade de microrganismos na torre de “air stripping” e sim pela precipitação de matéria orgânica, causada pela adição de cal ao lixiviado bruto. Do contrário, a concentração de nitrato no lixiviado pré-tratado, por exemplo, não teria sido igual

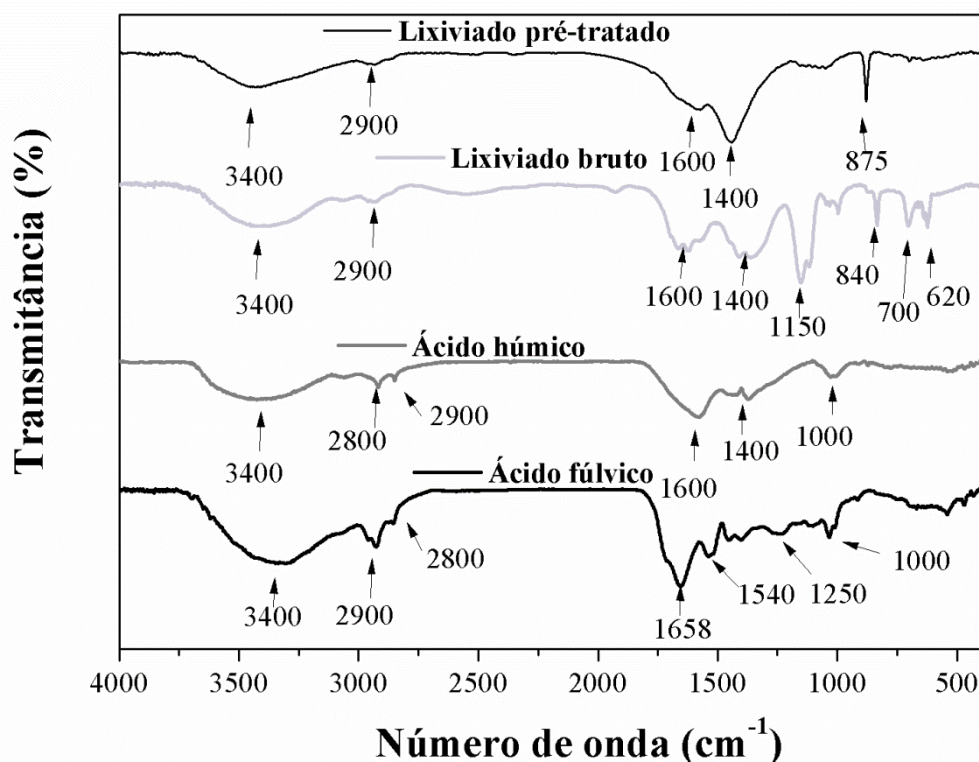
a zero (Tabela 6). Portanto, confirma-se que o NAT foi removido exclusivamente pelo arraste com ar, observação também realizada por Souto et al. (2008).

Próximo da região de bombeamento do esgoto sanitário há um clube recreativo, que ao realizar a limpeza das piscinas lança toda a água na rede coletora, diluindo significativamente o esgoto sanitário. Por esse motivo, ao receber o esgoto já diluído, o reator anaeróbio compartimentado apresentou baixa eficiência de remoção da DQO, com valores entre 30 a 45 % (Tabela 6).

A identificação dos grupos funcionais presentes no lixiviado foi realizada pela análise qualitativa dos espectros de infravermelho com transformada de Fourier obtidos (Figura 21). Além dos lixiviados bruto e pré-tratado por “air stripping” foram também analisados o ácido húmico Sigma-Aldrich (P.A) e ácido fúlvico obtido em extrações realizadas no Instituto de Química de São Carlos-USP.

Para melhor comparação dos espectros obtidos, as principais bandas de absorção foram indicadas na Figura 21 e na Tabela 7 tem-se descrição do tipo de vibração e grupo funcional associados à essas bandas. Devido à semelhança entre os espectros, principalmente para as bandas indicadas, há indícios da presença dos ácidos húmico e fúlvico no lixiviado bruto utilizado nesta pesquisa.

Observam-se em todos os espectros a presença de compostos aromáticos pelas bandas  $3400\text{ cm}^{-1}$  (OH de álcoois e fenóis),  $2900\text{ cm}^{-1}$  (estiramento de ligação CH de cadeias alifáticas) e  $1600\text{ cm}^{-1}$  (C=C de anéis aromáticos). Os carboidratos, presentes em todas as amostras, são indicados pelas bandas  $1150\text{-}1100\text{ cm}^{-1}$  (estiramento C-O). Carbonatos foram identificados pela banda  $875\text{ cm}^{-1}$  e a amidas, pela banda  $840\text{-}700\text{ cm}^{-1}$  (Silverstein et al., 2005).



**Figura 21** - Comparação entre dos espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de lixiviado bruto, lixiviado pré-tratado, ácido húmico Sigma-Aldrich e ácido fúlvico extraído no Instituto de Química de São Carlos, com as principais bandas de absorção indicadas.

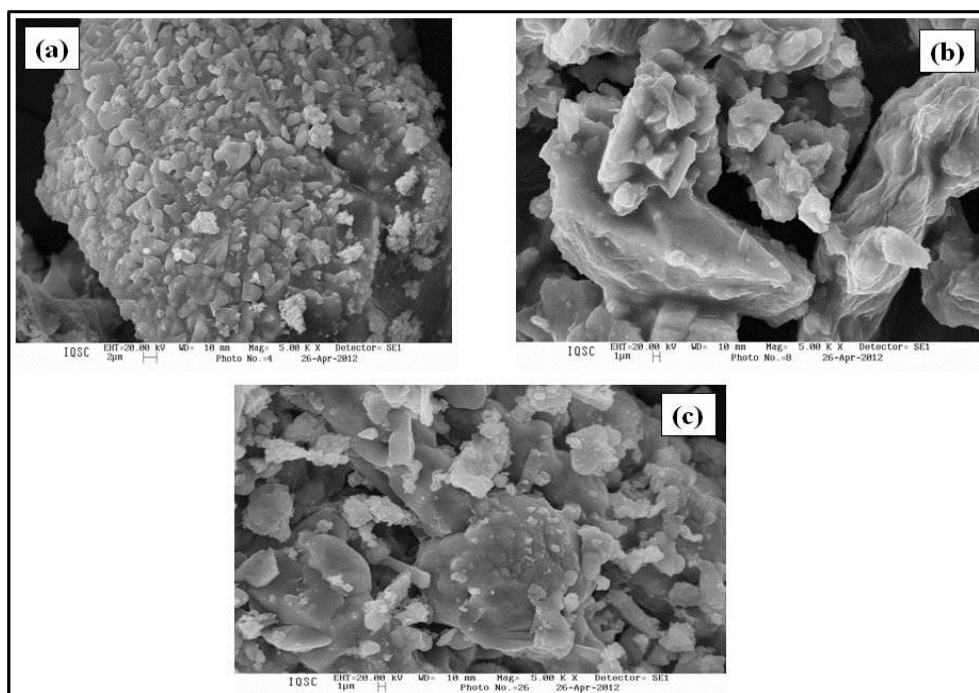
A adição de cal ao lixiviado bruto causou diminuição da intensidade de absorção da banda  $1600 \text{ cm}^{-1}$ , o que pode estar associado com a co-precipitação das substâncias húmicas devido à dissociação de seus grupos funcionais em pH 11, facilitando a ligação com íons  $\text{Ca}^+$  (Liao e Randtke, 1986; Renou et al., 2009). Houve também eliminação das bandas em torno de  $700\text{-}620 \text{ cm}^{-1}$ , referentes ao sulfato inorgânico. Com a reação entre os íons sulfato e cálcio da cal adicionada (Reação 1), tem-se a formação do sulfato de cálcio, que foi precipitado no lodo e removido do lixiviado alcalinizado.



**Tabela 7** – Principais bandas de absorção obtidas para as águas residuárias utilizadas (Barber et al., 2001; Bu et al., 2010; Mantsh e Chapman, 1996; Silverstein et al., 2005; Stevenson et al., 1994).

| <b>Região do infravermelho (cm<sup>-1</sup>)</b> | <b>Tipo de vibração e grupos funcionais</b>                     |
|--|---|
| 3 400  | Estiramento OH de álcool ou fenol                               |
| 2 900  | Estiramento C-H de cadeias alifáticas                           |
| 1 600  | Estiramento C=O de ácido carboxílico                            |
| 1 400  | Estiramento C=O do íon carboxilato                              |
| 1 150  | Estiramento C-O de carboidratos                                 |
| 1000-1050  | Estiramento S-O de ácido sulfônico                              |
| 875  | Deformação angular fora do plano C-O de carbonatos              |
| 650-690  | Deformação angular S-O de sulfato inorgânico                    |
| 1267   | Estiramento C-O de ácido carboxílico; estiramento C-N de amidas |
| 1520   | Deformação angular N-H de amidas                                |

As micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura (MEV) indicam que os lixiviados bruto e alcalinizado (pH 11) são constituídos de partículas não uniformes e com forma irregular (Figura 22). Na Figura 22a as partículas parecem estar bem agregadas, porém, com a elevação do pH do lixiviado a 11 as partículas tomaram formato laminar e parecem estar menos agregadas (Figura 22b). Na Figura 22c tem-se a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário 2 %, cuja estrutura apresenta-se laminar, porém, com agregados.



**Figura 22** – Micrografias obtidas por microscopia eletrônica de varredura, com aumento de 5 000 vezes, nas amostras de (a) lixiviado bruto, (b) lixiviado alcalinizado a pH 11 e (c) mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 2 %.

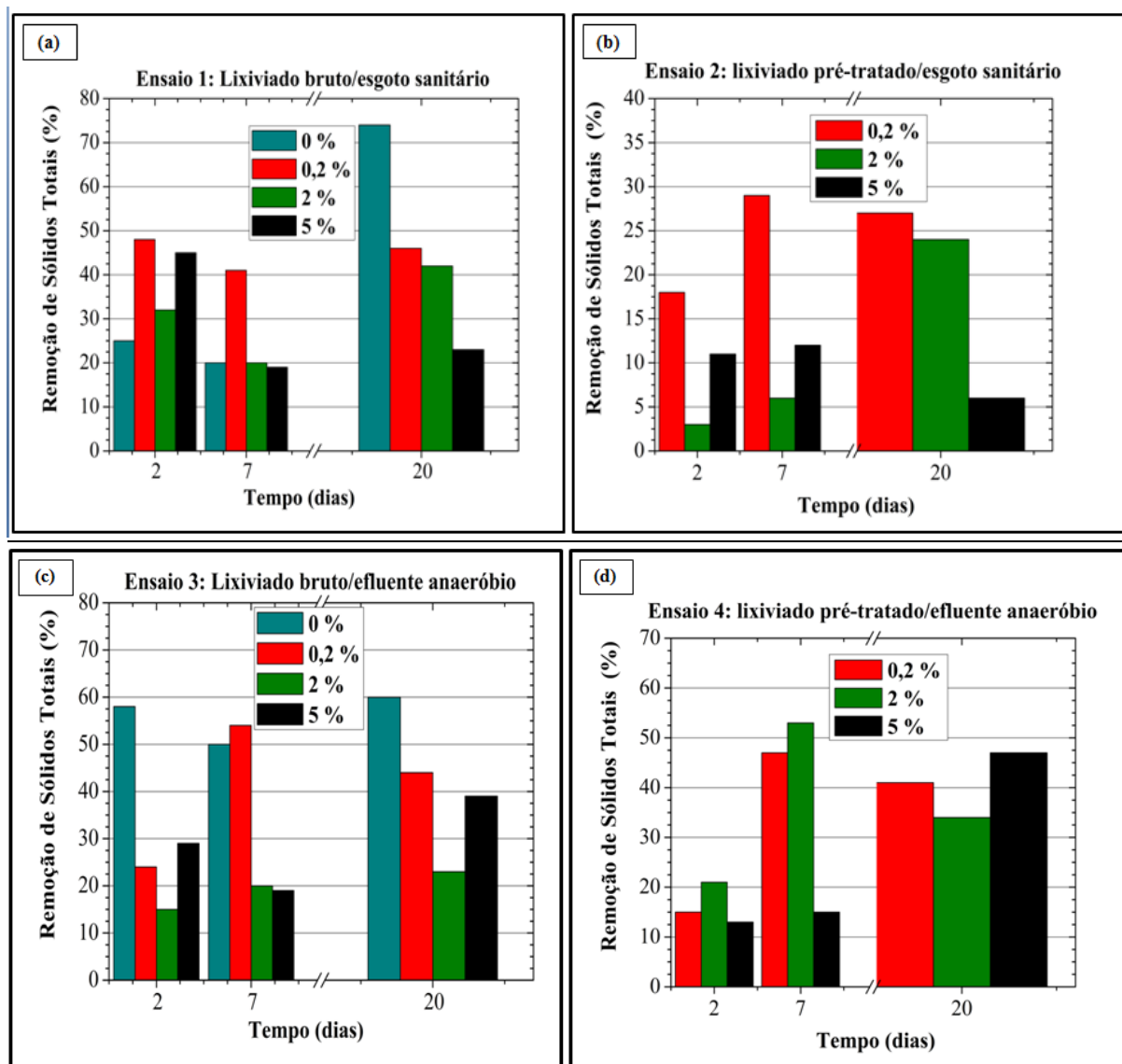
### ***5.1.3 Desempenho do reator de lodos ativados em escala de bancada no tratamento consorciado do lixiviado***

Nesta seção os resultados referentes à remoção de matéria orgânica e de nitrogênio serão apresentados e discutidos na seguinte ordem: série de sólidos, DBO, DQO, COT, “equivalente em ácido húmico”, NTK, NAT, nitrito e nitrato.

#### ***5.1.3.1 Série de sólidos nos ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada***

Os valores da concentração dos sólidos totais (ST) e fixos (SFT), medida no afluente e efluente dos reatores, no decorrer de 20 dias de operação, podem ser encontrados no Anexo A, enquanto as eficiências de remoção são mostradas na Figura 23.

Apesar das oscilações observadas nos 20 dias de operação dos reatores, houve uma tendência de decréscimo da remoção de ST e STV com o aumento das proporções volumétricas dos lixiviados bruto e pré-tratado em esgoto sanitário e efluente anaeróbio (Figura 23 e Tabelas A1-A12). Para os experimentos com esgoto sanitário (ensaios 1 e 2), os STV representaram 50 a 70 % dos ST das amostras de afluente dos reatores. Nos experimentos com efluente anaeróbio, 40 a 70 % dos ST no afluente dos reatores corresponderam aos STV.



**Figura 23** – Remoção dos sólidos totais pelo reator de lodos ativados em escala de bancada, após 20 dias de operação, nas condições experimentais dos ensaios (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4.

De acordo com os dados das Tabelas A13 a A16, o IVL esteve dentro da faixa indicadora de boa sedimentabilidade: nos reatores controle, operados apenas com esgoto sanitário ou efluente anaeróbio, o IVL variou de 40 a 80 mL g<sup>-1</sup>; para proporções volumétricas de lixiviado de 2 e 5 %, os maiores valores de IVL foram, respectivamente, 130 e 121 mL g<sup>-1</sup>. Esses resultados foram confirmados pelos exames microbiológicos, que indicaram baixa frequência de observações para microrganismos filamentosos.



Não se observou diferença na remoção dos sólidos suspensos voláteis (SSV) entre os ensaios com esgoto sanitário e efluente anaeróbio (Tabelas A17 a A20). Nos ensaios 2 e 4, para proporção volumétrica de 2 %, a remoção média dos SSV foi de 62 %; nos ensaios 1 e 3, para proporção volumétrica de 5 %, a remoção de SSV foi de 52 %.

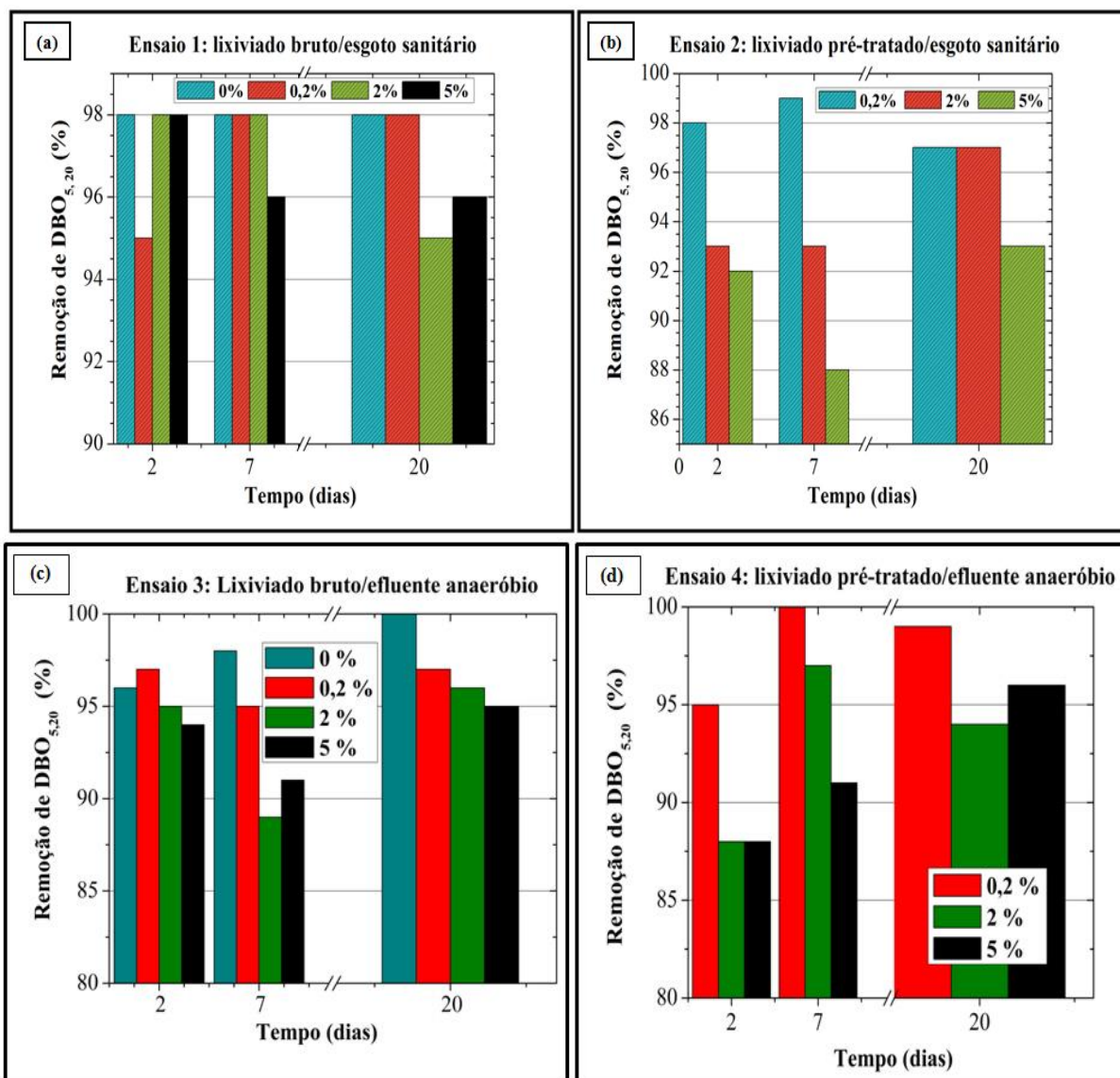
Nas Tabelas A21 a A24 são apresentadas as concentrações de sólidos dissolvidos totais (SDT) no afluente e efluente dos reatores. Em todos os ensaios, mais de 80 % dos ST consistiram de SDT. Dentre as características físico-químicas dos lixiviados de aterro sanitário, tem-se a elevada concentração de sólidos dissolvidos totais (Renou et al., 2008). A concentração máxima de SDT nos lixiviados bruto e pré-tratado por “air stripping” foi, respectivamente, 15565 e 8700 mg L<sup>-1</sup> (Tabela 6). Conseqüentemente, quanto maior a proporção volumétrica de lixiviado, maior a concentração de SDT. Após os 20 dias de aeração, a eficiência de remoção dos SDT foi muito próxima à eficiência de remoção dos ST.

#### *5.1.3.2 DBO, DQO e COT nos ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada*

As medidas de matéria orgânica expressas em DBO, COT, DQO total e solúvel, são apresentadas nas Figuras 24 a 27 e Tabelas A25 a A39.

Comparando-se a eficiência de remoção da matéria orgânica nos quatro ensaios, medida pela DBO (Tabelas A25-A28 e Figura 24) e pelo COT (Tabelas A29-A32 e Figura 25), nota-se que o a adição dos lixiviados bruto ou pré-tratado na proporção volumétrica de 0,2 % não causou interferências no tratamento aeróbio da mistura. Tais interferências

decorreriam dos constituintes do lixiviado, como os compostos orgânicos recalcitrantes, SDT e NAT.



**Figura 24** - Remoção da  $DBO_{5,20}$  bruta pelo reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias, nas condições experimentais dos ensaios (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4.

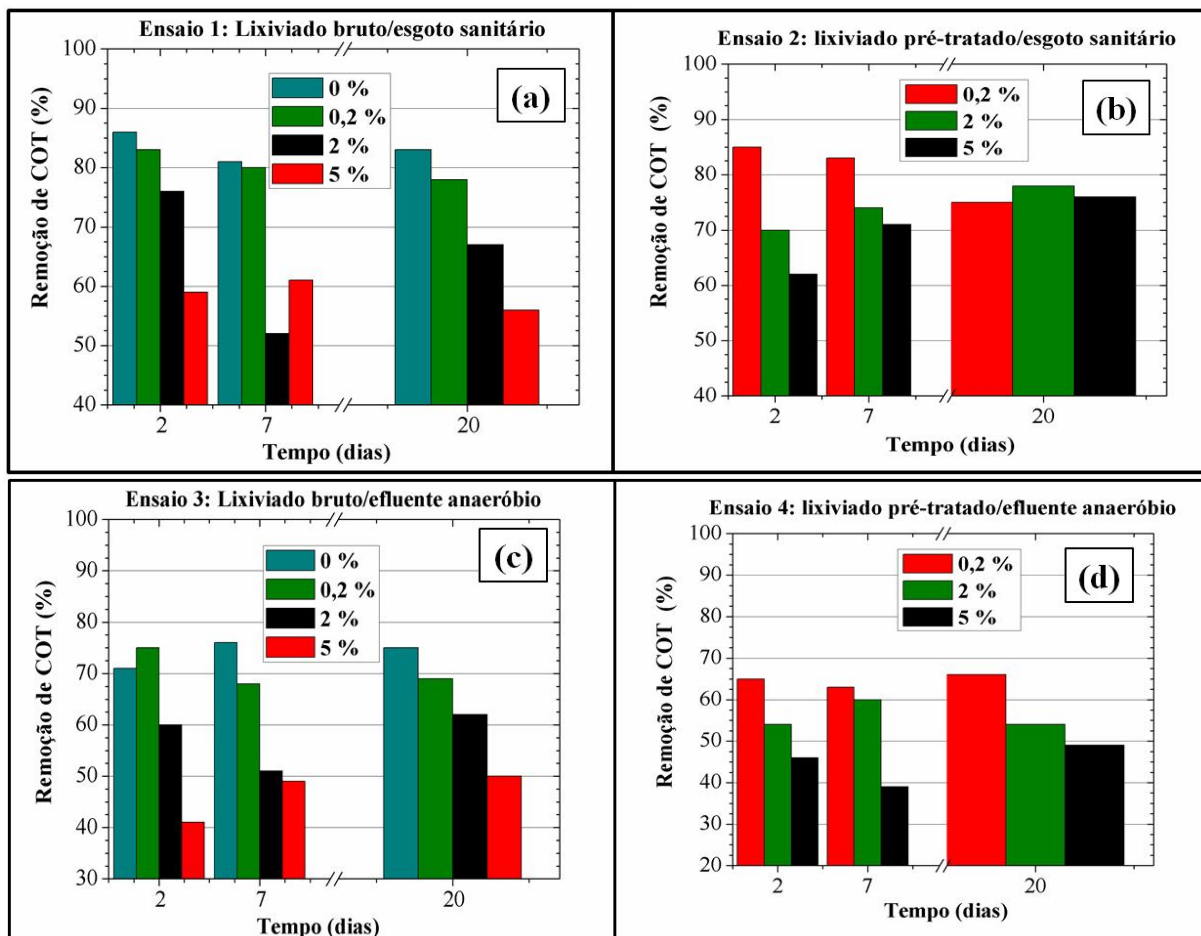
A remoção média da  $DBO$  nos reatores controle dos ensaios 1 (com esgoto sanitário) e 3 (com efluente anaeróbio) foi de 98 % (Figura 24). Nos quatro ensaios realizados, a eficiência de remoção da  $DBO$  variou de 93 a 98 % nos reatores alimentados com a mistura na proporção de 0,2 % (Figura 24).

Nos quatro ensaios, a DBO remanescente no efluente dos reatores de lodos ativados (Tabelas A25-A28 e Figura 24) foi maior na medida em que aumentaram as proporções volumétricas de lixiviado de 0,2 para 2 e 5 %. Quando os reatores foram alimentados nas proporções volumétricas de lixiviado de 2 e 5 %, a DBO média no efluente dos reatores foi bastante próxima:  $6 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  nos ensaios 1 e 3,  $10\text{-}12 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  no ensaio 2; e  $9 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  no ensaio 4. Em termos de eficiência, em todos os ensaios a remoção de DBO foi superior a 90 %.

A remoção do COT nos reatores controle alimentados com esgoto sanitário e efluente anaeróbio foi de, respectivamente, 83 e 74 %. Quando os reatores foram alimentados com lixiviados bruto e pré-tratado na proporção volumétrica de 0,2 %, a eficiência remoção do COT foi cerca de 80 % para os ensaios 1 e 2, e variou de 70 a 64 % para os ensaios 3 e 4 (Figura 25 e Tabelas A29 a A32).

Nos reatores alimentados com 2 % de lixiviado, a remoção média de COT nos ensaios 1, 2, 3 e 4, foi de, respectivamente: 65 %, 72 %, 58 % e 56 %. Nos reatores alimentados com lixiviado a 5 %, a remoção média de COT baixou para: 59 % no ensaio 1, 67 % no ensaio 2, 47 % no ensaio 3 e 45 % no ensaio 4.

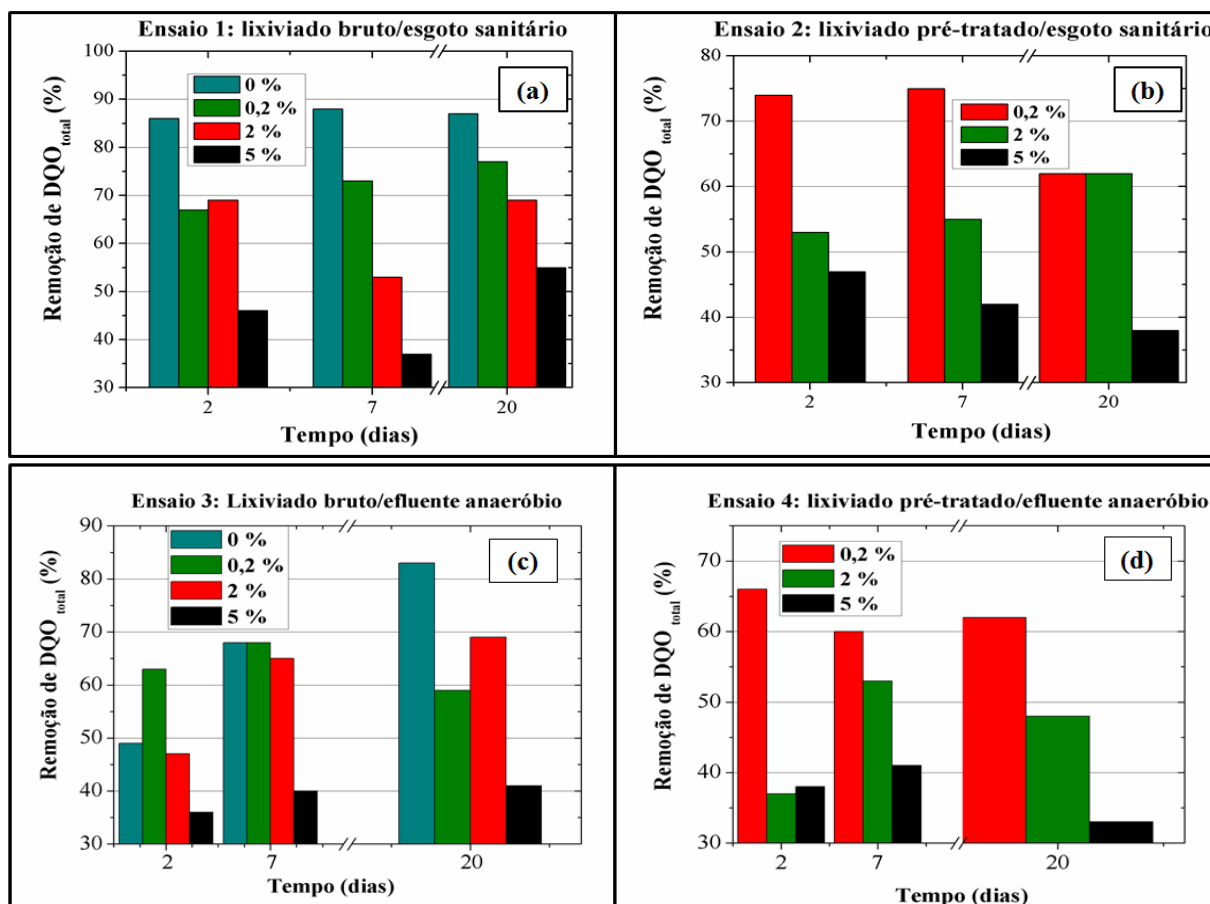
Constam nas Tabelas A33-A35 e Figura 26 os resultados da DQO total. No reator controle dos ensaios 1 e 2 (com esgoto sanitário) a remoção da DQO total foi 87 %, mas quando o lixiviado foi adicionado a 2 %, a remoção foi de 63 % no ensaio 1 e 57 % no ensaio 2. A interferência do lixiviado foi mais evidente nos reatores alimentados com a proporção volumétrica de 5 %: a remoção da DQO total foi de apenas 46 % no ensaio 1 e 42 % no ensaio 2. Ou seja, a eficácia dos reatores alimentados com lixiviado a 5 % foi 50 % menor em relação aos reatores controle.



**Figura 25-** Remoção do COT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias, nas condições experimentais dos ensaios (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4.

Nos ensaios com efluente anaeróbio, a remoção da DQO total no reator controle foi de 67 %. Essa menor eficiência em relação ao ensaio 1 foi devida à diferença na DQO total no afluente dos reatores:  $300 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  para o esgoto sanitário e  $200 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  efluente anaeróbio.

A remoção da DQO total no ensaio 3 foi de 60 % para proporções volumétricas de 2 % e de 39 % para proporção volumétrica de 5 %; no ensaio 4, 46 % para proporção volumétrica de 2 % e 37 % para proporção volumétrica de 5 %. Como nos ensaios 1 e 2, a eficiência dos reatores alimentados com 5 % de lixiviado foi reduzida pela metade em relação ao reator controle.

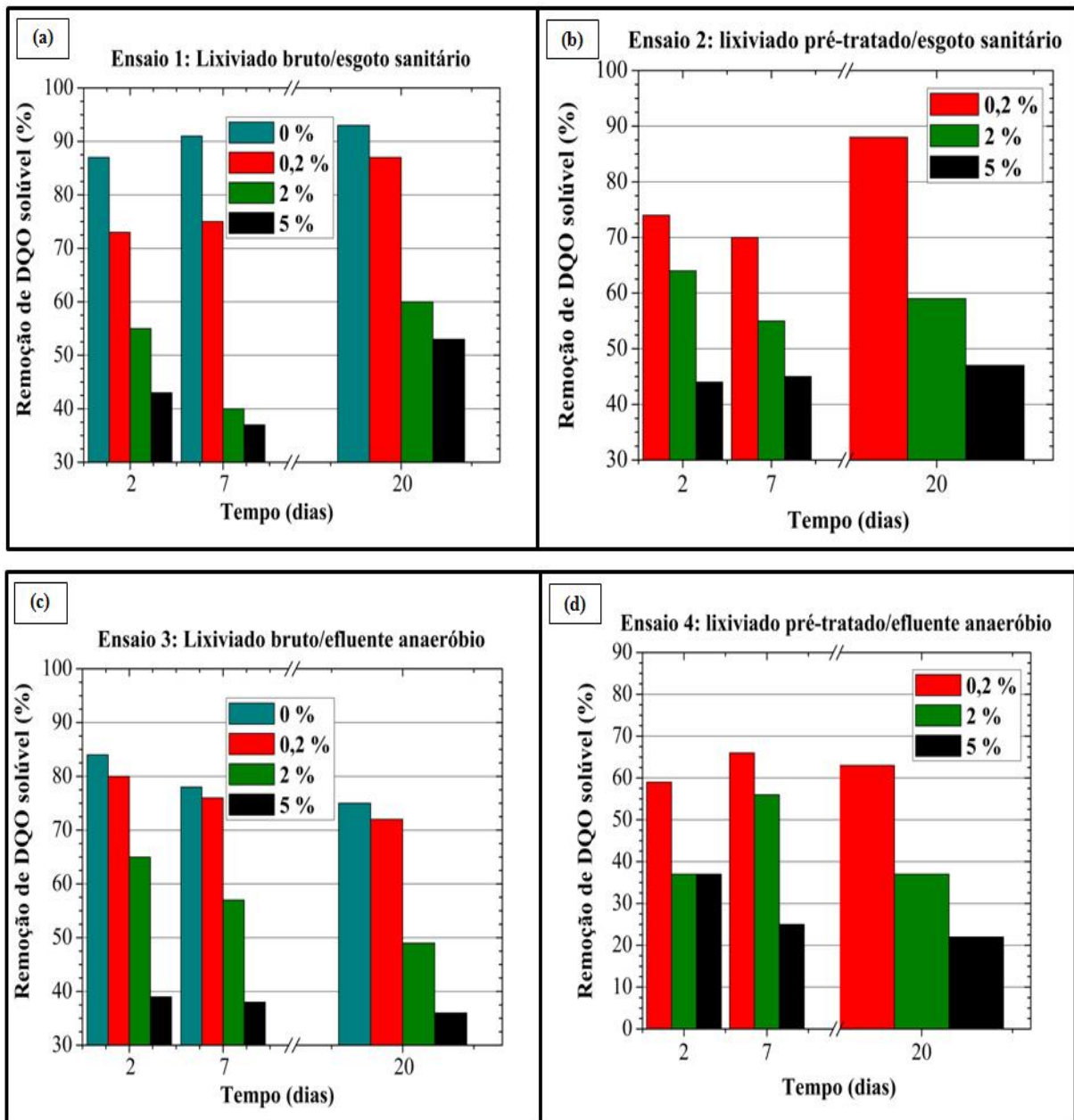


**Figura 26** - Remoção da DQO total pelo reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias, nas condições experimentais dos ensaios (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4.

Salienta-se que os pré-tratamentos das águas residuárias implicaram na degradação ou remoção parcial da matéria orgânica. A DQO total do efluente anaeróbico foi pelo menos 30 % menor do que a DQO total do esgoto sanitário. Parte da matéria orgânica (biodegradável ou não) do lixiviado foi removida pelo pré-tratamento físico-químico com adição de cal seguida de “air stripping”.

Como a mistura dessas águas residuárias pré-tratadas resulta em afluente com menor conteúdo biodegradável, fica justificada a baixa eficiência de remoção da DQO total, principalmente no reator do ensaio 4, alimentado com lixiviado a 5 %. Os dados das Tabelas 35-38 confirmam essa observação. A DQO total já baixa no efluente anaeróbico (200 mgO<sub>2</sub> L<sup>-1</sup>) foi ainda menor quando medida em amostras filtradas em membrana de 1,2 μm (DQO

solúvel):  $100 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$  (Tabelas A36-A39). Em termos de eficiência, foram obtidos valores muito próximos para remoção da DQO total e DQO solúvel (Figura 27).



**Figura 27** - Remoção da DQO solúvel pelo reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias, nas condições experimentais dos ensaios (a) 1, (b) 2, (c) 3 e (d) 4.

Pela análise dos dados apresentados, a proporção volumétrica de 2 % foi a mais indicada para a realização dos ensaios com reatores piloto de lodos ativados e biofiltro aerado submerso, confirmando os resultados obtidos por Santos (2010) e Turetta (2011). Para melhor verificar a interferência do lixiviado quando tratado com esgoto sanitário na proporção de 5 %, essa condição operacional foi também avaliada nos reatores pilotos.

### *5.1.3.3 Aplicação do método proposto "Equivalente em ácido húmico" (Eq.AH) para os ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada*

De acordo com a metodologia descrita no subitem 4.1.1.4.2, a partir das concentrações de  $COT^2$  obtidas nas amostras do reator de lodos ativados em escala de bancada, foram calculados os valores do índice estimativo "Eq.A.H".

Como exemplo, apresenta-se o cálculo do "Eq. A.H" para o esgoto sanitário, utilizando as medidas de COT:

- calcula-se o "Eq.A.H" para o esgoto sanitário utilizando-se a Equação 11, obtida por regressão linear da curva de calibração apresentada na Figura 6 (subitem 4.1.1.4.2):

$$\text{"Eq. A.H"} = - 9,93 + 3,28 * COT \quad (\text{Equação 11})$$

---

<sup>2</sup> Para as medições do COT, as amostras foram acidificadas a pH 2 e filtradas em membrana de 0,45  $\mu\text{m}$ .

Como o valor médio do COT do esgoto bruto foi  $61 \text{ mg L}^{-1}$ , seu "Eq. A.H", denominado como " $x_1$ " foi  $191 \text{ mg L}^{-1}$ . Pelo mesmo procedimento, calculou-se o "equivalente em ácido húmico" no esgoto tratado por processo de lodos ativados, " $y_1$ ", que foi  $20 \text{ mg L}^{-1}$ .

Esses cálculos também foram aplicados às medidas de COT do efluente anaeróbio antes e após tratamento por lodos ativados (condição controle do ensaio 3, Tabela A31 do Anexo A). O "Eq. A.H" do efluente anaeróbio antes do tratamento por lodos ativados, denominado " $x_1$ " foi  $146 \text{ mg L}^{-1}$ . O "Eq. A.H" do efluente anaeróbio após o tratamento por lodos ativados, denominado " $y_1$ " foi  $31 \text{ mg L}^{-1}$ .

Para o esgoto sanitário e efluente anaeróbio, a estimativa da remoção do "Eq.A.H" (Rem. "Eq A.H") no efluente tratado, em termos de concentração ( $\text{mg L}^{-1}$ ) foi obtida pela Equação 6:

- $\text{Rem. "Eq. A.H" (mg L}^{-1}\text{)} = 191 - 20 = 171.$

A estimativa da remoção do "Eq.A.H" (Rem. "Eq A.H") no esgoto sanitário tratado, em termos de porcentagem foi calculada pela Equação 7:

- $\text{Rem. "Eq. A.H" (\%)} = 100 \cdot (171/191) = 90.$

Nas Tabelas 8 e 9, tem-se a aplicação do método tentativo "Eq.HA" para os quatro ensaios realizados. Pôde-se verificar que nos quatro ensaios houve degradação parcial da matéria de difícil degradação (estimada como COT "Eq.A.H"), e que sua remoção foi reduzida com o aumento da proporção volumétrica de lixiviado até 5 %.



**Tabela 8** – Aplicação do método tentativo “Equivalente em ácido húmico” (“Eq.A.H”) para os ensaios 1 e 2 com o reator de lodos ativados em escala de bancada, operado por 20 dias.

| Índices                          | Ensaio 1<br>(lixiviado bruto/esgoto sanitário) |     |     |     | Ensaio 2<br>(lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário) |     |     |
|----------------------------------|--|-----|-----|-----|--|-----|-----|
|                                  | Proporções volumétricas (%)                    |     |     |     |  |     |     |
|                                  | 0  | 0,2 | 2   | 5   | 0,2  | 2   | 5   |
| $x_1$ (mg L <sup>-1</sup> )      | 191  | NA  | NA  | NA  | NA   | NA  | NA  |
| $y_1$ (mg L <sup>-1</sup> )      | 20   | NA  | NA  | NA  | NA   | NA  | NA  |
| $x_2$ (mg L <sup>-1</sup> )      | NA   | 256 | 414 | 550 | 270  | 326 | 399 |
| $y_2$ (mg L <sup>-1</sup> )      | NA   | 37  | 110 | 220 | 45   | 76  | 111 |
| $\Delta_1$ (mg L <sup>-1</sup> ) | NA   | 65  | 223 | 358 | 79   | 135 | 208 |
| $\Delta_2$ (mg L <sup>-1</sup> ) | NA   | 17  | 90  | 200 | 25   | 56  | 91  |
| Rem. Eq.AH (mg L <sup>-1</sup> ) | 171  | 47  | 133 | 159 | 53   | 79  | 117 |
| Rem. Eq.AH (%)                   | 90   | 73  | 60  | 44  | 68   | 58  | 56  |

$x_1$ : Eq.AH do esgoto sanitário antes da aeração;  $y_1$ : Eq.AH do esgoto sanitário após 20 dias de aeração;  $x_2$ : Eq.AH da mistura lixiviado/esgoto antes da aeração;  $y_2$ : Eq.AH da mistura lixiviado/esgoto após 20 dias de aeração;  $\Delta_1 = x_2 - x_1$  (antes da aeração);  $\Delta_2 = y_2 - y_1$  (após a aeração); Rem: remoção; NA: não se aplica.

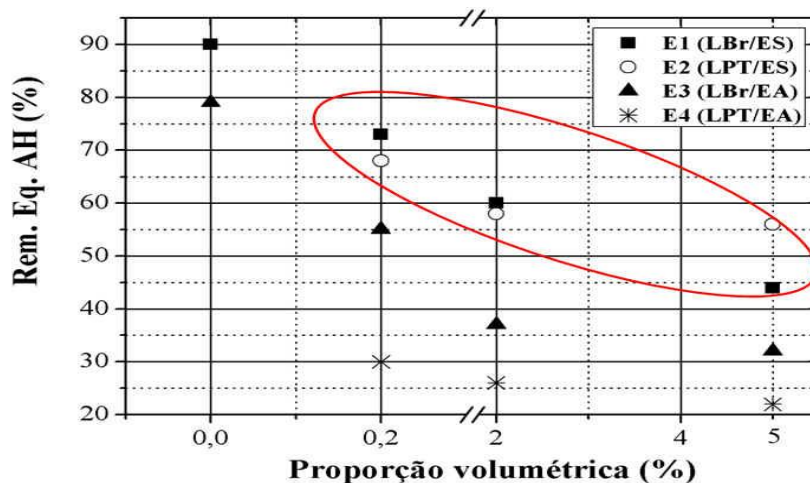
**Tabela 9** – Aplicação do método tentativo “Equivalente em ácido húmico” (“Eq.A.H”) para os ensaios 3 e 4 com o reator de lodos ativados em escala de bancada, operado por 20 dias.

| Índices                          | Ensaio 3<br>(lixiviado bruto/efluente anaeróbio) |     |     |     | Ensaio 4<br>(lixiviado pré-tratado/efluente anaeróbio) |     |     |
|----------------------------------|--|-----|-----|-----|--|-----|-----|
|                                  | Proporções volumétricas (%)                      |     |     |     |  |     |     |
|                                  | 0  | 0,2 | 2   | 5   | 0,2  | 2   | 5   |
| $x_1$ (mg L <sup>-1</sup> )      | 146  | NA  | NA  | NA  | NA   | NA  | NA  |
| $y_1$ (mg L <sup>-1</sup> )      | 31   | NA  | NA  | NA  | NA   | NA  | NA  |
| $x_2$ (mg L <sup>-1</sup> )      | NA   | 170 | 268 | 429 | 189  | 238 | 351 |
| $y_2$ (mg L <sup>-1</sup> )      | NA   | 41  | 107 | 222 | 61   | 99  | 190 |
| $\Delta_1$ (mg L <sup>-1</sup> ) | NA   | 24  | 121 | 283 | 43   | 92  | 205 |
| $\Delta_2$ (mg L <sup>-1</sup> ) | NA   | 11  | 77  | 191 | 30   | 68  | 159 |
| Rem. Eq.AH (mg L <sup>-1</sup> ) | 116  | 13  | 45  | 92  | 13   | 24  | 46  |
| Rem. Eq.AH (%)                   | 79   | 55  | 37  | 32  | 30   | 26  | 22  |

$x_1$ : Eq.AH do efluente anaeróbio antes da aeração;  $y_1$ : Eq.AH do efluente anaeróbio após 20 dias de aeração;  $x_2$ : Eq.AH da mistura lixiviado/efluente anaeróbio antes da aeração;  $y_2$ : Eq.AH da mistura lixiviado/efluente anaeróbio após 20 dias de aeração;  $\Delta_1 = x_2 - x_1$  (antes da aeração);  $\Delta_2 = y_2 - y_1$  (após a aeração); Rem: remoção; NA: não se aplica.

Mesmo nas condições controle, a remoção da matéria orgânica não foi completa. No reator controle (com efluente anaeróbico) dos ensaios 3 e 4, a remoção do COT “Eq.AH” foi 12 % menor do que no reator controle (com esgoto sanitário) do ensaios 1 e 2.

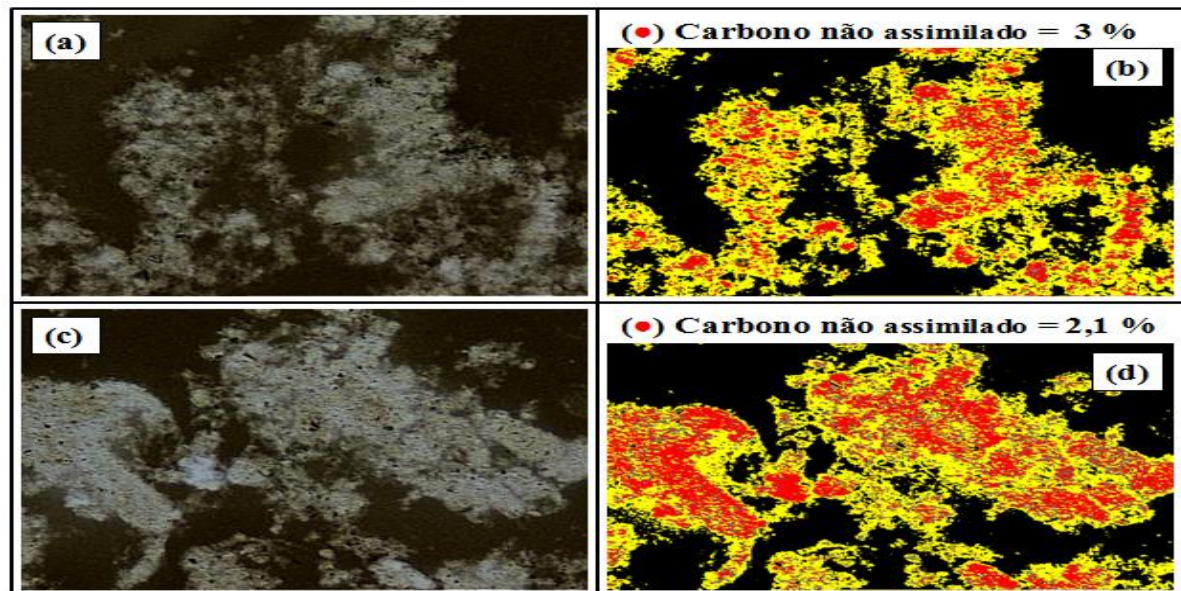
As condições operacionais dos ensaios 1 e 2 foram as mais favoráveis ao tratamento aeróbico (Figura 28). Os ensaios 3 e 4 resultaram nas mais baixas remoções do COT “Eq.AH” e nas maiores diferenças de desempenho entre a condição controle e as demais, com proporções volumétricas de lixiviado de 0,2 a 5 %. Para a proporção volumétrica de 5 % no ensaio 4, por exemplo, a eficiência de remoção do COT “Eq.AH” foi 72 % inferior àquela do reator controle. No ensaio 2, essa diferença foi de 38 %.



**Figura 28** – Eficiências de remoção do “equivalente em ácido húmico” (Rem."Eq.A.H") em função das proporções volumétricas de lixiviado, nos 4 ensaios realizados com reator de LA em escala de bancada.  
(\*) LBr: lixiviado bruto; LPT: lixiviado pré-tratado; ES: esgoto sanitário; EA: efluente anaeróbico.

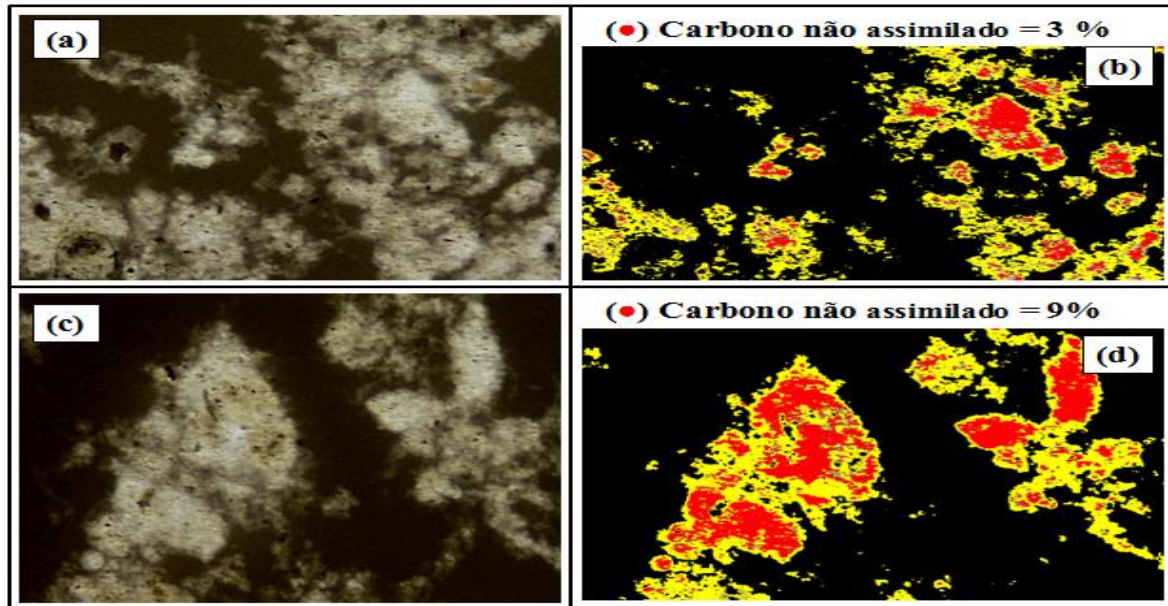
Nas Figuras 29 a 32 são apresentados os resultados obtidos com teste de coloração com nanquim, que indica no tom dourado claro das lâminas a presença de carbono não assimilado pelos microrganismos. Como esse teste é qualitativo, adotou-se o procedimento descrito no item 4.1.1.4.3, proposto nesta Tese para quantificar o carbono não assimilado,

utilizando-se da classificação dos tons e cálculo das áreas de cada tonalidade com o *software* Image Pro-Plus.

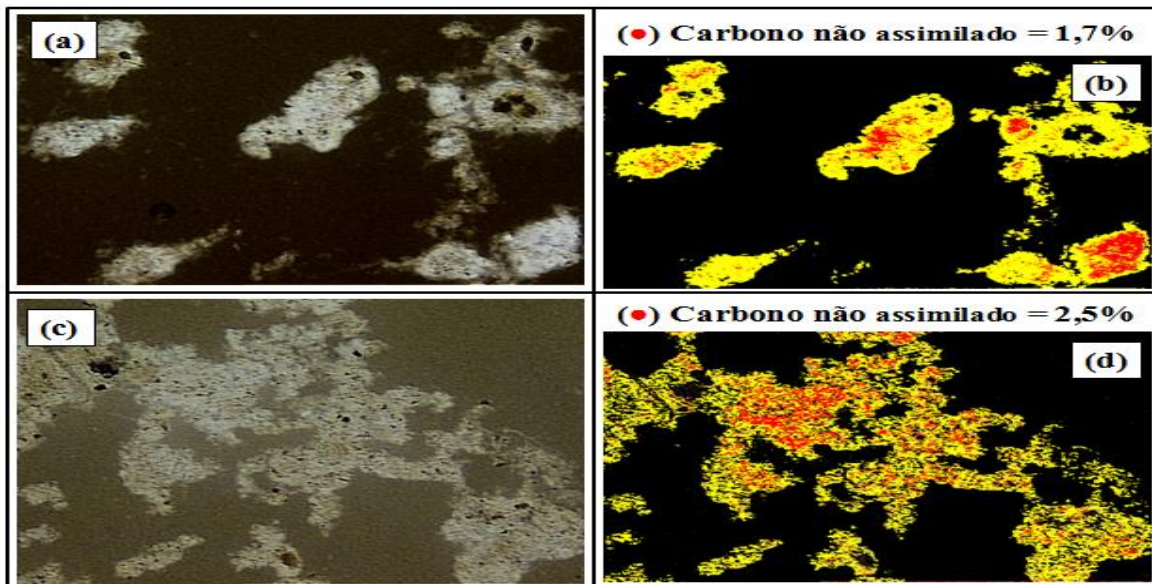


**Figura 29** – Aplicação do teste de coloração com nanquim e do método proposto para quantificação do carbono não assimilado em amostras do tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada (a-b) no ensaio 1 (lixiviado bruto/esgoto sanitário 2 %) e (c-d) ensaio 3 (lixiviado bruto/efluente anaeróbio 2 %).

Nas imagens, o carbono não assimilado foi colorido de vermelho. Assim como indicaram os resultados do “Eq.AH”, as melhores remoções de matéria orgânica foram observadas em lâminas de amostras dos ensaios 1 e 2.

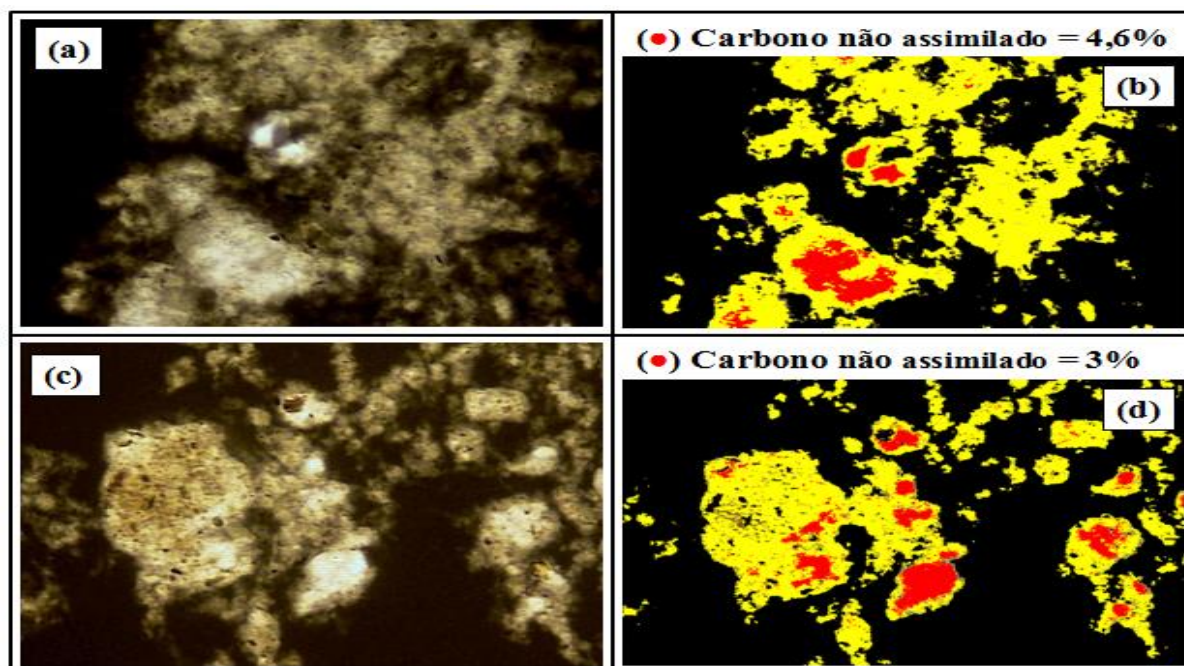


**Figura 30** – Aplicação do teste de coloração com nanquim e do método proposto para quantificação do carbono não assimilado em amostras do tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada no ensaio 1 (lixiviado bruto/esgoto sanitário 5 %) e (c-d) ensaio 3 (lixiviado bruto/efluente anaeróbio 5 %).



**Figura 31** – Aplicação do teste de coloração com nanquim e do método proposto para quantificação do carbono não assimilado em amostras do tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada (a-b) no ensaio 2 (lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário 2 %) e (c-d) ensaio 4 (lixiviado pré-tratado/efluente anaeróbio 2 %).





**Figura 32**– Aplicação do teste de coloração com nanquim e do método proposto para quantificação do carbono não assimilado em amostras do tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada (a-b) no ensaio 2 (lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário 5 %) e (c-d) ensaio 4 (lixiviado pré-tratado/efluente anaeróbio 5 %).

#### 5.1.3.4 *NTK, NAT, nitrito e nitrato nos ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada*

Nas Tabelas A40 a A48 do Anexo A são apresentadas as eficiências de remoção de NTK, NAT, além da concentração de nitrito

Nos quatro ensaios realizados, 80 a 90 % da concentração de NTK nos afluentes foi devida à concentração de NAT (Tabelas A40-A47). Houve queda na remoção do NTK e NAT em função do aumento da proporção volumétrica de lixiviado no esgoto sanitário. Os ensaios 2 e 4 apresentaram melhores resultados do que os ensaios 1 e 3, devido ao pré-tratamento do lixiviado por “air stripping”.

Nas condições experimentais dessa pesquisa não foi observado acúmulo de nitrito no efluente e as máximas concentrações variaram de 1 a 3 mg L<sup>-1</sup> quando os reatores foram alimentados com a mistura na proporção volumétrica de 5 % (Tabela A48).

A eficiência da nitrificação em todos os ensaios foi bastante próxima para proporções volumétricas de 2 e 5 % (Tabela 10). A remoção prévia de amônia do lixiviado por “air stripping” favoreceu a nitrificação nos ensaios com esgoto sanitário (ensaios 1 e 2): para proporção de 5 %, a nitrificação máxima observada no ensaio 1 foi de 40 %. Esse valor aumentou para 80 % (valor máximo) no ensaio 2. Nos ensaios com efluente anaeróbio a nitrificação foi em média superior em relação aos ensaios 1 e 2.

#### *5.1.3.5 Concentração de metais nos ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada*

Nos quatro ensaios, a concentração de todos os metais analisados no afluente e efluente do reator de lodos ativados em escala de bancada foi inferior aos limites máximos estabelecidos pela Resolução CONAMA 430/11. A concentração de metais no lodo aeróbio também foi bastante inferior aos limites da Resolução CONAMA 380/06, que estabelece critérios para o reuso do lodo na agricultura.

A análise dos resultados, mostrados nos Quadros A1-A4 do Anexo A, indicou que a concentração de metais nos afluentes foi maior quando se utilizou lixiviado bruto, porém, nos quatro ensaios não se observou aumento da concentração de metais em função das crescentes proporções volumétricas de lixiviado. Nos quatro ensaios, o ferro foi o metal presente em maior concentração, porém, antes mesmo das adições de lixiviado ao esgoto ou ao efluente anaeróbio, esse metal já havia sido detectado no inoculo dos reatores.

**Tabela 10** – Conversão do nitrogênio amoniacal total (NAT) a nitrato (nitrificação) nos quatro ensaios realizados com o reator de lodos ativados em escala de bancada, após 20 dias de operação.

| Ensaio | Tempo de operação<br>(dias) | Proporções volumétricas |                              |                       |       |                              |       |                       |                              |                       |     |                              |       |
|--------|-----------------------------|-------------------------|------------------------------|-----------------------|-------|------------------------------|-------|-----------------------|------------------------------|-----------------------|-----|------------------------------|-------|
|        |                             | 0 %                     |                              |                       | 0,2 % |                              |       | 2%                    |                              |                       | 5%  |                              |       |
|        |                             | NAT                     | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Nitr.                 | NAT   | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Nitr. | NAT                   | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Nitr.                 | NAT | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> | Nitr. |
|        |                             | REM                     | PROD                         | (%)                   | REM   | PROD                         | (%)   | REM                   | PROD                         | (%)                   | REM | PROD                         | (%)   |
|        |                             | (mg L <sup>-1</sup> )   | (%)                          | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)   | (mg L <sup>-1</sup> )        | (%)   | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)                          | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%) | (%)                          |       |
| 1      | 2                           | 31                      | 21                           | 68                    | 26    | 14                           | 54    | 29                    | 16                           | 55                    | 38  | 9                            | 24    |
|        | 7                           | 33                      | 27                           | 83                    | 29    | 17                           | 57    | 29                    | 14                           | 48                    | 18  | 7                            | 39    |
|        | 20                          | 25                      | 24                           | 94                    | 25    | 25                           | 96    | 25                    | 9                            | 36                    | 38  | 15                           | 40    |
| 2      | 2                           |                         |                              |                       | 31    | 22                           | 72    | 33                    | 22                           | 67                    | 46  | 9                            | 20    |
|        | 7                           |                         | NA                           |                       | 30    | 14                           | 47    | 28                    | 10                           | 35                    | 31  | 18                           | 57    |
|        | 20                          |                         |                              |                       | 26    | 23                           | 88    | 28                    | 20                           | 69                    | 28  | 23                           | 82    |
| 3      | 2                           | 32                      | 29                           | 91                    | 28    | 27                           | 96    | 37                    | 30                           | 81                    | 48  | 30                           | 88    |
|        | 7                           | 35                      | 27                           | 77                    | 31    | 31                           | 100   | 36                    | 35                           | 97                    | 39  | 28                           | 91    |
|        | 20                          | 38                      | 35                           | 93                    | 36    | 32                           | 89    | 41                    | 31                           | 76                    | 30  | 21                           | 83    |
| 4      | 2                           |                         |                              |                       | 28    | 27                           | 99    | 27                    | 27                           | 99                    | 28  | 21                           | 76    |
|        | 7                           |                         | NA                           |                       | 37    | 32                           | 88    | 35                    | 32                           | 94                    | 35  | 30                           | 86    |
|        | 20                          |                         |                              |                       | 36    | 35                           | 98    | 35                    | 21                           | 59                    | 35  | 35                           | 100   |

NAT<sub>REM</sub>: Nitrogênio amoniacal total removido; NO<sub>3</sub><sup>-</sup><sub>PROD</sub>: nitrato produzido; Nitr.: nitrificação; T.Op: tempo de operação; NA: não se aplica, pois as condições controle foram avaliadas apenas nos ensaios 1 e 3.



### 5.1.3.6 Análise de Componentes Principais (PCA)

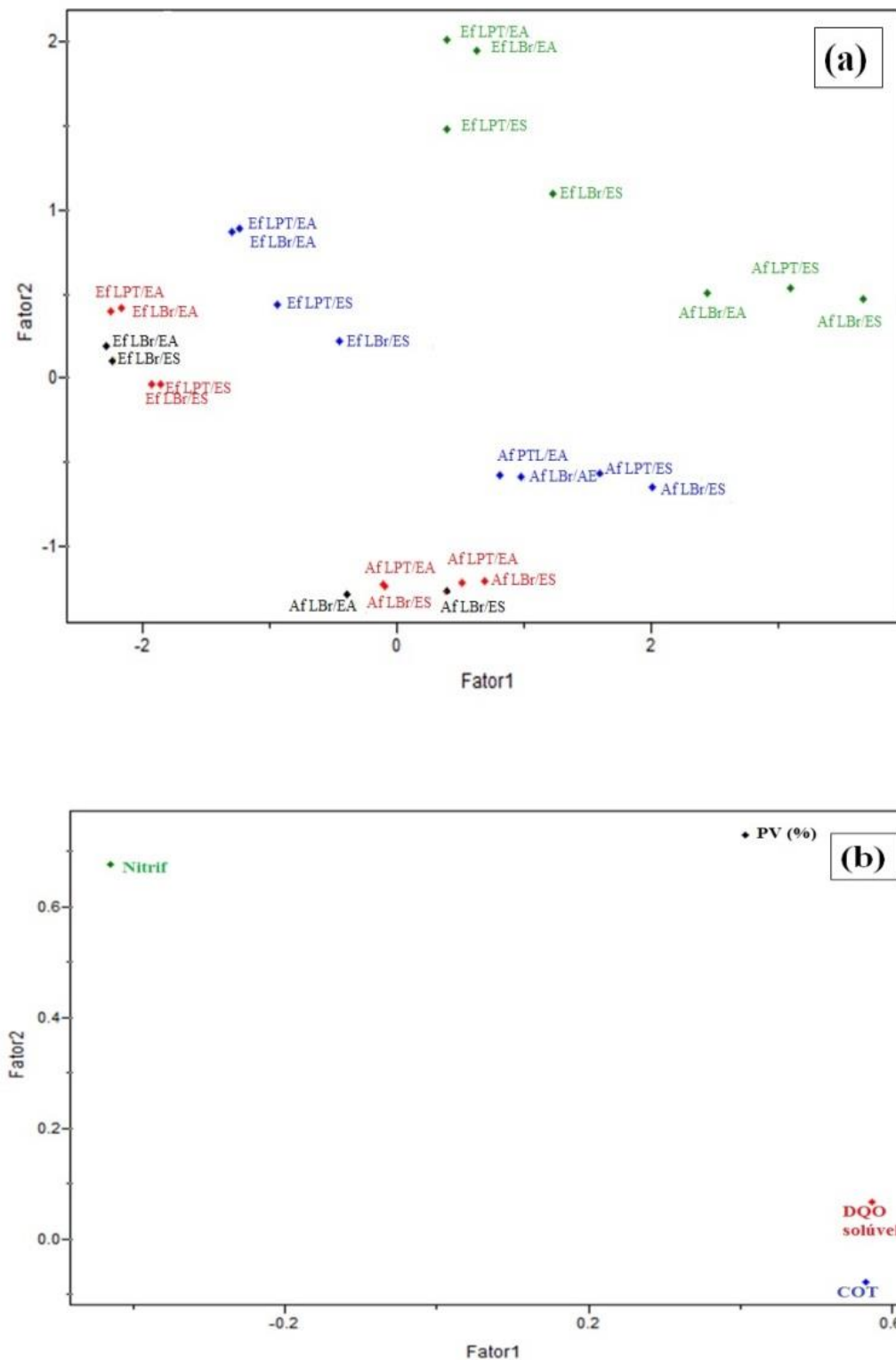
Foi bem sucedida a aplicação da PCA aos dados dos quatro ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada. A matriz inicial dos dados com 34 linhas por 4 colunas foi reduzida a uma matriz de 2x4 mantendo 97 % das informações (variância acumulada) originais com apenas 2 componentes principais ou fatores, conforme mostrado na Figura 33.

Na Figura 33a, o gráfico dos *scores* mostra que as amostras das condições controle (esgoto sanitário ou efluente anaeróbico) foram agrupadas com as amostras referentes à proporção volumétrica de lixiviado de 0,2 %. Esse resultado confirma que foi desprezível a interferência do lixiviado no tratamento aeróbio consorciado.

Segundo o gráfico dos *loadings* (Figura 33b) e Equação 12, DQO solúvel e COT foram as variáveis de maior peso na composição do primeiro fator. Devido à diferença entre a DQO solúvel e concentração de COT antes e após o tratamento aeróbio, houve separação entre os *scores* dos efluentes e afluentes, que se alocaram predominantemente nos valores positivos do primeiro fator (Figura 33a).

$$\text{Fator 1} = 0,41PV + 0,57DQO \text{ solúvel} + 0,57COT - 0,43Nitrif \quad (\text{Equação 12})$$

Por apresentarem maior DQO solúvel (271-366 mg L<sup>-1</sup>) e concentração de COT (110-160 mg L<sup>-1</sup>) as amostras contendo lixiviados bruto e pré-tratado na proporção volumétrica de 5 % foram separadas das amostras referentes às proporções volumétricas (PV) de 0, 0,2 e 2 %. Consequentemente, as baixas eficiências de remoção de DQO solúvel e COT associadas à proporção volumétrica de 5 % foram o motivo da proximidade das amostras de afluente e efluente alocadas nos valores positivos dos *scores* do primeiro fator.



**Figura 33** – Análise de componentes principais nos ensaios com reator de lodos ativados em escala de bancada: (a) *scores* e (b) *loadings*.

(\*) Af: afluente; Ef: efluente; LBr/ES: afluente lixiviado bruto/esgoto sanitário; LBr/EA: lixiviado bruto/efluente anaeróbico; LPT/ES: lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário; LPT/EA: lixiviado pré-tratado/efluente anaeróbico.

A composição do segundo fator teve maior influência das variáveis nitrificação (Nitrif) e proporções volumétricas (PV), conforme mostrado na Figura 33b e Equação 13.

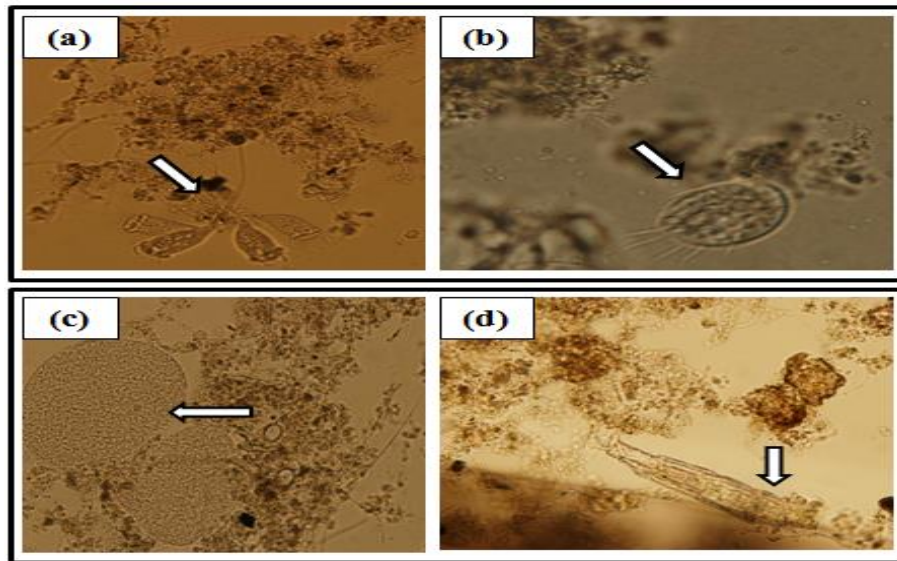
$$\text{Fator 2} = 0,73PV + 0,07DQO \text{ solúvel} - 0,08COT + 0,68Nitrif \quad (\text{Equação 13})$$

Analogamente ao primeiro fator, exceto para as amostras de afluente na proporção volumétrica de 5 %, os afluentes no segundo fator foram agrupados nos valores negativos dos *scores*. Essa separação se deu pela eficácia de nitrificação de 0 % nas amostras de afluente, que aumentou conforme o NAT foi oxidado a nitrato.

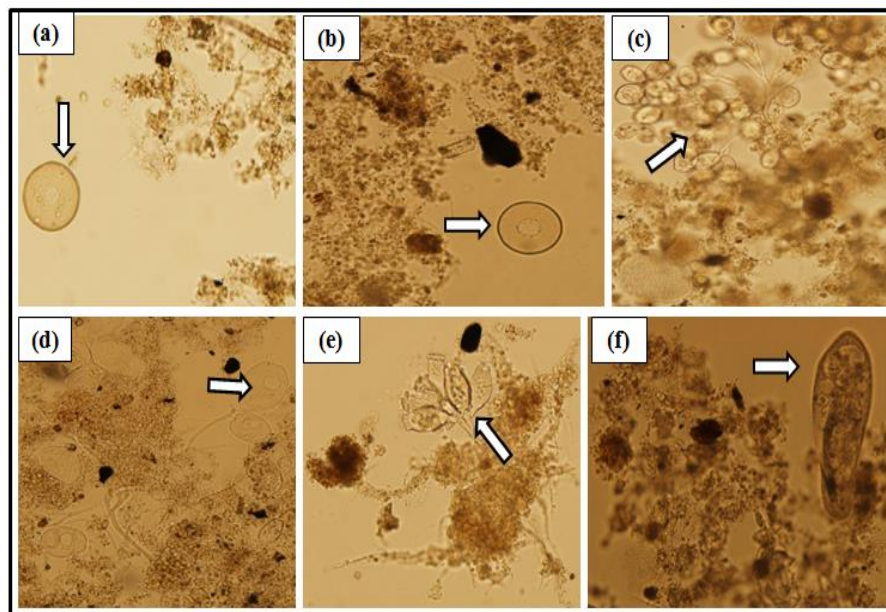
#### 5.1.3.7 Exames microbiológicos realizados nos ensaios com o reator de lodos ativados em escala de bancada

Nas Tabelas A51 a A52 são apresentados os resultados do monitoramento microbiológico realizado em amostras do tanque de aeração das câmaras do reator de lodos ativados em escala de bancada. Pode-se verificar nas Figuras 34 a 37 grande diversidade de microrganismos, indicando a boa qualidade do lodo aeróbio utilizado como inoculo.

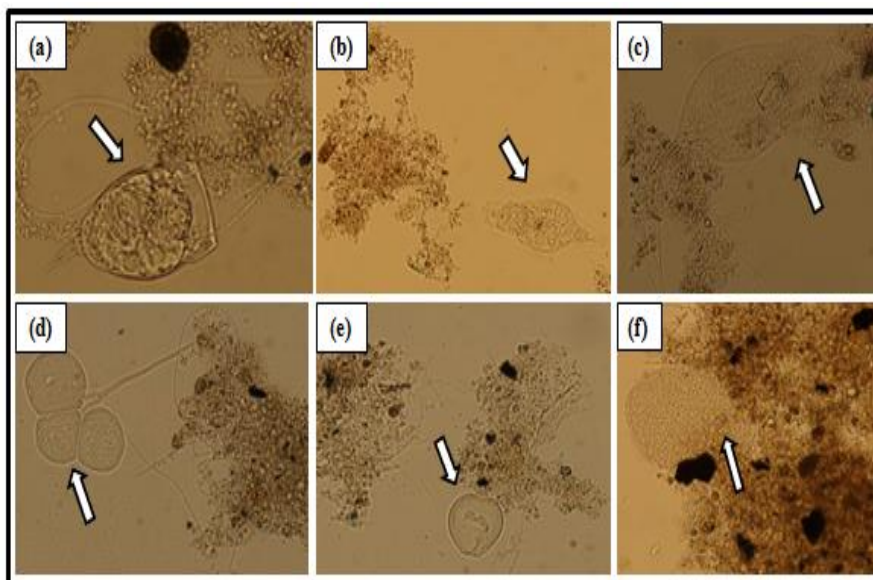
Devido às boas eficiências de remoção da matéria orgânica e condições favoráveis de aeração (com OD superior a  $2 \text{ mg L}^{-1}$ ) não foram observados protozoários flagelados e foi bastante baixa a frequência dos nematoides (Figura 36). Estes, por sua vez, foram observados apenas na 3ª semana de operação do ensaio 1, com o reator alimentado com lixiviado a 0,2 %.



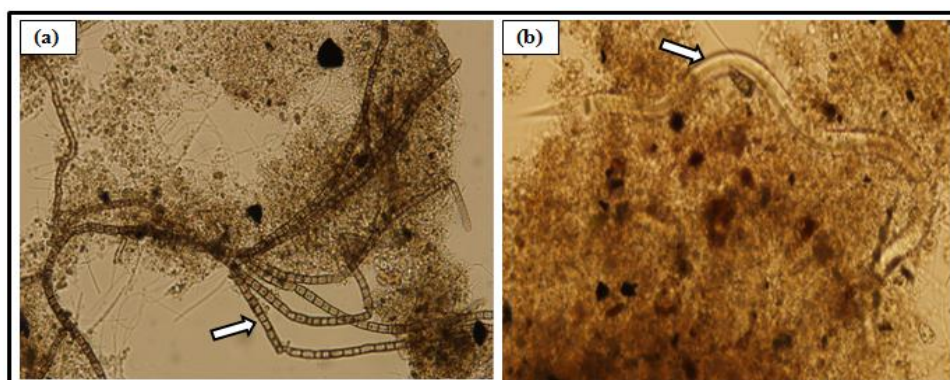
**Figura 34** – Microscopia ótica comum do lodo dos reatores controle: (a) protozoário fixo semelhante a *Vorticella* sp, com aumento de 200 x, no ensaio 1 após 2 dias de operação; (b) protozoário livre natante, semelhante à *Aspidisca* sp, com aumento de 800x, no ensaios 1 após 20 dias de operação; (c) bactérias coloniais, com aumento de 400x, no ensaio 3, após 2 dias de operação; (d) rotífero, com aumento de 200 x, no ensaio 3 após 20 dias de operação.



**Figura 35**– Microscopia ótica comum do lodo após 20 dias de aeração: (a) protozoário rizópode semelhante a *Arcella* sp, com aumento de 200 x, no reator “0,2 %” do ensaio 3; (b) protozoário rizópode semelhante a *Arcella* sp, com aumento de 200 x, no reator “2 %” do ensaio 3; (c) protozoário fixo semelhante a *Epystilys* sp, com aumento de 200 x, no reator “5 %” do ensaio 2; (d) protozoário fixo semelhante a *Epystilys* sp, com aumento de 200 x, no reator “0,2 %” do ensaio 4; (e) protozoário fixo semelhante a *Vorticella* sp, com aumento de 200 x, no reator “2 %” do ensaio 4; (f) protozoário ciliado, semelhante ao *Paramecium* sp, com aumento de 200 x, no reator “5 %” do ensaio 4.



**Figura 36** – Microscopia ótica comum do lodo após 20 dias de aeração: (a) rotífero, com aumento de 400 x, no reator “0,2 %” do ensaio 1; (b) rotífero, com aumento de 100 x, no reator “2 %” do ensaio 1; (c) rotífero, com aumento de 400 x, no reator “5 %” do ensaio 1; (d) protozoário fixo semelhante a *Epystilys* sp, com aumento de 400 x, no reator “0,2 %” do ensaio 2; (e) protozoário fixo semelhante a *Epystilys* sp, com aumento de 400 x, no reator “2 %” do ensaio 2 (f) bactérias coloniais semelhantes à *Zooglea*, com aumento de 200x, no reator “5 %” do ensaio 2.



**Figura 37** – Presença de (a) hifas, com aumento de 400 x e (b) nematóides, com aumento de 200 x.

Em todos os ensaios, mesmo para proporção volumétrica de 5 %, foi baixa a frequência de bactérias filamentosas ou hifas (Figura 37), confirmando os resultados do índice volumétrico do lodo (item 5.1.3.1), cujos valores estiveram dentro da faixa correspondente à boa sedimentabilidade do lodo. Bactérias coloniais como a *Zooglea*, responsáveis pela formação dos flocos (Jenkins et al, 2003), foram observadas em todos os experimentos

(Figura 34), mantendo-se como muito a moderadamente frequentes nos ensaios 3 e 4, e com oscilações para as proporções volumétricas de 2 e 5 % do ensaio 1.

Em linhas gerais, a análise qualitativa das observações microscópicas (Tabelas A49-A52) indicou que a diversidade de microrganismos foi semelhante entre os ensaios 1 e 2. O mesmo é válido para os ensaios 3 e 4, porém, possivelmente em função da menor carga orgânica nas câmaras de aeração, decorrente da utilização do efluente anaeróbio, a diversidade de microrganismos foi menor nesses ensaios do que nos ensaios 1 e 2.

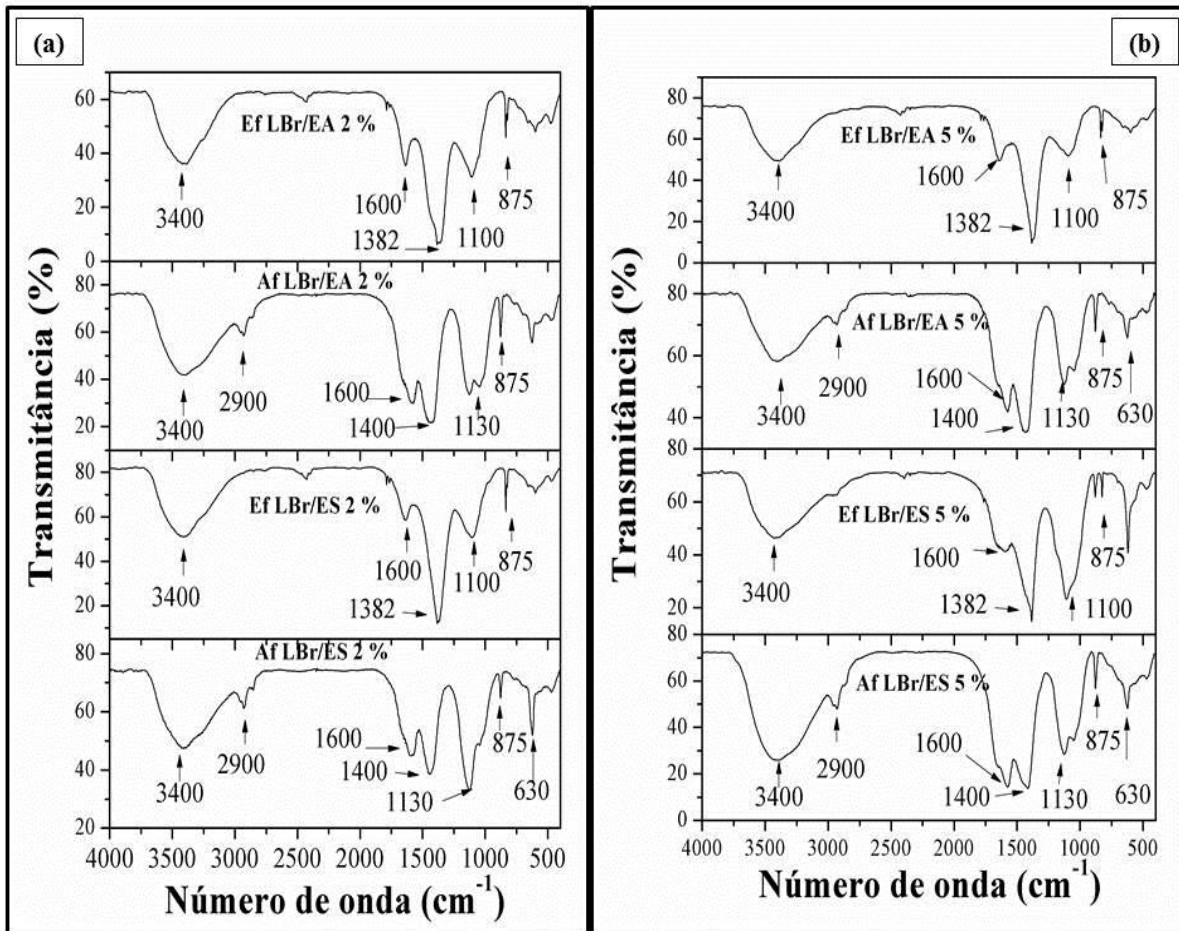
#### *5.1.3.8 Considerações sobre os melhores resultados nos experimentos com reator de lodos ativados em escala de bancada*

A análise espectroscópica de infravermelho confirma que as eficiências de remoção da matéria orgânica não foram muito favorecidas pelo uso do efluente anaeróbio, em relação ao esgoto sanitário. As diferenças foram mais relevantes entre as amostras contendo lixiviado bruto (ensaios 1 e 3) e lixiviado pré-tratado (Figuras 38 e 39).

De acordo com a Figura 38a, em relação à mistura tratada lixiviado bruto/efluente anaeróbio 2 % (ensaio 3), o espectro da mistura tratada lixiviado bruto/efluente sanitário 2% (ensaio 1) apresenta intensidade de absorção cerca de 30 % menor para as bandas  $3400\text{ cm}^{-1}$  e  $1600\text{ cm}^{-1}$ , indicando a melhor remoção de compostos aromáticos no ensaio com esgoto sanitário. Esse resultado foi coerente com a eficiência média de remoção do COT no ensaio 1, que foi 72 %, enquanto no ensaio 3 a remoção do COT foi de 58 %. Nos efluentes dos ensaios 1 e 3, foi eliminada a banda  $2900\text{ cm}^{-1}$ , devida ao estiramento C-H de cadeias alifáticas,



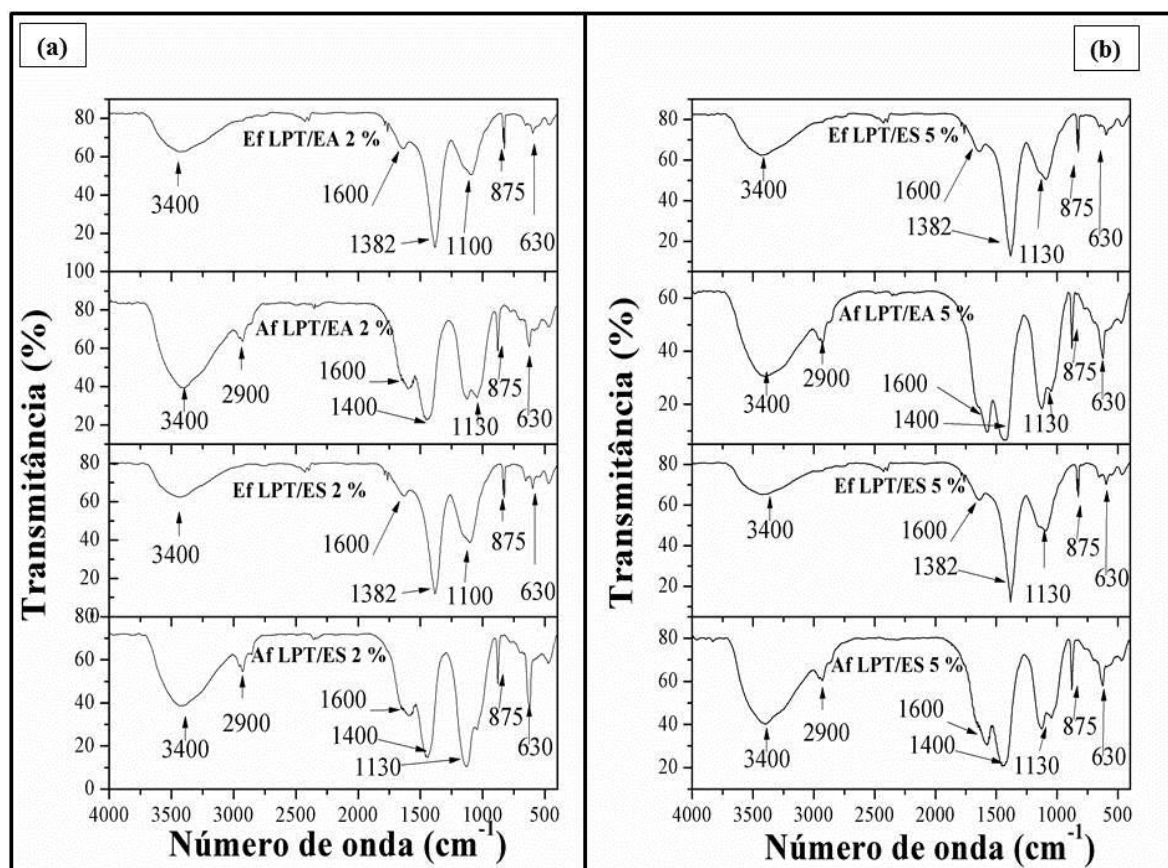
surgindo a banda  $1382\text{ cm}^{-1}$ , devida ao estiramento N-O dos nitratos (Barber et al., 2001; Bu et al., 2010; Silverstein et al., 2005). Essas observações são válidas para a proporção volumétrica de 5 % (Figura 38b), exceto pela permanência da banda  $2900\text{ cm}^{-1}$  apenas no efluente do ensaio 1, ainda que com menor intensidade.



**Figura 38** - Espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de afluente e efluente dos ensaios 1 e 3, para as proporções volumétricas de (a) 2 % e (b) 5 %.  
 (\*) Af: afluente; Ef: efluente; LBr/ES: afluente lixiviado bruto/esgoto sanitário; LBr/EA: lixiviado bruto/efluente anaeróbio.

Nota-se na Figura 39 que os espectros dos ensaios 2 e 4 são muito similares, devido à pequena diferença entre a eficiência média de remoção do COT (73 % para o ensaio 2 e 57 % para o ensaio 4).

Comparando-se as Figuras 38 e 39, nota-se que as intensidades de absorção das bandas 3400  $\text{cm}^{-1}$  e 1600  $\text{cm}^{-1}$  foram 40 % menores no efluente da mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % do que quando se utilizou lixiviado bruto, indicando a melhor remoção dos compostos aromáticos.

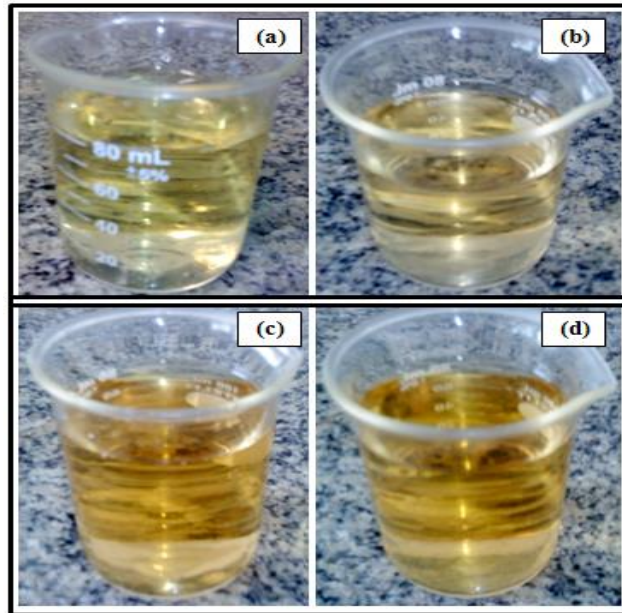


**Figura 39-** Espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de afluente e efluente dos Ensaio 2 (E2) e 4 (E4), com as principais bandas de absorção indicadas pelos números 1 – 5.  
 (\*) Af: afluente; Ef: efluente; LPT/ES: lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário; LPT/EA: lixiviado pré-tratado/efluente anaeróbio.

Com todas as análises realizadas, observou-se que os melhores resultados foram obtidos no ensaio 2, com lixiviado pré-tratado/esgoto na proporção volumétrica de 2 %. Como a espectroscopia de infravermelho indicou absorvâncias similares nas bandas inerentes aos



compostos aromáticos nas amostras tratadas contendo lixiviado pré-tratado nas proporções volumétricas de 2 e 5 %, essa última proporção também foi avaliada no tratamento consorciado em reatores piloto. Na Figura 40 são mostradas amostras brutas e pós-tratadas contendo lixiviado pré-tratado nas proporções volumétricas de interesse.



**Figura 40**– Amostras dos ensaios em batelada: (a) afluente lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário 2 %, (b) efluente lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário 2 %, (c) afluente lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário 5 % e (d) efluente lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário 5 %.

#### **5.1.4 Desempenho do reator de lodos ativados em escala piloto no tratamento da mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário**

Assim como na seção 5.1.3, nesta seção os resultados da remoção de matéria orgânica e de nitrogênio serão apresentados e discutidos na seguinte ordem: série de sólidos, DBO, DQO, COD, “equivalente em ácido húmico”, NTK, NAT, nitrito e nitrato. Nessa etapa, os reatores foram operados em regime contínuo de alimentação, com TDH de 24 h e idade do lodo de 20 dias.

Por facilidade, serão adotadas as seguintes siglas para os reatores e seus afluentes:

- reator de lodos ativados controle, alimentado com esgoto sanitário: LAC;
- reator de lodos ativados alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 2 %: LA-2 %;
- reator de lodos ativados alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 5 %: LA-5 %;

##### **5.1.4.1 Série de sólidos nos ensaios com o reator de lodos ativados em escala piloto**

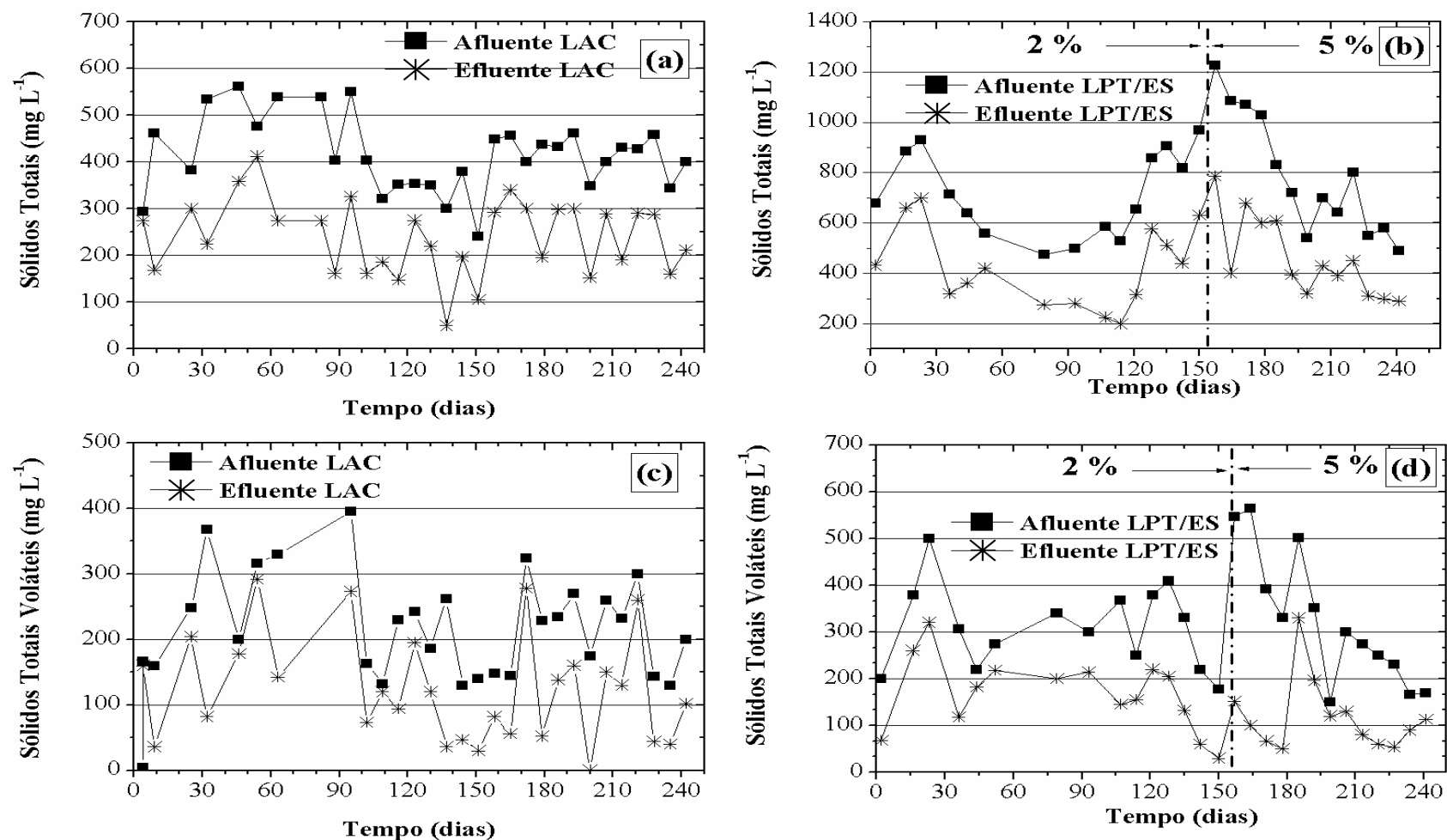
A concentração dos sólidos totais (ST), voláteis (STV) e fixos (STF), medida no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados, pode ser verificada no Anexo B. Os STV representaram, em média, 40 % dos ST dos afluentes dos reatores LA-2 % e LA-5 %. No reator LAC os STV representaram, em média, 50 % dos ST nas amostras de afluente e efluente.

De acordo com a Figura 41, as eficiências de remoção dos ST e STV foram: 43 e 47 %, para os reatores LAC e LA-2 %; 42 e 60 % para o reator LA-5 %. Todavia, o teste ANOVA mostrou que, para nível de 0,01 não foi estatisticamente significativa a diferença entre as médias dos reatores LAC, LA-2 % e LA- 5 % ( $F = 0,18$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$  para os ST;  $F = 1,2$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$ , para os STV).

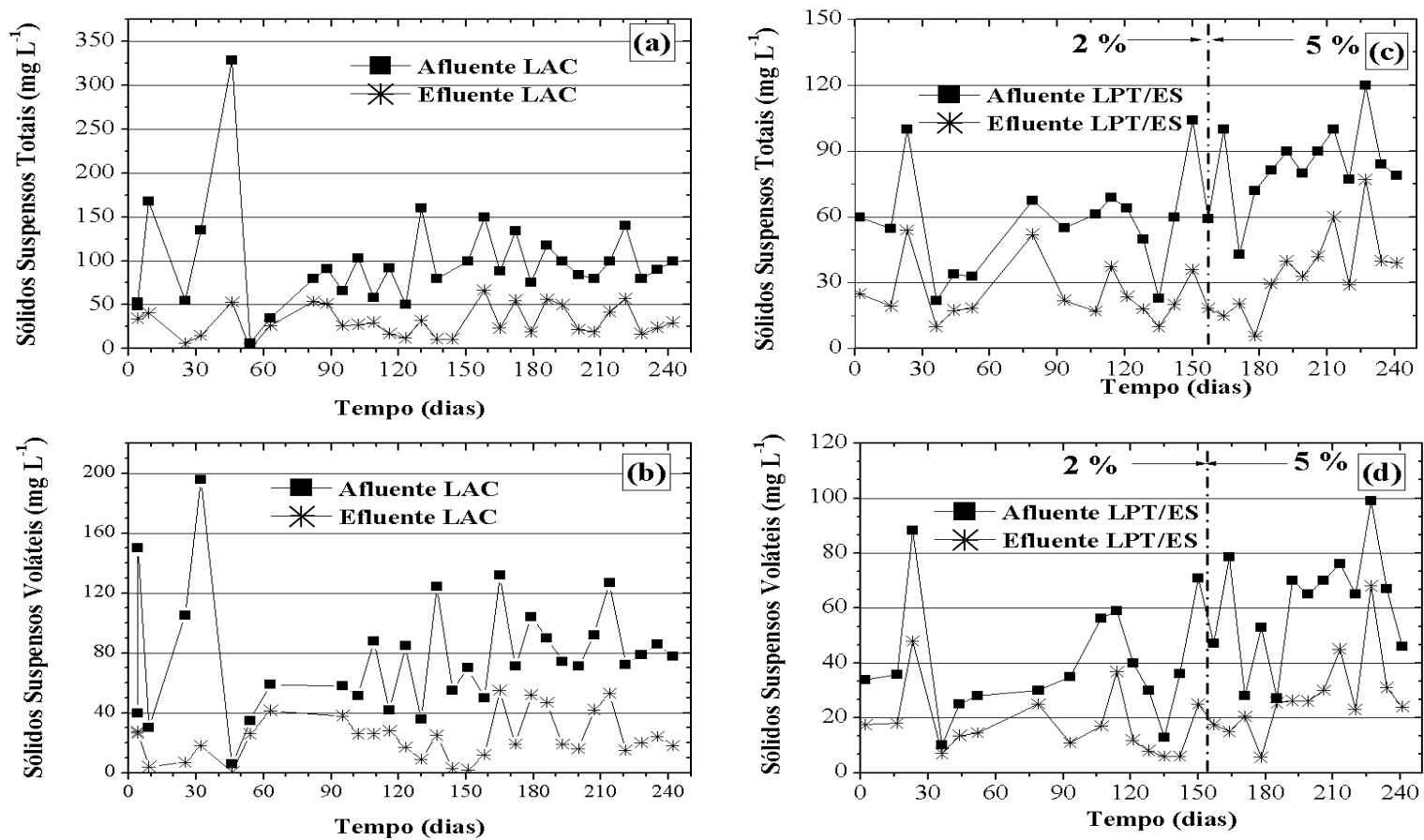
De acordo com a Figura 42 e Tabelas B3 e B4 do Anexo B, os reatores de lodos ativados foram eficientes na remoção dos sólidos suspensos, apresentando boa retenção da biomassa no tanque de aeração.

As eficiências de remoção dos sólidos suspensos totais (SST) e voláteis (SSV) foram de: 70 % para o reator LAC; 55 % para o reator LA-2 %; 59 e 53 % para o reator LA-5 % (Figura 42). Para o nível de significância de 0,01, o teste ANOVA indicou que as médias dessas três condições operacionais são estatisticamente iguais ( $F = 2,7$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$  para os SST;  $F = 4$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$ , para os SSV). Portanto, em relação à condição controle, a adição de lixiviado pré-tratado ao esgoto sanitário nas proporções volumétricas de 2 e 5 % não gerou interferência na remoção dos SST e SSV pelo reator de lodos ativados.

Em decorrência da perda de biomassa durante a operação, verifica-se na Tabela 11 que a concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) dos dois reatores de lodos ativados sofreu oscilações, atingindo valores mínimos em torno de 1000 mg L<sup>-1</sup>. Nos dois reatores o IVL esteve dentro da faixa indicadora de boa sedimentabilidade, ou seja, com valores inferiores a 100 mL g<sup>-1</sup> (Metcalf and Eddy, 2003).



**Figura 41** – Remoção de matéria orgânica em função do tempo nos ensaios em sistemas contínuos: ST nos reatores de lodos ativados (a) controle (LAC) e (b) alimentado com lixiviado pré-tratado/esgoto (LPT/ES) a 2 e 5 %; STV nos reatores de lodos ativados (c) controle e (d) alimentado com a mistura LPT/ES a 2 e 5 %.



**Figura 42** – Remoção de matéria orgânica em função do tempo nos ensaios em sistemas contínuos: SST (a) no reator de lodos ativados controle e (c) no reator de lodos ativados alimentado com a mistura LPT/ES 2 %; SSV (b) no reator de lodos ativados controle e (d) no reator de lodos ativados alimentado com a mistura LPT/ES 2 %.

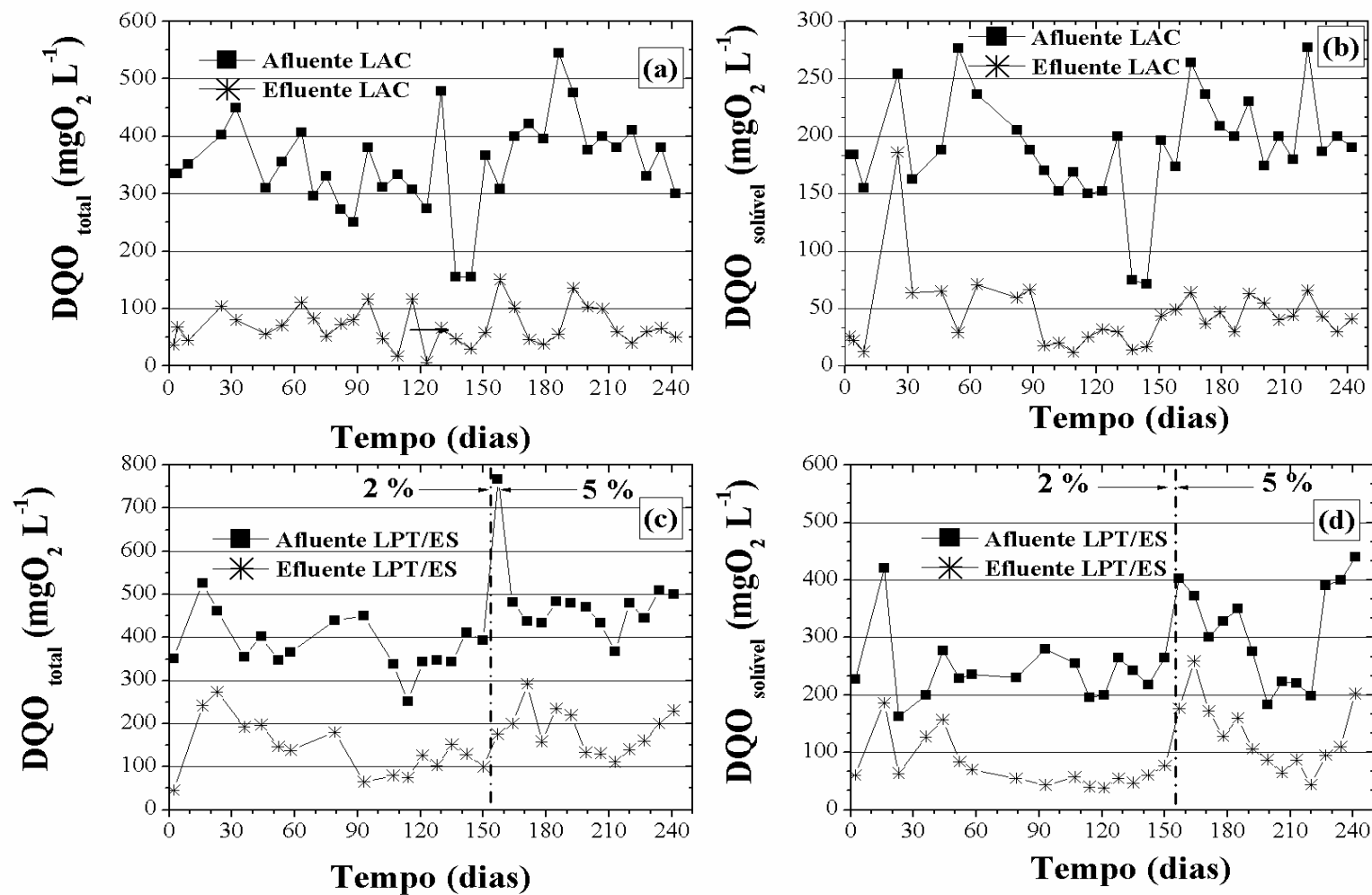
**Tabela 11** - Índice volumétrico do lodo (IVL), sólidos sedimentáveis (SD) e concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) dos reatores de lodos ativados em escala piloto, alimentados continuamente com esgoto sanitário (LAC) e lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário nas proporções volumétricas de 2 % (LA-2 %) e 5 % (LA – 5 %).

| <i>Reatores</i>  |                            |                            |                            |                 |                            |                            |                            |                 |                            |                           |                            |
|------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|-----------------|----------------------------|---------------------------|----------------------------|
| <i>LAC (0 %)</i> |                            |                            |                            | <i>LA - 2 %</i> |                            |                            |                            | <i>LA – 5 %</i> |                            |                           |                            |
| <i>Tempo</i>     | <i>SSTA</i>                | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>Tempo</i>    | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>Tempo</i>    | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                 | <i>IVL</i>                 |
| <i>(dias)</i>    | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(dias)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(dias)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(m L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> |
| 23               | 4313                       | 250                        | 58                         | 2               | 1700                       | 250                        | 58                         | 9               | 4157                       | 300                       | 72                         |
| 44               | 3093                       | 180                        | 58                         | 16              | 1300                       | 250                        | 61                         | 16              | 5330                       | 400                       | 75                         |
| 60               | 1600                       | 215                        | 52                         | 36              | 2181                       | 170                        | 78                         | 23              | 2430                       | 200                       | 82                         |
| 77               | 2718                       | 125                        | 46                         | 44              | 4411                       | 300                        | 68                         | 30              | 2860                       | 225                       | 79                         |
| 85               | 1300                       | 350                        | 57                         | 52              | 1033                       | 80                         | 77                         | 37              | 2930                       | 200                       | 68                         |
| 100              | 1035                       | 100                        | 97                         | 79              | 2433                       | 300                        | 123                        | 44              | 2700                       | 180                       | 67                         |
| 122              | 1267                       | 150                        | 118                        | 93              | 2378                       | 310                        | 130                        | 51              | 3000                       | 250                       | 83                         |
| 150              | 680                        | 80                         | 118                        | 107             | 2400                       | 240                        | 100                        | 58              | 3020                       | 250                       | 83                         |
| 170              | 2309                       | 200                        | 87                         | 114             | 3607                       | 300                        | 83                         | 65              | 2610                       | 200                       | 77                         |
| 180              | 1877                       | 150                        | 80                         | 121             | 3238                       | 290                        | 90                         | 72              | 2350                       | 150                       | 64                         |
| 200              | 1531                       | 145                        | 95                         | 128             | 1420                       | 145                        | 102                        | 79              | 2700                       | 180                       | 67                         |
| 210              | 2389                       | 180                        | 75                         | 135             | 1493                       | 130                        | 87                         | 86              | 2700                       | 200                       | 74                         |
| 220              | 1838                       | 170                        | 92                         | 142             | 1560                       | 150                        | 96                         | 93              | 2100                       | 100                       | 48                         |
| 242              | 1898                       | 180                        | 95                         | 150             | 2800                       | 190                        | 68                         | 100             | 2300                       | 100                       | 43                         |

#### 5.1.4.2 DBO, DQO e COD nos ensaios com os reatores de LA em escala piloto

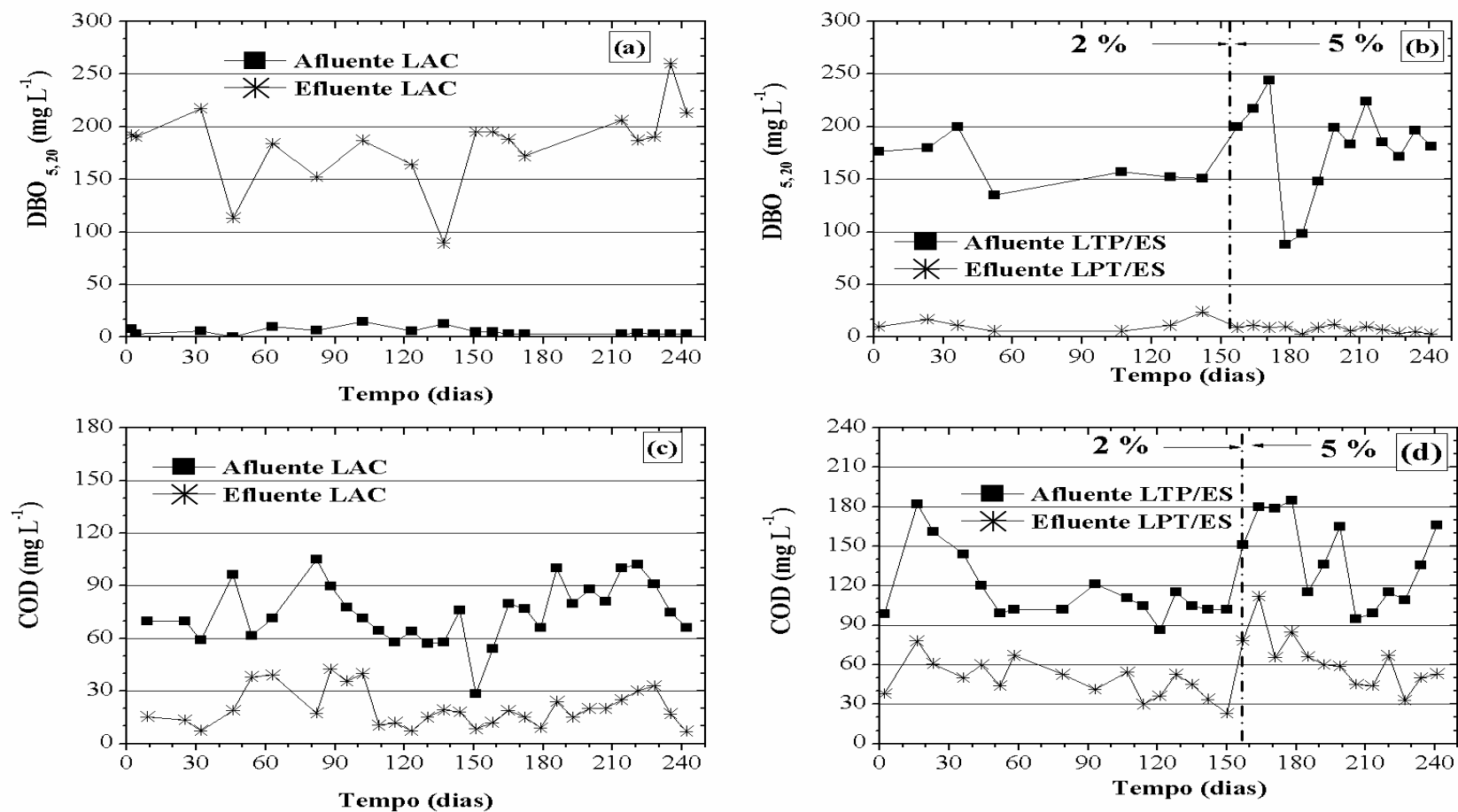
De acordo com a Figura 43, as eficiências obtidas para remoção da DQO total e solúvel foram de: 80 % e 77 % para o reator LAC; 64 % e 69 % para o reator LA- 2 %; e 60 % para o reator LA-5 %. Para o nível de significância de 0,01, o teste ANOVA indicou que a diferença entre essas médias não foi devida ao acaso ( $F = 14$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$  para DQO total;  $F = 7$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$  para DQO solúvel). Portanto, a interferência do lixiviado pré-tratado a 2 % foi apenas 10 % para a DQO solúvel, confirmando os resultados da etapa de bancada de que essa proporção volumétrica foi a mais apropriada para o tratamento aeróbio.

De acordo com a Figura 44, as eficiências de remoção do COD e  $DBO_{5,20}$  durante a operação dos reatores foram de: 73 e 98 % para o reator LAC; 59 e 95 % para o reator LA-2 %; e 55 e 96 % para o reator LA-5 %. Para o nível de significância de 0,01, o teste ANOVA mostrou que as diferenças nas remoções de COD e  $DBO_{5,20}$  não foram devidas ao acaso ( $F = 13$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$  para o COD;  $F = 9$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$  para a  $DBO_{5,20}$ ).



**Figura 43** – Remoção de matéria orgânica em função do tempo nos ensaios em sistemas contínuos: DQO total (a) no reator de LAC e (c) nos reatores LA-2 % e LA-5 %; DQO solúvel (b) no reator LAC e (d) nos reatores LA-2 % e LA-5 %.



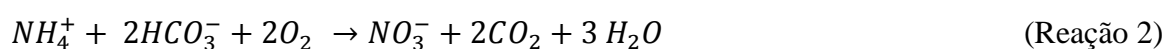


**Figura 44** – Remoção de matéria orgânica em função do tempo nos ensaios em sistemas contínuos: DBO<sub>5,20</sub> nos reatores (a) LAC e (b) LA-2 % e LA-5 %; COD nos reatores (c) LAC e (d) LA-2 % e LA-5 %.

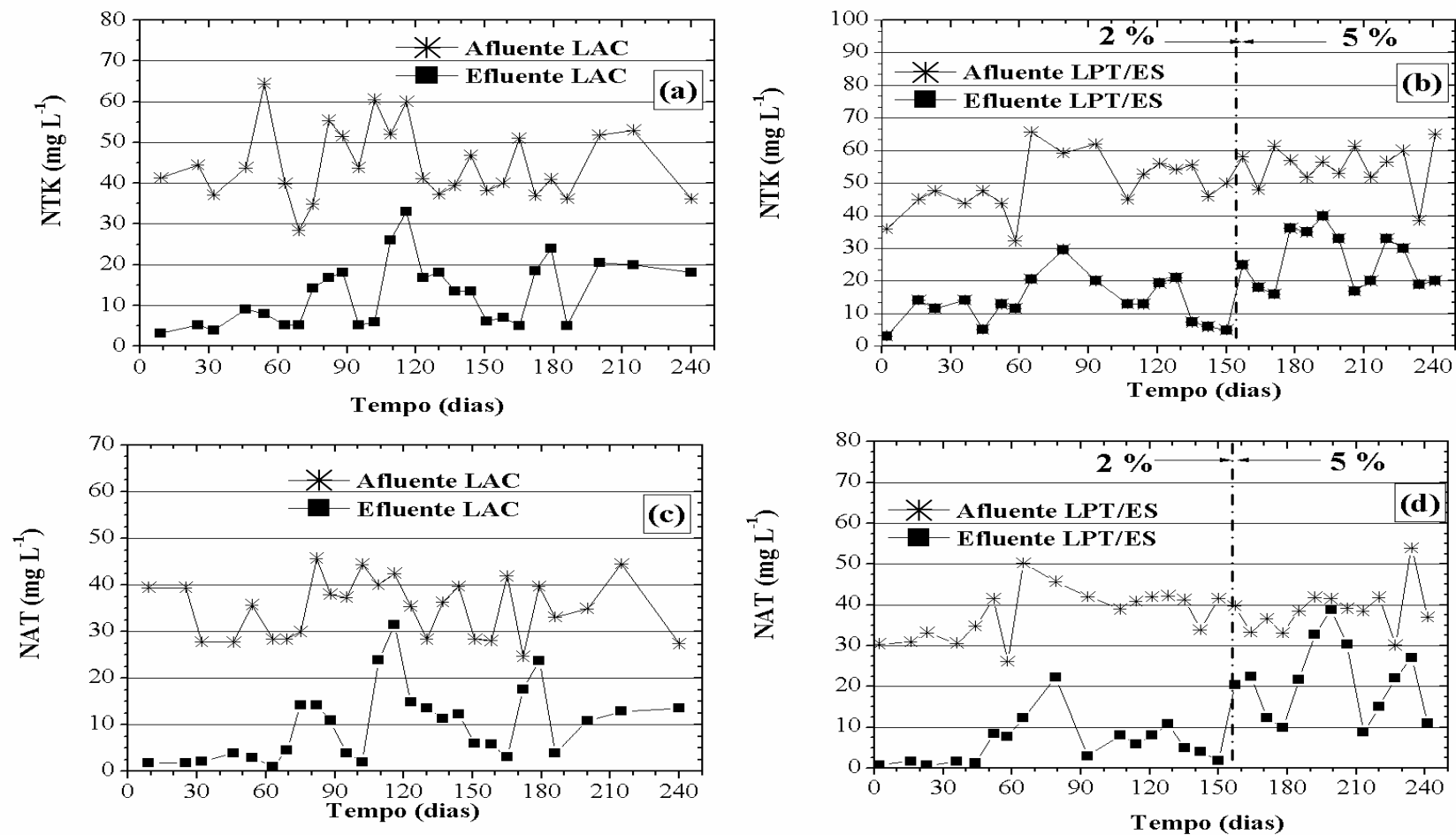
#### 5.1.4.3 NTK, NAT, nitrito e nitrato nos ensaios com os reatores de lodos ativados em escala piloto

Durante a execução dos experimentos, o NTK foi majoritariamente constituído pelo NAT (Figura 45). As remoções de NTK e NAT foram de: 85 % para o reator LAC; 74 e 85 % para o reator LA-2 %; e 50 % para o reator LA-5 %. A aplicação do teste ANOVA com nível de significância de 0,01 indicou que as diferenças nas remoções não foram devidas ao acaso (para o NTK,  $F = 27$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$ ; para o NAT,  $F = 29$  e  $F_{\text{crítico}} = 5$ ).

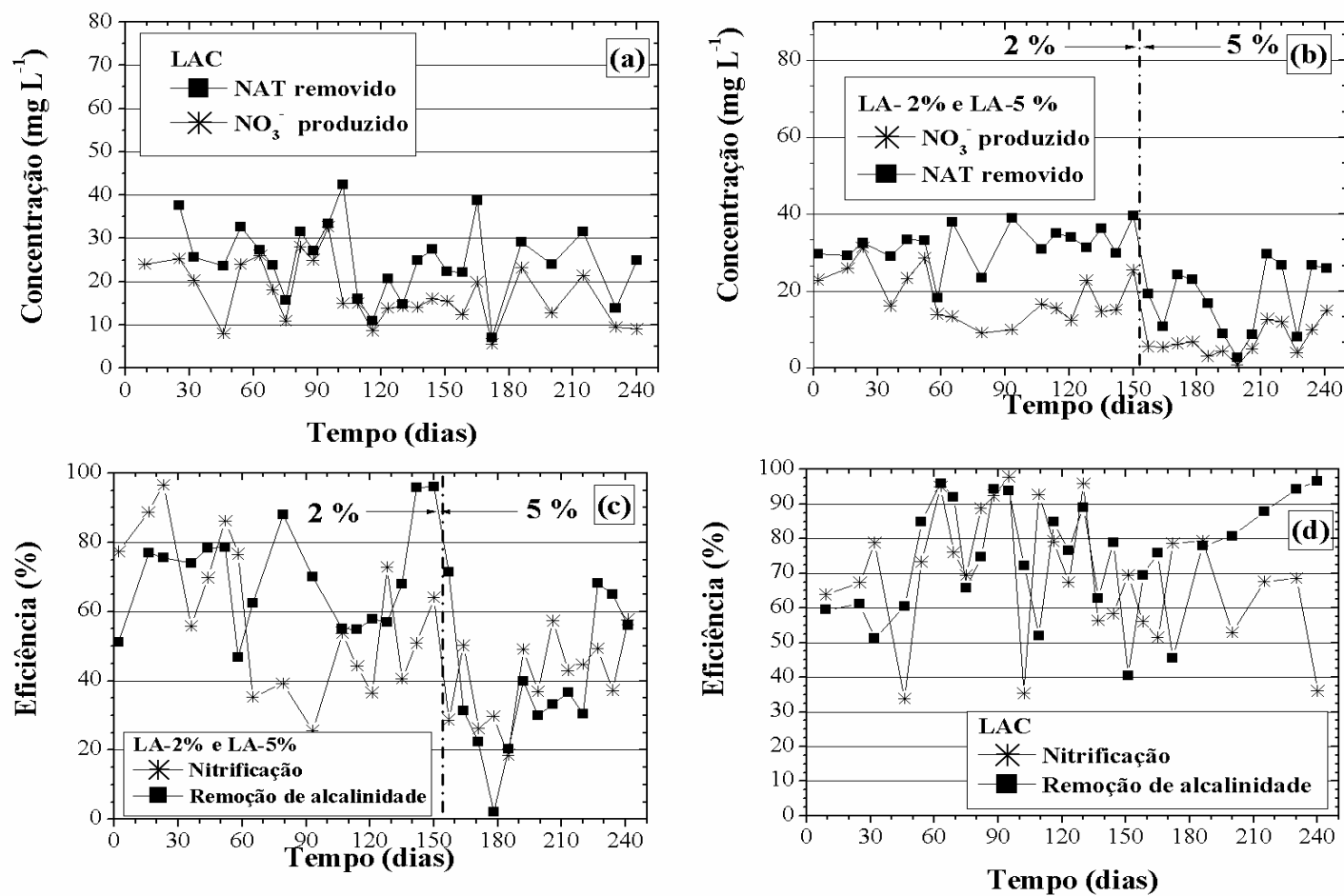
Nas três condições operacionais avaliadas, a remoção do NAT foi devida à nitrificação e volatilização. A conversão do NAT a nitrato nos reatores LAC, LA-2 % e LA-5 % foi de, respectivamente, 71 %, 60 % e 43 % (Figura 46). Nota-se na Figura 46c-d a remoção da alcalinidade consoante à nitrificação, comportamento esperado, de acordo com a Reação 2 (Metcalf e Eddy, 2003):



Assim como observado para a DQO solúvel, foi baixa a interferência do lixiviado pré-tratado a 2 % na remoção de nitrogênio pelo reator de lodos ativados piloto. O reator LA-2 % apresentou eficiência de nitrificação apenas 15 % inferior do que a condição controle. Porém, essa interferência foi próxima de 40 % no reator LA-5 %, resultado que pode estar relacionado à concentração de amônia livre ( $NH_3$ ) no reator (Figura 47).



**Figura 45** – Remoção de nitrogênio em função do tempo nos ensaios em sistemas contínuos: NTK (a) no reator LAC e (b) nos reatores LA-2 % e LA-5 %; NAT (c) no reator LAC e (d) nos reatores LA-2 % e LA-5 %.



**Figura 46** – NAT removido e nitrato produzido (a) no reator LAC e (b) nos reatores LA-2% e LA-5%, e eficiência de nitrificação e remoção da alcalinidade (c) nos reatores LA-2 % e LA-5% e (d) no LAC.

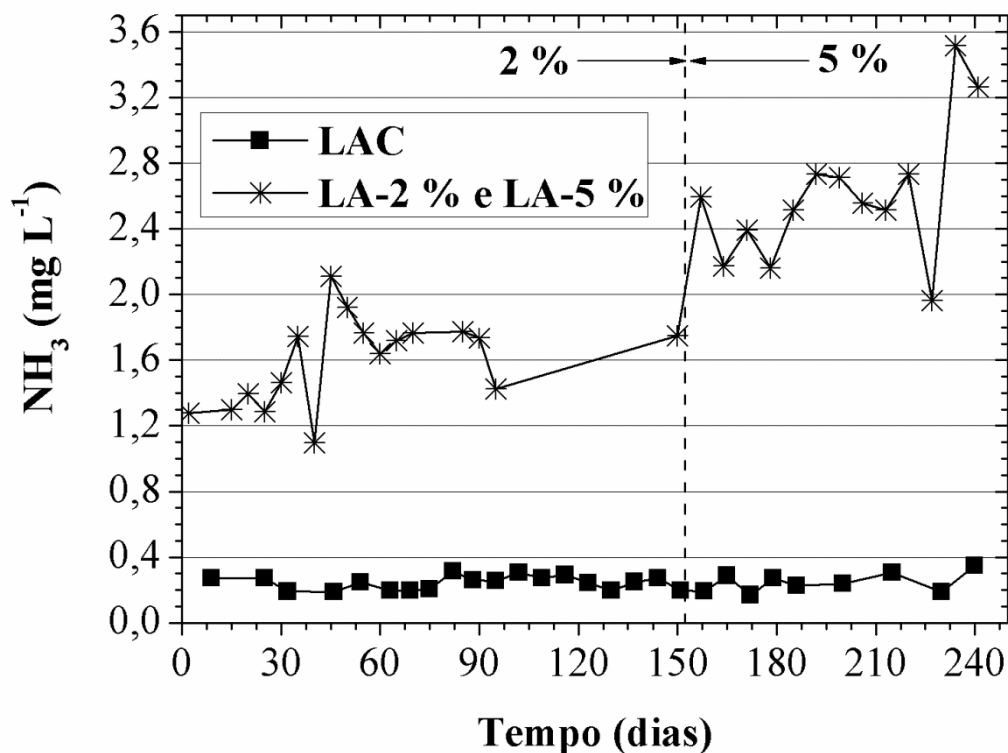
Segundo Anthonisen et al. (1976), a concentração de  $\text{NH}_3$  é calculada pela Equação 14:

$$\text{NH}_3 = 17/14 * \left( \frac{\text{NAT} * 10^{\text{pH}}}{K_b/K_w + 10^{\text{pH}}} \right), \quad (\text{Equação 14})$$

onde  $K_b$  é a constante de ionização da ammonia,  $K_w$  é a constant de ionização da água. A razão  $K_b/K_w$  está associada com a temperatura, de acordo com a Equação 15:

$$K_b/K_w = e^{(6344/273+^{\circ}C)} \quad (\text{Equação 15})$$

As concentrações médias de  $\text{NH}_3$  nos afluentes dos reatores LAC, LA-2 % e LA-5 % foram:  $0,24 \text{ mg L}^{-1}$ ,  $1,60 \text{ mg L}^{-1}$  e  $2,6 \text{ mg L}^{-1}$ , valores inferiores aos  $6 \text{ mg L}^{-1}$  associados à inibição completa da atividade das bactérias oxidadoras de nitrito (Valdivelu et al., 2007). No entanto, nas condições avaliadas nesta Tese, a concentração de  $2,6 \text{ mgNH}_3 \text{ L}^{-1}$  foi suficiente para inibir parcialmente a nitrificação, em relação à condição controle. Assim como para remoção da matéria orgânica, a proporção volumétrica de 2 % foi a mais indicada para remoção de nitrogênio nos ensaios com reator de lodos ativados piloto, operado com TDH de 24 h e idade do lodo de 20 dias.



**Figura 47** – Concentração de  $\text{NH}_3$  nos afluentes dos reatores controle (LAC) e alimentados com lixiviado pré-tratado/esgoto nas proporções volumétricas de 2 % (LA-2 %) e 5 % (LA-5%).

#### 5.1.4.4 Concentração de metais nos ensaios com os reatores de lodos ativados em escala piloto

No Quadro 1 é apresentada a concentração média de metais nas amostras do afluente, efluente e lodo dos reatores de lodos ativados pilotos. Nas condições avaliadas, a concentração dos metais analisados nas amostras de afluente, efluente e lodo foi muito inferior aos limites máximos determinados pelas Resoluções CONAMA 380/06 e 430/11 (Tabela 5).

Quadro 1 – Concentração média de metais nas amostras dos reatores de lodos ativados em escala piloto, após 240 dias para o reator LAC, 150 dias para o reator LA- 2 % e 100 dias para o reator LA-5 %.

| <i>Reatores</i> | <i>Metais</i>                       | <i>Zn</i> | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Ni</i> | <i>Fe</i> | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | <i>Cr</i> |
|-----------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | <i>Amostras</i>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                 | <b>Inóculo (mg kg<sup>-1</sup>)</b> | 337       | 28        | 0,2       | 22        | 9960      | 173       | 13        | 42        |
| <b>LAC</b>      | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,04      | 0         | 0         | 0,001     | 0,35      | 0,01      | 0         | 0         |
|                 | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,01      | 0         | 0         | 0         | 0,18      | 0         | 0         | 0         |
|                 | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 400       | 19        | 0         | 142       | 0         | 0         | 55        | 14        |
| <b>LA-2 %</b>   | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,08      | 0         | 0         | 0         | 0,92      | 0,02      | 0         | 0         |
|                 | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,02      | 0         | 0         | 0         | 0,56      | 0,01      | 0         | 0         |
|                 | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 547       | 38        | 0         | 109       | 1758      | 0         | 476       | 188       |
| <b>LA-5 %</b>   | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,11      | 0,15      | 0,03      | 0,04      | 0,86      | 0,19      | 0,06      | 0         |
|                 | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,04      | 0,11      | 0,02      | 0,04      | 0,28      | 0         | 0,01      | 0         |
|                 | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 1154      | 58        | 6         | 45        | 3886      | 0         | 657       | 49        |

Af: afluente; Ef: efluente; LAC: reator de lodos ativados controle; LA-2 %: reator de lodos ativados alimentado com lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 %; LA-5 %: reator de lodos ativados alimentado com lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 5 %.

#### 5.1.4.5 *Análise de Componentes Principais (PCA) nos ensaios com reatores de lodos ativados piloto*

Como nos ensaios em bancada, foi bem sucedida a aplicação da PCA aos dados dos reatores de lodos ativados em escala piloto. A matriz inicial dos dados com 72 linhas por 6 colunas foi reduzida a uma matriz de 2x6, mantendo 90 % das informações (variância acumulada) originais com apenas 2 componentes principais ou fatores (Figura 48).

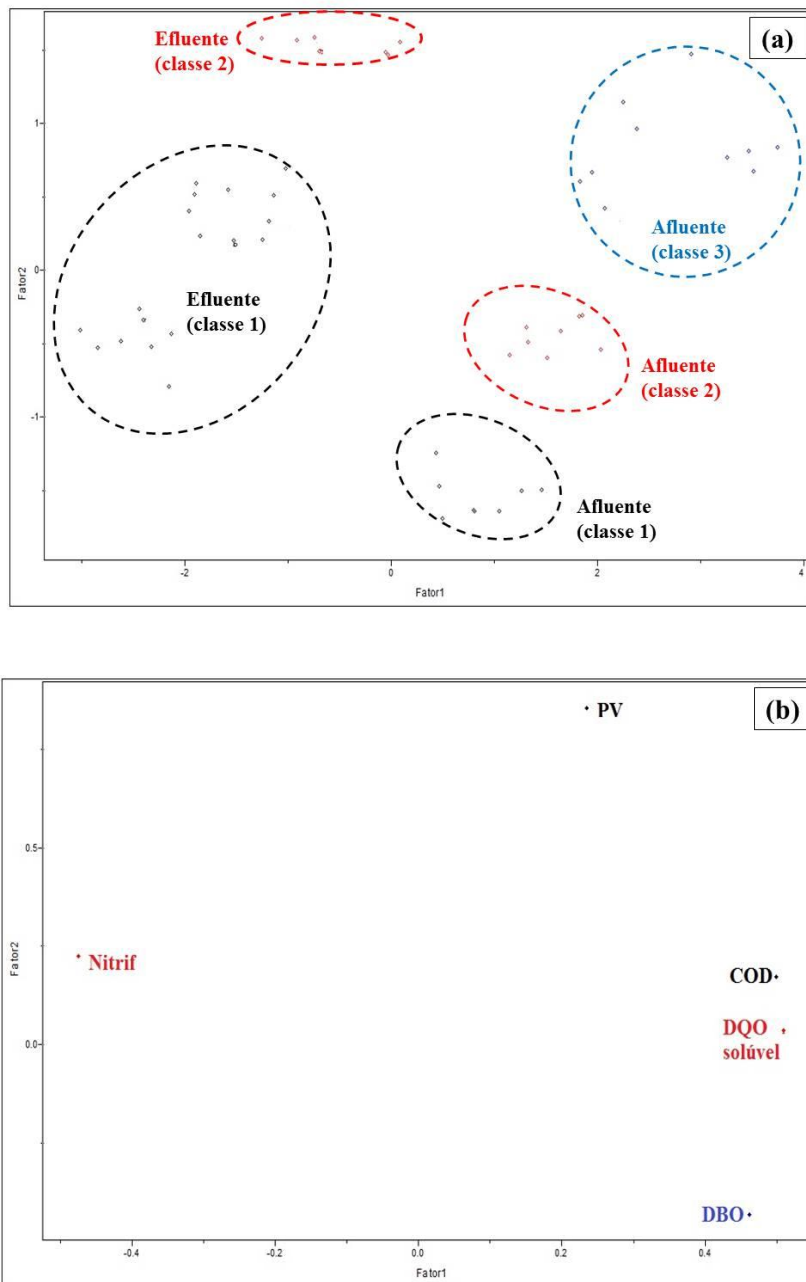
Na Figura 48a, o gráfico dos *scores* mostra o agrupamento das amostras em função da concentração de amônia livre (classe 1, de 0 a 0,5 mg L<sup>-1</sup>; classe 2, de 0,5 a 1 mg L<sup>-1</sup>; classe 3, de 2 a 3 mg L<sup>-1</sup>). As amostras mais próximas daquelas do reator controle (LAC) foram as do reator LA-2 %, evidenciando a proporção volumétrica de 2% foi mais apropriada do que 5 %.

Segundo o gráfico dos *loadings* (Figura 48b) e a Equação 16, DQO solúvel e COD foram as variáveis de maior peso na composição do primeiro fator. Devido à diferença entre a DQO solúvel e concentração de COD antes e após o tratamento aeróbio, houve separação entre os *scores* dos efluentes e afluentes, que se alocaram predominantemente nos valores positivos do primeiro fator (Figura 48a).

$$\text{Fator 1} = 0,2PV + 0,5DQO \text{ solúvel} + 0,5DBO + 0,5COD - 0,4Nitrif \quad (\text{Equação 16})$$

Ao contrário do primeiro fator, a composição do segundo fator teve maior influência das variáveis proporções volumétricas (PV) e DBO, conforme mostrado na Figura 49b e Equação 17.





**Figura 49** – Análise de componentes principais nos ensaios com reator de lodos ativados em escala piloto: (a) *scores* e (b) *loadings*.

(\*) Classe 1, 0 a 0,5 mgNH<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>; classe 2, 0,5 a 1 mg NH<sub>3</sub>L<sup>-1</sup>; classe 3, 2 a 3 mg NH<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>

$$\text{Fator 2} = 0,9PV + 0,03DQO \text{ solúvel} - 0,5DBO + 0,2COD + 0,2Nitrif \text{ (Equação 17)}$$

Analogamente ao primeiro fator, exceto para as amostras de afluente na proporção volumétrica de 5 %, os afluentes no segundo fator foram agrupados nos valores negativos dos *scores*. Essa separação se deu pela eficácia de nitrificação de 0 % nas amostras de afluente, que aumentou conforme o NAT foi oxidado a nitrato.

#### 5.1.4.6 *Aplicação do método proposto "Equivalente em ácido húmico"(Eq.A.H) para os ensaios com os reatores de lodos ativados em escala piloto*

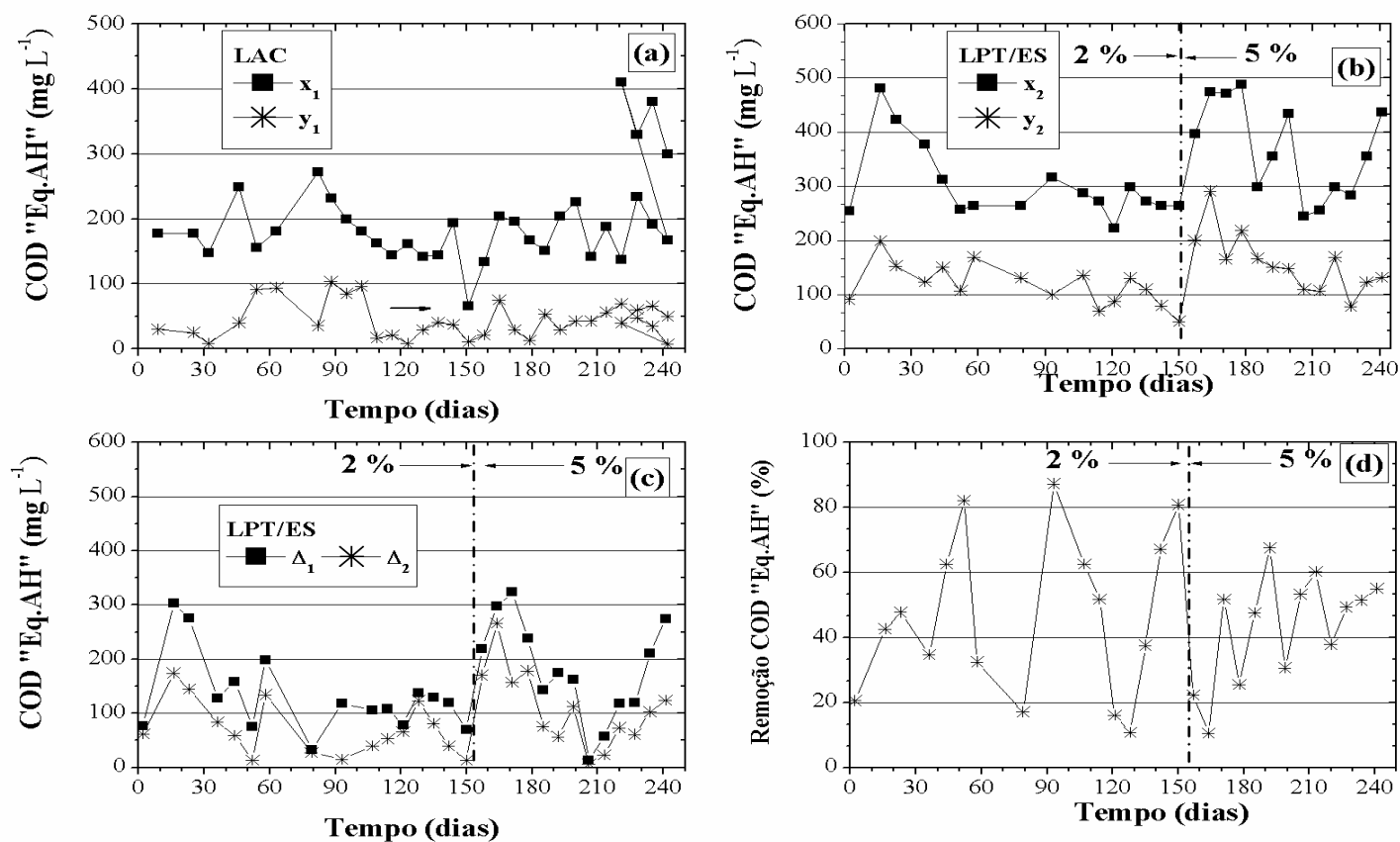
De acordo com a Figura 49, nas condições operacionais avaliadas nesta pesquisa, não foi possível remover completamente a matéria de difícil degradação, estimada como COD<sup>3</sup> "Eq.A.H", nem mesmo do esgoto sanitário. Porém, em todos os casos, houve degradação parcial do COD "Eq.AH".

Nota-se nas Figuras 49 e 50 que as remoções médias do COD "Eq. AH" nos reatores LAC, LA-2 % e LA-5 % foram de, respectivamente: 79, 47 e 36 %. O *box-plot* da Figura 50 mostra que houve grande variabilidade nos dados medidos durante a operação dos reatores, mas as eficiências das proporções volumétricas 0 e 5 % mostraram-se mais homogêneas do que aquelas referentes à proporção volumétrica de 2 %.

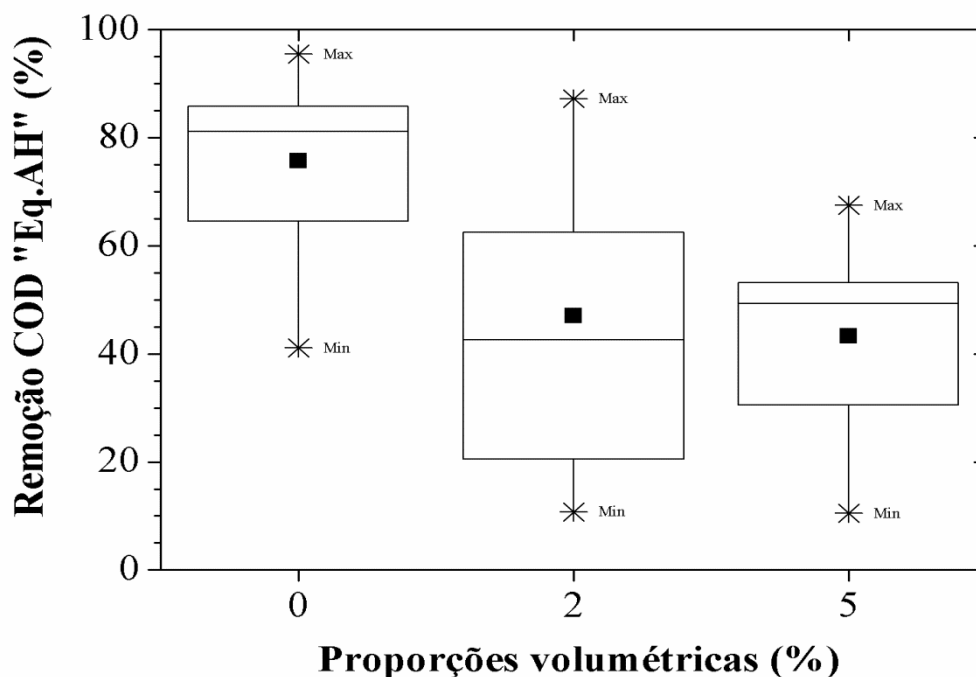
Os indícios de que a degradação parcial do lixiviado foi preponderante à sua simples diluição no esgoto se confirmam nas Figura 51 e 52, em que são apresentados os espectros de infravermelho com transformada de Fourier para os afluentes, efluentes e lodo dos reatores de lodos ativados piloto.

---

<sup>3</sup> As medidas de COD foram obtidas com amostras filtradas em membrana de 0,45 µm, sem acidificação.

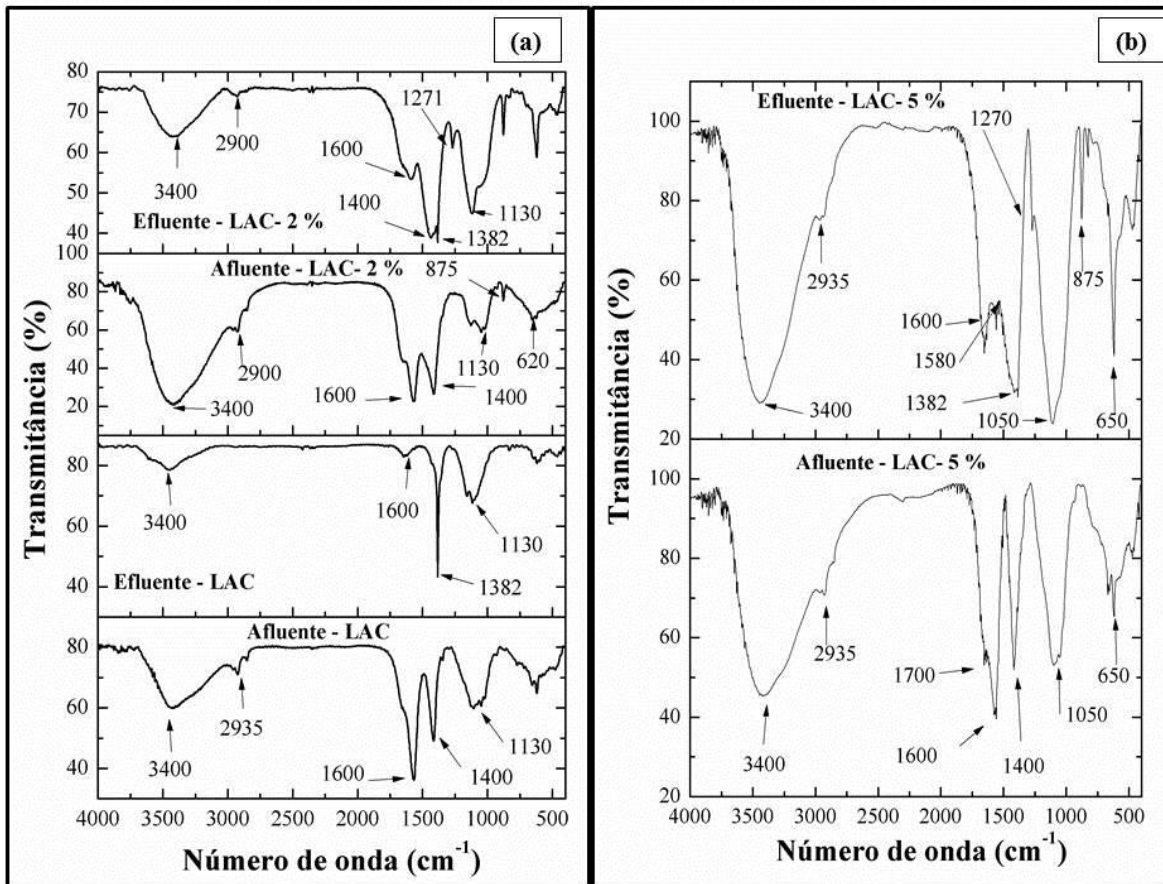


**Figura 49** – Aplicação do método “equivalente em ácido húmico” (Eq.AH) nos ensaios com os reatores piloto de lodos ativados: (a) COD “Eq.AH” para o esgoto sanitário, antes e após a aeração; (b) COD “Eq.AH” para a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário (LPT/ES) antes e após a aeração; (c) COD “Eq.AH” na mistura LPT/ES devido à adição de LPT, antes e após a aeração; (d) eficiência de remoção do COD “Eq.AH”.



**Figura 50** – *Box-plot* da remoção do COD “Eq.AH” em função das proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado, nos ensaios com os reatores de lodos ativados em escala piloto.

De acordo com a Figura 51a, comparando-se os espectros do afluente (esgoto sanitário) e efluente do reator controle (LAC), foram feitas as seguintes considerações: a intensidade de absorção da banda  $3400\text{ cm}^{-1}$  (estiramento de OH de álcoois ou fenóis) foi reduzida pela metade; as bandas  $2900\text{ cm}^{-1}$  (estiramento C-H de cadeias alifáticas) e  $1400\text{ cm}^{-1}$  (estiramento C=O do íon carboxilato) foram eliminadas; a intensidade de absorção da banda  $1600\text{ cm}^{-1}$  (C=C de aromáticos) foi reduzida em 73 %; por fim, detectou-se a banda  $1382\text{ cm}^{-1}$  (estiramento N-O) devido à presença de nitrato (Barber et al., 2001; Bu et al., 2010; Mantsh e Chapman, 1996; Silverstein et al., 2005; Stevenson et al., 1992). Essas informações comprovam a degradação da matéria orgânica por meio da oxidação de fenóis ou álcoois a ácido carboxílico/íon carboxilato, que é finalmente ser oxidado ao a  $\text{CO}_2$ .



**Figura 51** - Espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala piloto, controle (LAC) e alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 (LA-2 %) e 5 % (LA-5 %), com TDH de 24 h.

Os espectros dos afluentes dos reatores LA- 2 % e LA-5 % apresentaram as mesmas bandas do espectro do esgoto sanitário, porém, com maiores intensidades de absorção (Figura 51a). Adicionalmente, foram detectadas as bandas  $875\text{ cm}^{-1}$  e  $620\text{-}650\text{ cm}^{-1}$ , que são características do lixiviado e referentes a carbonato e sulfato.

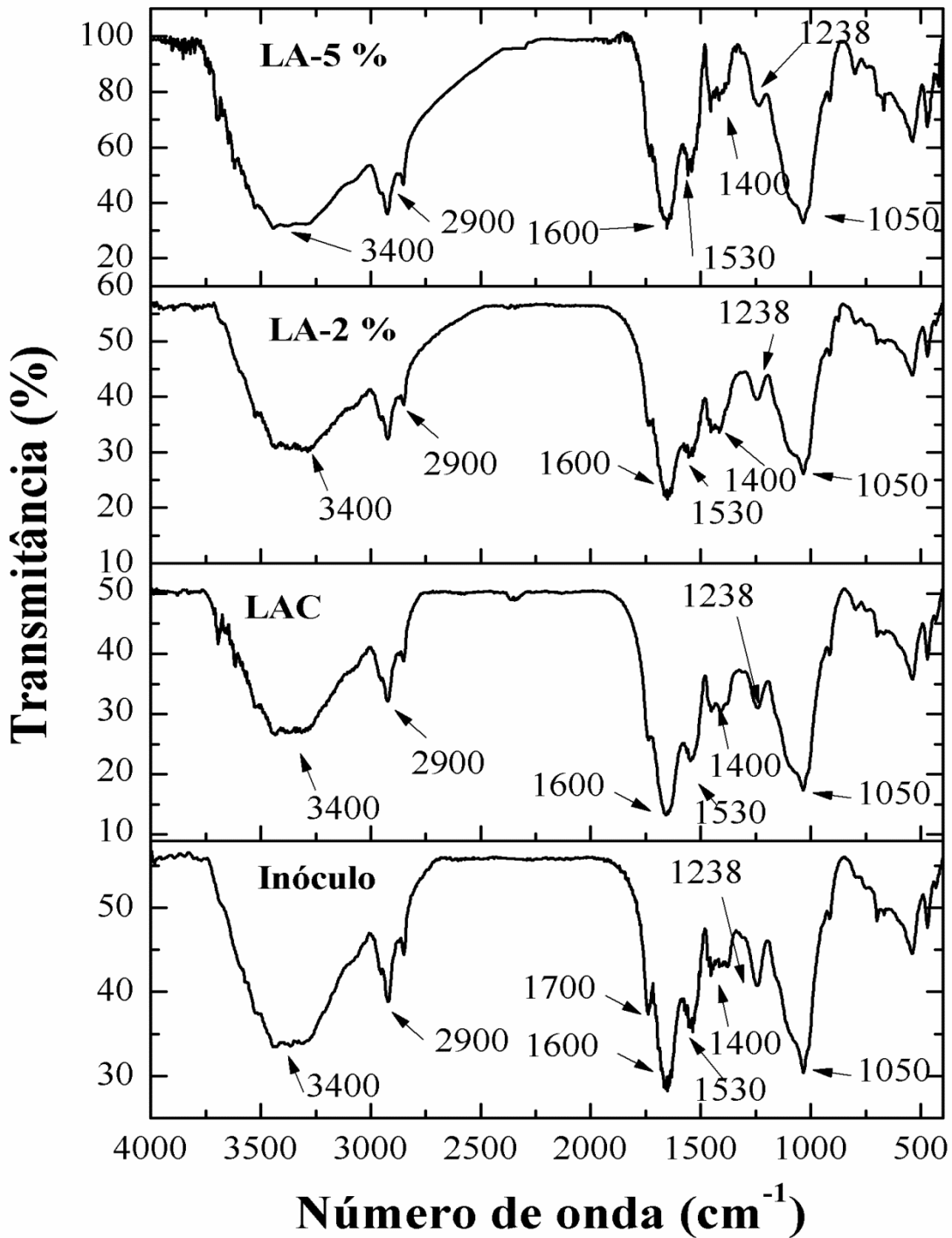
No reator LA-2 % observou-se a degradação da matéria orgânica comparando-se os espectros de seu afluente e efluente. Foi reduzida pela metade a intensidade de absorção da banda  $3400\text{ cm}^{-1}$ ; as bandas  $2900\text{ cm}^{-1}$  e  $1600\text{ cm}^{-1}$  também tiveram suas intensidades de absorção reduzidas em 40 % e a banda  $1400\text{ cm}^{-1}$  foi eliminada, indicando a oxidação parcial

de álcoois ou fenóis a ácido carboxílico/íon carboxilato, que é oxidado a  $\text{CO}_2$ . Em decorrência da nitrificação detectou-se a banda  $1382\text{ cm}^{-1}$ . A banda  $1267\text{ cm}^{-1}$  (estiramento C-O de ácido carboxílico ou C-N de amina ou amida), que não havia sido detectada nos espectros do afluente, foi detectada no efluente.

Avaliando a degradação aeróbia de resíduos sólidos orgânicos, Smidt e Meissl (2007) observaram o aparecimento dessa banda a  $1271\text{ cm}^{-1}$  após 21 dias de aeração e associaram seu aparecimento à quebra e posterior degradação de macromoléculas, como as substâncias húmicas, a monômeros.

Ao contrário dos reatores LAC e LA-2 %, o reator LA-5 % apresentou praticamente as mesmas bandas e intensidades de absorção nos espectros do afluente e efluente, confirmando os resultados das análises físico-químicas de que essa proporção volumétrica não foi a mais indicada ao tratamento consorciado (Figura 51b). Os resultados indicam que, para as condições operacionais do reator LA-5 %, a matéria orgânica foi removida mais por diluição do que por degradação.

De acordo com a Figura 52, em relação ao espectro do inóculo dos reatores, ao término de seus tempos de operação praticamente não houve alteração relevante no espectro desse lodo, confirmando os resultados do método “Eq.AH” de que, para proporção volumétrica de 2 %, a matéria orgânica foi parcialmente degradada pelos microrganismos, ao invés de removida por precipitação no lodo ou diluição.



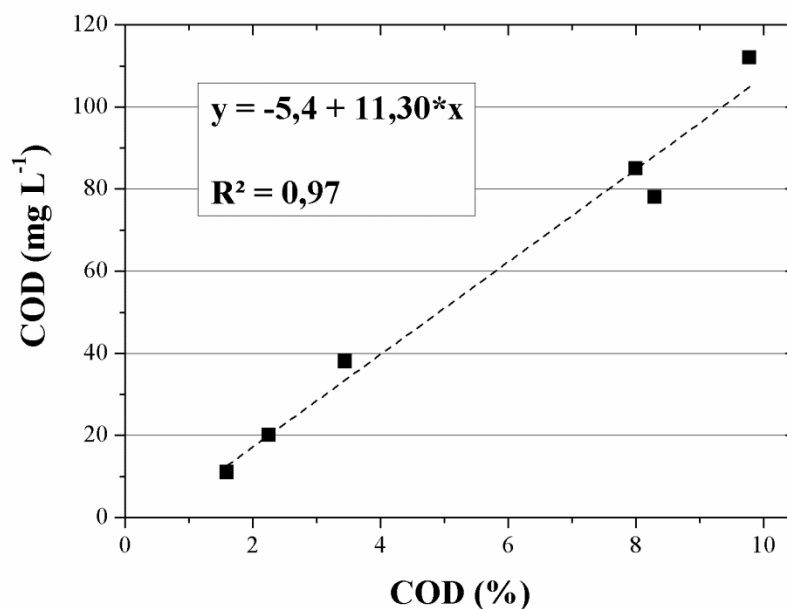
**Figura 52-** Espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de lodo dos reatores de lodos ativados (LA) em escala piloto operados com TDH de 24 h, e alimentados com lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário nas proporções volumétricas de 2 (LA-2 %) e 5 % (LA-5 %).

#### 5.1.4.7 Resultados dos exames microscópicos aplicados aos reatores de lodos ativados em escala piloto

Nas Figuras 53 e 54 são apresentados os resultados da aplicação do método proposto nesta Tese para quantificação do carbono não assimilado pelos microrganismos, por meio do teste de coloração com nanquim.

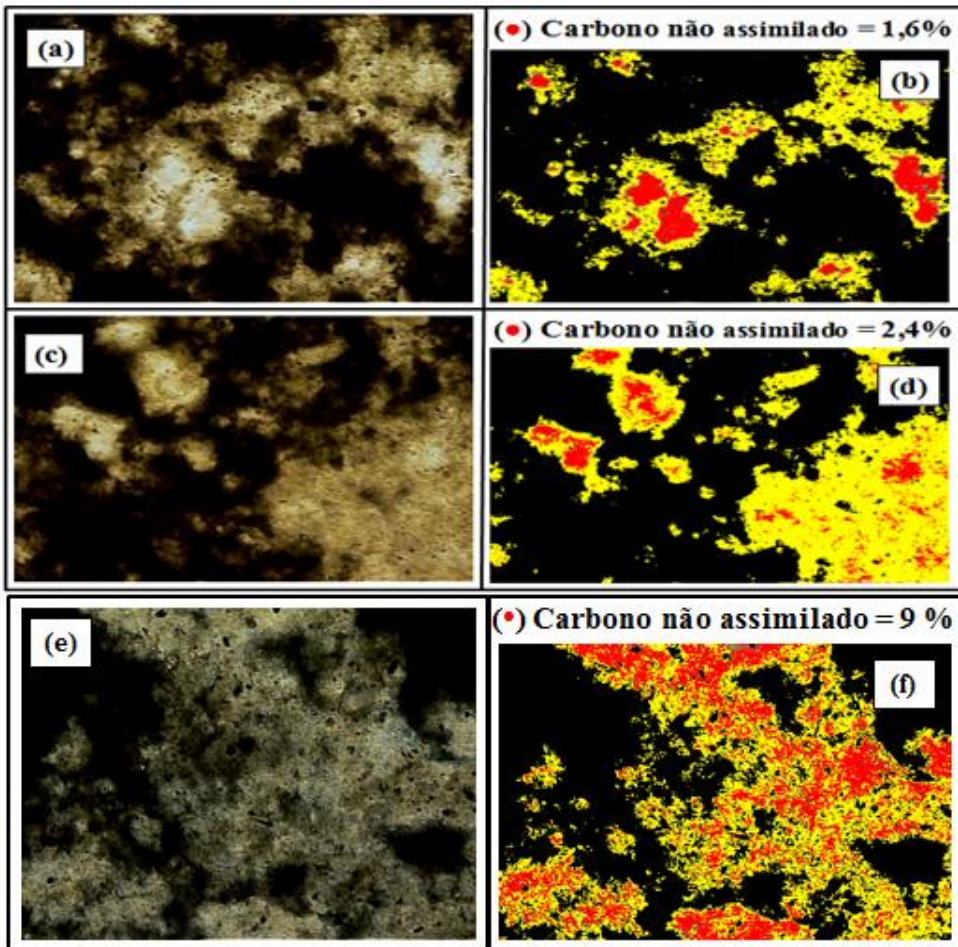
Nota-se na Figura 53 que houve boa correlação entre o COD estimado pelo método proposto e as medidas de COD, indicando a viabilidade desse procedimento alternativo para monitoramento da matéria orgânica.

Assim como indicaram as variáveis físico-químicas, a proporção volumétrica de lixiviado de 2 % foi a mais indicada ao tratamento consorciado. O teor de COD do reator LAC foi 33 % menor do que no reator LA-2 %, enquanto para o reator LA-5 % essa diferença chega a 82 % (Figura 54).



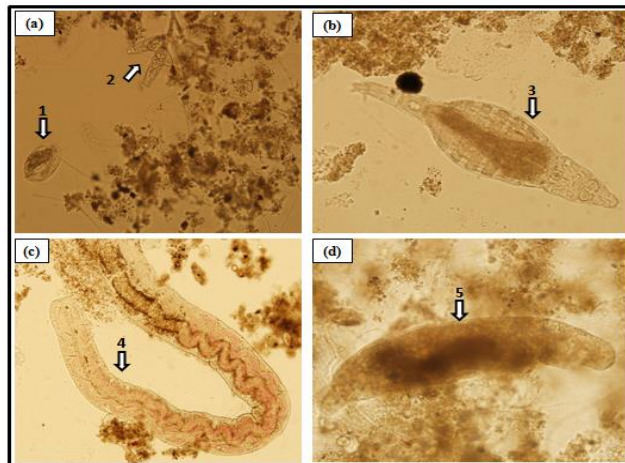
**Figura 53-** Relação entre as medidas de COD nos efluentes dos reatores piloto de lodos ativados e o COD no tanque de aeração, estimado quantitativamente com teste de coloração por nanquim.



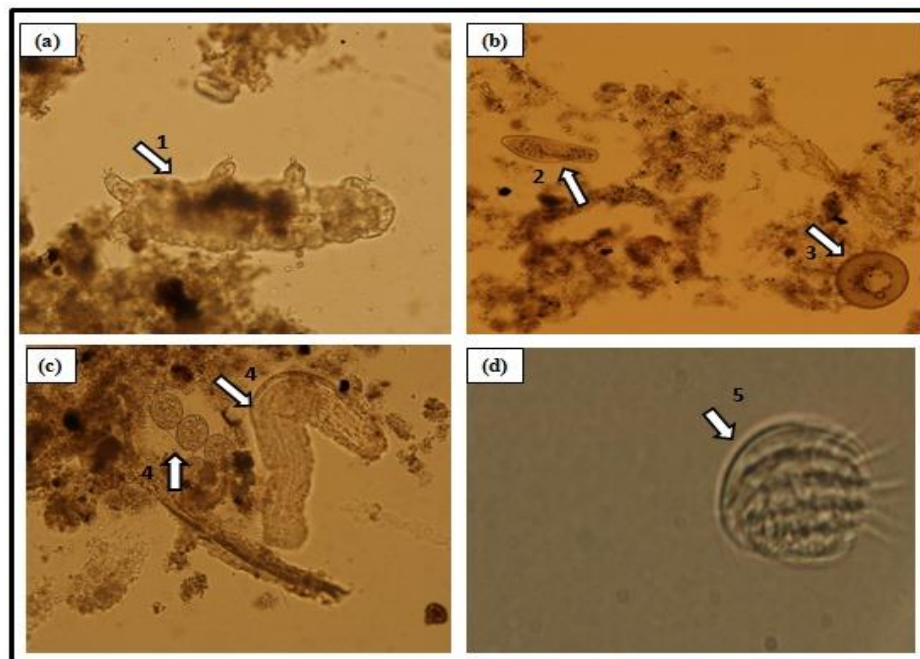


**Figura 54** – Aplicação do teste de coloração com nanquim e quantificação do carbono não assimilado em amostras do tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala piloto: (a-b) LAC controle e (c-d) mistura LPT/ES 2 %.

Os exames de microscopia ótica comum indicaram que a diversidade de microrganismos nos reatores LAC e LA-2 % foi similar (Figuras 55-56 e Tabelas 12 e 13). Nota-se nas Figuras 55 e 56 a presença de tardígrados e aspidisca, microrganismos indicadores de nitrificação e que são sensíveis à presença de amônia (Jenkins et al., 2003). No reator LA-5 %, a diversidade de microrganismos foi menor. Devido à maior concentração de amônia livre (em relação ao reator LA-2 %), não se observou tardígrados e aspidisca no lodo do reator LA-5 %. Houve predominância de bactérias coloniais e arcelas. Nas três condições avaliadas, observaram-se bactérias filamentosas, porém, não em quantidade suficiente para influenciar na sedimentabilidade do lodo.



**Figura 55** – Microscopia ótica comum das amostras do tanque de aeração do reator LAC: (a) 1 - protozoário rastejante semelhante à *Aspidisca* sp, com aumento de 200x, 2 - protozoário fixo semelhante a *Vorticella* sp, com aumento de 200 x; (b) 3 - rotífero, com aumento de 200 x; (c) 4 – Oligochaeta semelhante *Tubifex* sp, com aumento de 200 x; (d) 5 – tardígrado, com aumento de 200 x.



**Figura 56** – Microscopia ótica comum das amostras do tanque de aeração do reator de LA-2 % alimentado com a mistura LPT/ES: (a) 1 - tardígrado, com aumento de 200 x; (b) 2 - protozoário ciliado semelhante ao *Paramecium* sp, com aumento de 200x, 3 - tecameba semelhante a *Arcella* sp, com aumento de 200 x; (c) 4 – nematóide e ovos de nematóides, com aumento de 200 x; (d) 5 – protozoário rastejante, semelhante à *Aspidisca* sp, com aumento de 200 x.

**Tabela 12** – Frequência da microfauna dos reatores piloto de lodos ativados controle (LAC) e alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (LA-2 %) (adaptado de Povinelli et al., 1989).

| LAC    |           |     |              |      |                          |             |     |      | LA- 2 % |           |     |              |      |                      |             |     |      |
|--------|-----------|-----|--------------|------|--------------------------|-------------|-----|------|---------|-----------|-----|--------------|------|----------------------|-------------|-----|------|
| t      | Bactérias |     | Protozoários |      |                          | Metazoários |     |      | t       | Bactérias |     | Protozoários |      |                      | Metazoários |     |      |
| (dias) | col.      | fil | fixos        | flag | livres<br>nat/<br>rastej | Rot         | Nem | Tard | (dias)  | col.      | fil | fixos        | flag | livres<br>nat/rastej | Rot         | Nem | Tard |
| 2      | +++       | +   | ++           | +    | +++                      | +++         | ND  | +++  | 2       | +++       | ++  | ++           | +    | +++                  | +++         | +   | ND   |
| 4      | +++       | +   | ++           | +    | +++                      | +++         | ND  | +++  | 16      | +++       | ++  | ++           | +    | +++                  | +++         | +   | ND   |
| 32     | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | ++          | ND  | +++  | 44      | +++       | ++  | ++           | +    | +++                  | +++         | +++ | +    |
| 46     | +++       | +   | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 52      | +++       | ++  | ++           | +    | +++                  | +++         | +++ | +    |
| 82     | +++       | +   | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | ++   | 79      | ++        | ++  | ++           | ND   | ++                   | ++          | +++ | +++  |
| 95     | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | +++         | ++  | ++   | 93      | ++        | ++  | ++           | ND   | ++                   | ++          | ++  | +++  |
| 109    | +++       | ND  | ++           | ND   | +++                      | +++         | ++  | ++   | 107     | ++        | +   | ++           | +    | +++                  | +++         | +++ | +++  |
| 116    | +++       | ND  | ++           | ND   | +++                      | ++          | +   | ++   | 114     | +++       | +   | ++           | ND   | +++                  | +++         | ++  | ++   |
| 123    | +++       | ND  | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 121     | +++       | +   | ++           | ND   | +++                  | +++         | ++  | +++  |
| 130    | +++       | +   | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 128     | +++       | ++  | +++          | ND   | +++                  | +++         | ++  | +    |
| 137    | +++       | +   | +            | ND   | +++                      | +++         | +   | ++   | 135     | ++        | ++  | +++          | ND   | +++                  | +++         | ++  | +    |
| 144    | +++       | ND  | ++           | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 142     | +++       | ++  | ++           | ND   | +++                  | +++         | ++  | ++   |
| 151    | +++       | ND  | ++           | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 150     | ++        | ++  | ++           | ND   | +++                  | +++         | ++  | +++  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; col.: coloniais; fil.: filamentosas; flag: flagelados; nat: natantes; rastej: rastejantes; rot: rotífero; nem: nematodo; tard: tardígrado; t: tempo.

**Tabela 13** – Frequência da microfauna dos reatores piloto de lodos ativados controle e alimentado com lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 5 % (LA-5 %) (adaptado de Povinelli et al., 1989).

| LAC    |           |     |              |      |                          |             |     |      | LA- 5 % |           |     |              |      |                      |             |     |      |
|--------|-----------|-----|--------------|------|--------------------------|-------------|-----|------|---------|-----------|-----|--------------|------|----------------------|-------------|-----|------|
| t      | Bactérias |     | Protozoários |      |                          | Metazoários |     |      | t       | Bactérias |     | Protozoários |      |                      | Metazoários |     |      |
| (dias) | col.      | fil | fixos        | flag | livres<br>nat/<br>rastej | Rot         | Nem | Tard | (dias)  | col.      | fil | fixos        | flag | livres<br>nat/rastej | Rot         | Nem | Tard |
| 158    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | +++         | ND  | +    | 2       | ++        | ++  | ++           | +    | +                    | ++          | +++ | ND   |
| 165    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | +++         | ND  | ++   | 16      | ++        | ++  | +            | +    | ++                   | +           | +++ | ND   |
| 172    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | ++          | ND  | ++   | 44      | +         | ++  | +            | +    | ++                   | +           | +++ | ND   |
| 179    | +++       | +   | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | +    | 52      | +         | ++  | ++           | ND   | ++                   | +           | +++ | ND   |
| 186    | +++       | +   | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | ++   | 79      | +         | ++  | +            | ND   | ++                   | ++          | +++ | ND   |
| 193    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | +++         | ND  | ++   | 93      | ++        | ++  | +            | ND   | ++                   | +           | ++  | ND   |
| 200    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | +++         | ND  | +++  | 107     | ++        | +   | +            | ND   | ++                   | +           | +++ | ND   |
| 207    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | ++          | ND  | ++   | 114     | +         | +   | +            | ND   | ++                   | ++          | ++  | ND   |
| 214    | +++       | +   | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 121     | +         | +   | ++           | ND   | ++                   | +           | ++  | ND   |
| 221    | +++       | +   | +++          | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 128     | ++        | ++  | ++           | ND   | ++                   | ++          | ++  | ND   |
| 228    | +++       | +   | +            | ND   | +++                      | +++         | +   | +++  | 135     | +         | ++  | ++           | ND   | ++                   | +           | +++ | ND   |
| 235    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | +++         | +   | +    | 142     | ++        | ++  | +            | ND   | ++                   | ++          | +++ | ND   |
| 242    | +++       | +   | ++           | ND   | +++                      | +++         | +   | ++   | 150     | +         | ++  | +            | ND   | ++                   | +           | ++  | ND   |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; col.: coloniais; fil.: filamentosas; flag: flagelados; nat: natantes; rastej: rastejantes; rot: rotífero; nem: nematodo; tard: tardígrado; t: tempo.

### **5.1.5 Desempenho do biofiltro aerado submerso em escala piloto no tratamento da mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário**

Nesta seção, a discussão dos resultados será conduzida em função dos parâmetros referentes à remoção de matéria orgânica e nitrogênio. As concentrações dos parâmetros físico-químicos medidos podem também ser consultadas no Anexo C.

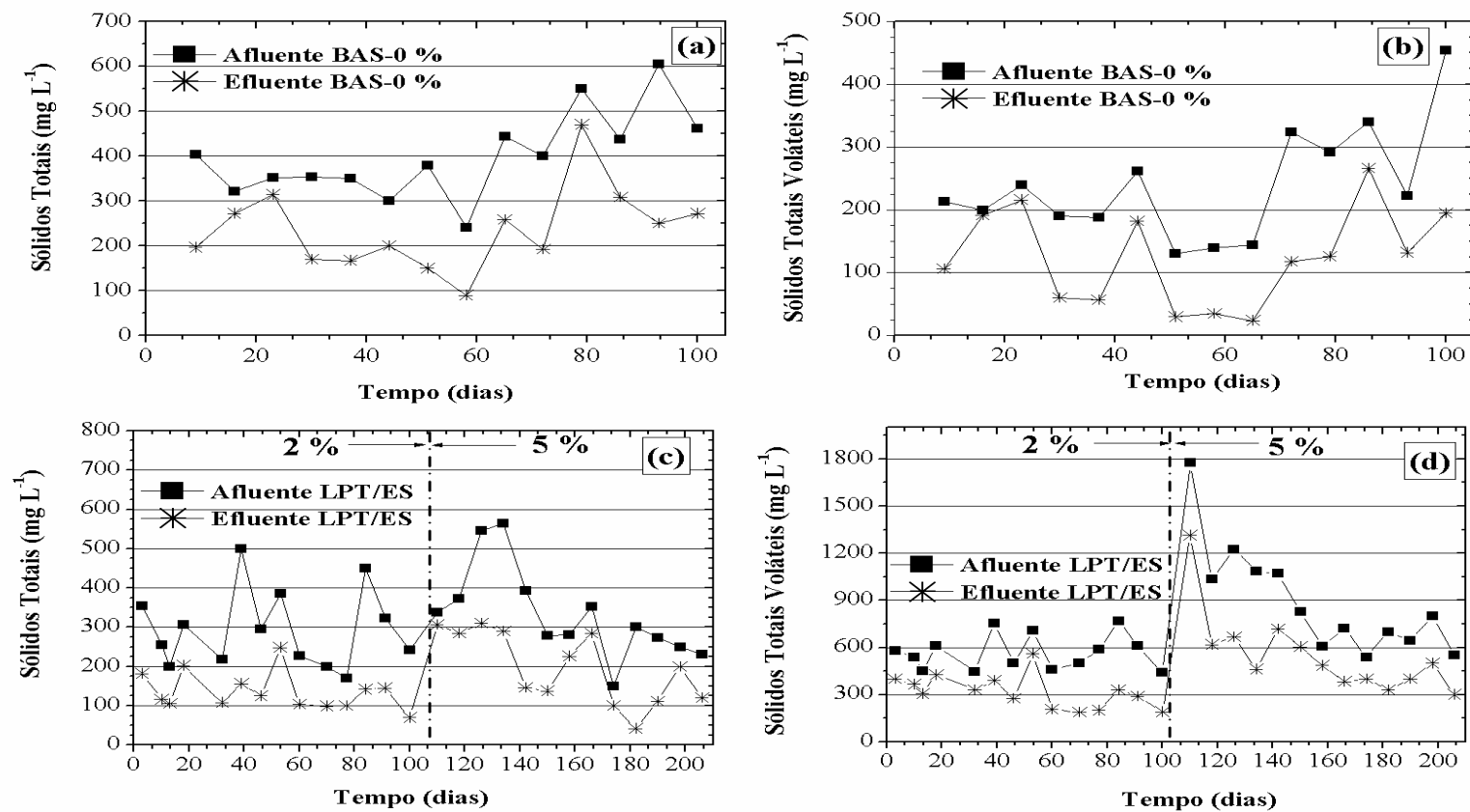
Os dois biofiltros utilizados foram operados em regime contínuo de alimentação, com TDH de 24 h, assim como os reatores de lodos ativados. Por facilidade, serão adotadas as seguintes siglas para os reatores e seus afluentes:

- biofiltro aerado submerso controle, alimentado com esgoto sanitário: BAS-0 %;
- biofiltro aerado submerso alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 2 %: BAS-2 %;
- biofiltro aerado submerso alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 5 %: BAS-5 %;

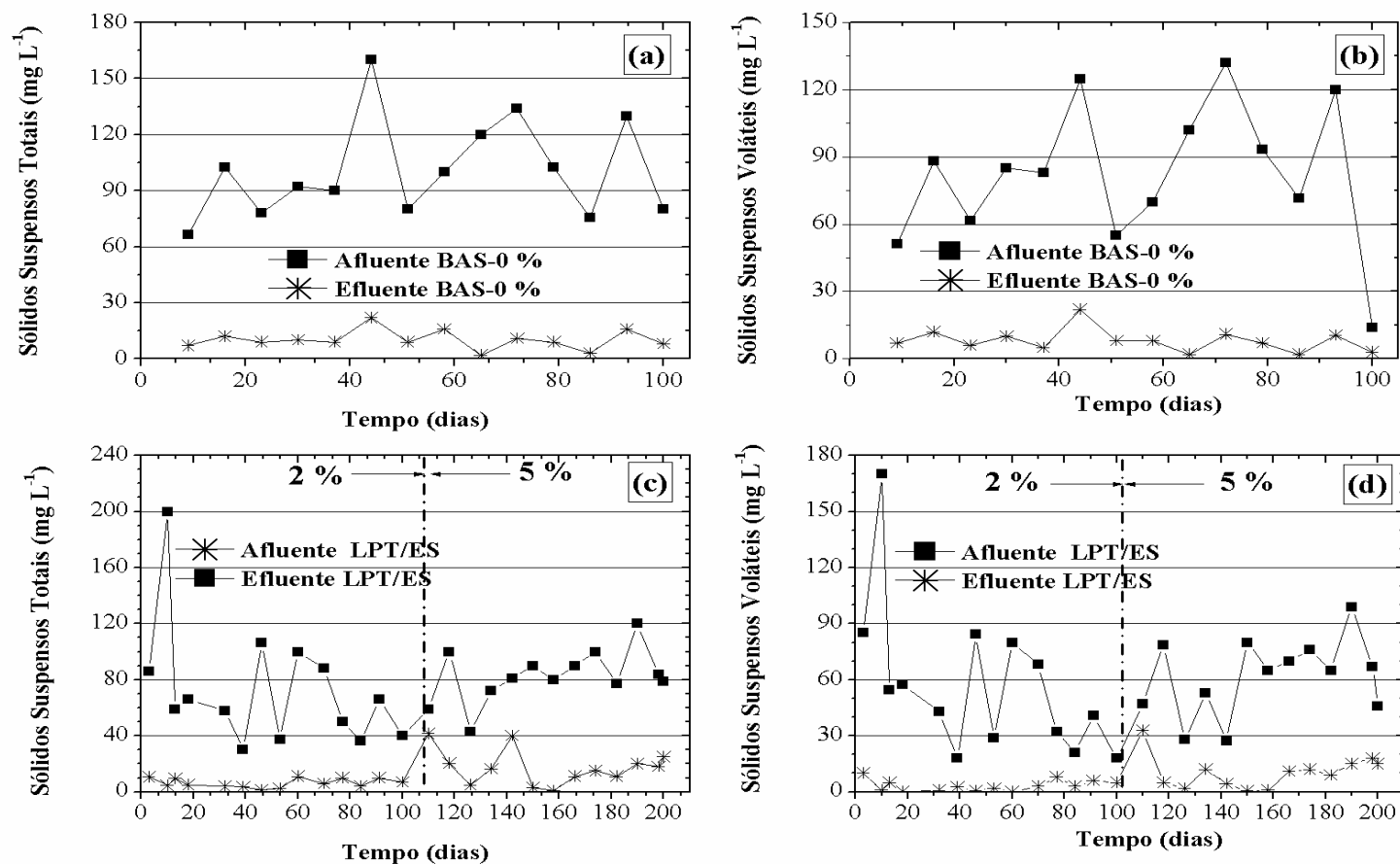
#### **5.1.5.1 Série de sólidos nos ensaios com os biofiltros aerados submersos em escala piloto**

As eficiências médias de remoção dos ST e STV foram de: 42 e 47 % no BAS-0 %; 44 % e 53 % para o BAS-2 %; e 40 % para o BAS-5 % (Figura 57). Os reatores também foram eficazes na remoção dos SST e SSV: 90 % para BAS-0 % e BAS-2 %; e 80 % para o BAS-5 % (Figura 58). Durante os 100 dias de operação dos reatores, a concentração de SSV

nos efluentes foi inferior a  $20 \text{ mg L}^{-1}$ , confirmando a importante capacidade de retenção do material particulado.



**Figura 57** – Variação da concentração de sólidos em função do tempo: (a) ST no BAS-0 % e (b) ST no BAS alimentado com a mistura LPT/ES a 2 e 5 %; (c) STV no BAS-0 % e (d) STV no BAS alimentado com a mistura LPT/ES a 2 e 5 %.



**Figura 58** – Variação da concentração de sólidos suspensos em função do tempo: (a) SST no BAS-0 % e (b) SSV no BAS-0 %; (c) SST no BAS alimentado com a mistura LPT/ES a 2 e 5 % e (d) SSV no BAS alimentado com a mistura LPT/ES a 2 e 5 %.

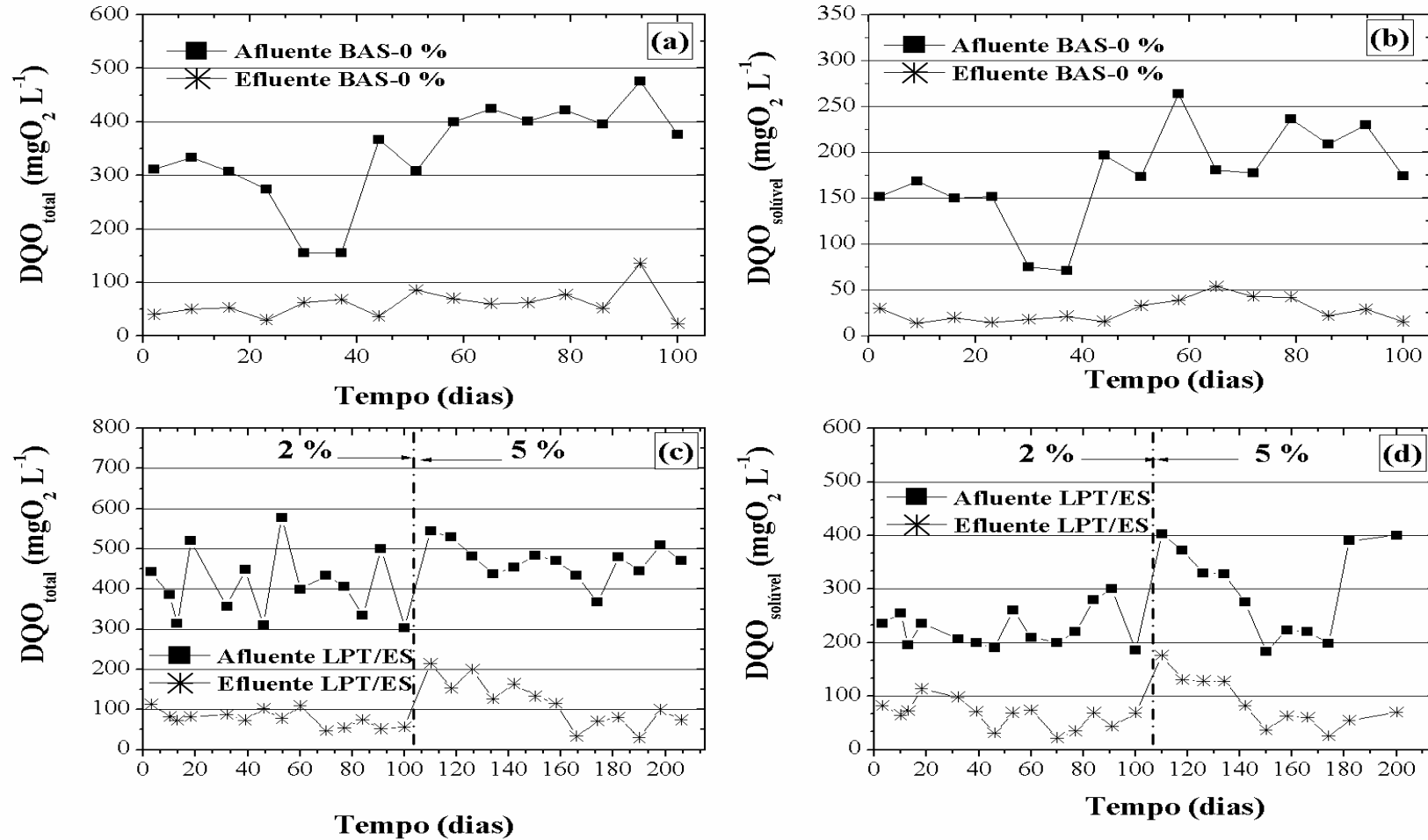
### 5.1.5.2 *DBO, DQO, COT e COD nos ensaios com os biofiltros aerados submersos em escala piloto*

Operando com carga orgânica volumétrica (COV) de  $340 \text{ kg COD m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , o BAS-0 % removeu: 98 % da DBO, 80 % da DQO total e solúvel, e 83 % do COD, no decorrer de 100 dias de operação (Figuras 59 e 60). Aumentando a COV para  $0,4 \text{ kg COD m}^{-3} \text{ d}^{-1}$  com a adição de lixiviado pré-tratado a 2 %, o BAS-2 % pôde remover: 98 % da DBO e 80 % da DQO total, 73 % da DQO solúvel e 80 % do COD. Na proporção volumétrica de 5 % e COV de  $0,5 \text{ kg COD m}^{-3} \text{ d}^{-1}$ , o BAS-5 % removeu: 98 % of DBO, 76 % da DQO total, 69 % da DQO solúvel e 75 % do COD (Figuras 59 e 60).

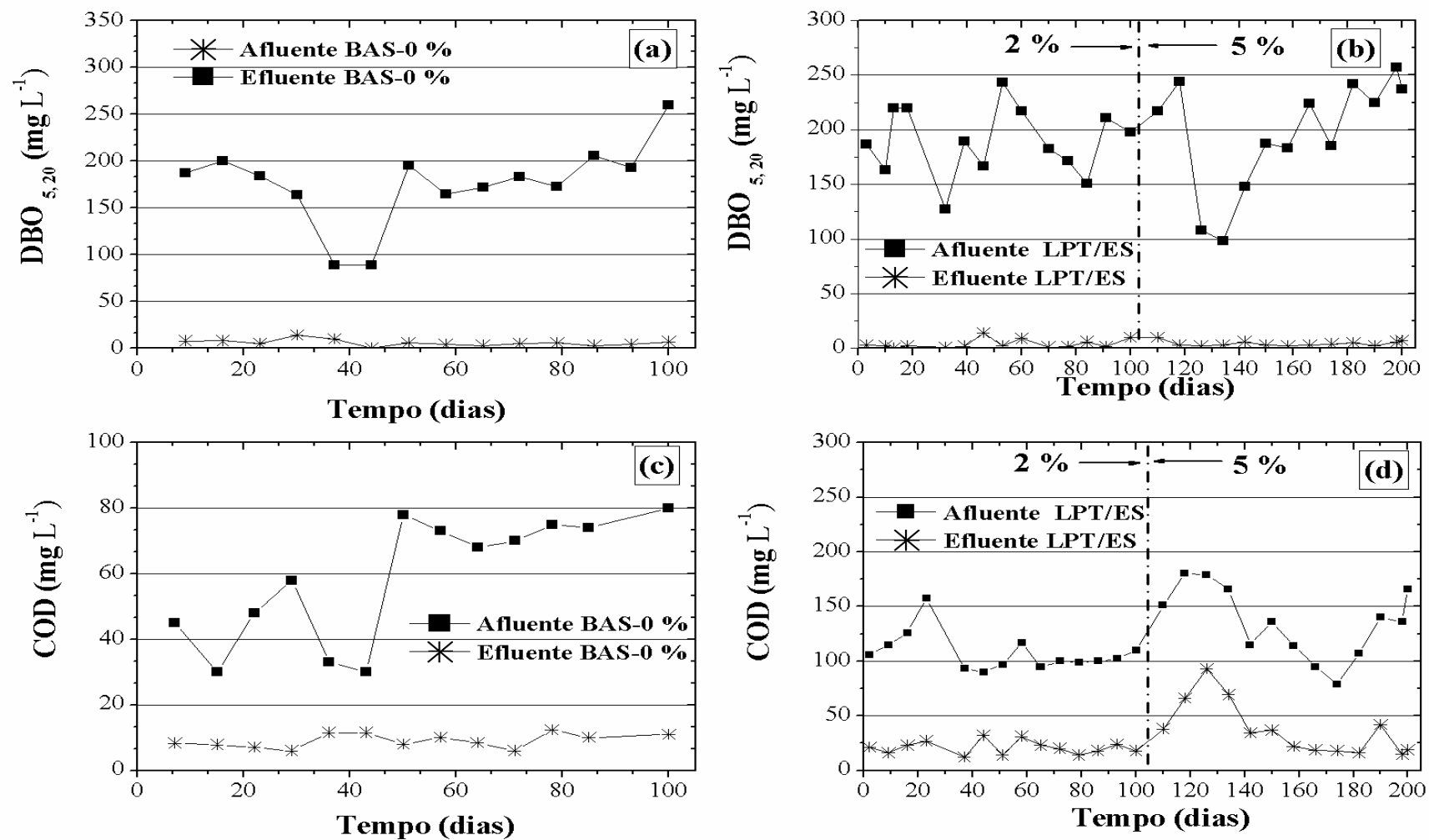
Para as três proporções volumétricas testadas (0 %, 2 % e 5 %) a DBO média nos efluentes tratados foi inferior a  $10 \text{ mgO}_2 \text{ L}^{-1}$ , atendendo aos padrões de lançamento da Resolução CONAMA 430/2011.

O teste ANOVA indicou que, para o nível de significância de 0,01, as médias de remoção da DBO ( $F = 1,6$  e  $F$  crítico = 5), COD ( $F = 2$  e  $F$  crítico = 3) e DQO total ( $F = 0,9$  e  $F$  crítico = 5) foram estaticamente iguais. No entanto, as diferenças nas médias de remoção da DQO solúvel não foram devidas ao acaso ( $F = 6$  e  $F$  crítico = 5).





**Figura 59**– Remoção da matéria orgânica em função do tempo: DQO total (a) no BAS controle e (b) no BAS alimentado com a mistura LPT/ES 2 %; DQO solúvel (c) no BAS controle e (d) no BAS alimentado com a mistura LPT/ES 2 %.



**Figura 60**– Remoção da matéria orgânica em função do tempo: DBO (a) no BAS-0 % e (b) no biofiltro alimentado com lixiviado pré-tratado/esgoto a 2 e 5 %; COD (c) no BAS-0 % e (d) no biofiltro alimentado lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 e 5 %.

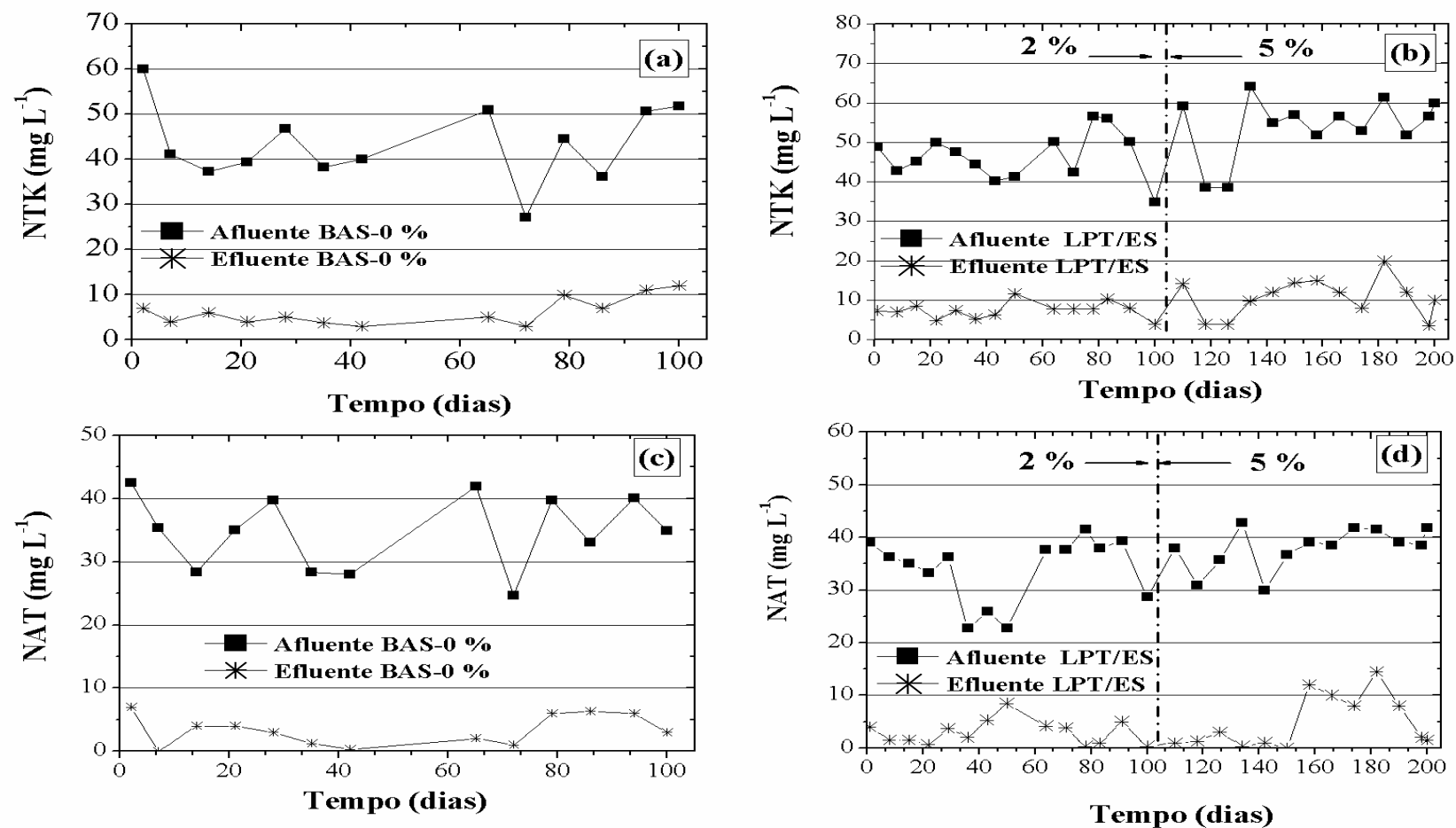
### 5.1.5.3 *NTK, NAT, nitrito e nitrato nos ensaios com os biofiltros aerados submersos em escala piloto*

De acordo com a Figura 61, as remoções médias de NTK e NAT foram de: de 86 e 91 % para o BAS-0 %; 84 e 90 % para o BAS-2 %; 81 e 88 % para o BAS-5 %. Para o nível de significância de 0,01 o teste ANOVA indicou que essas eficiências são idênticas ( $F = 0.1$ ;  $F_{critical} = 5$ ). A remoção do NAT se deu, majoritariamente, por nitrificação, cujas taxas foram de: 83 % para o BAS-0 % e 77 % tanto para o BAS-2 % quanto para o BAS-5 % (Figura 62).

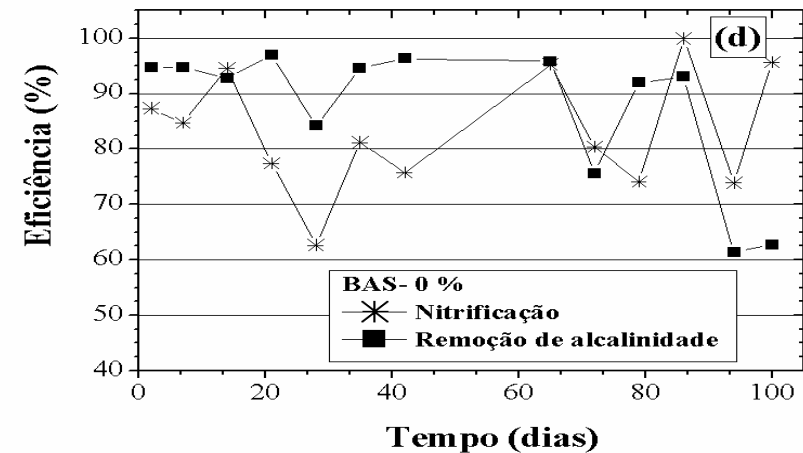
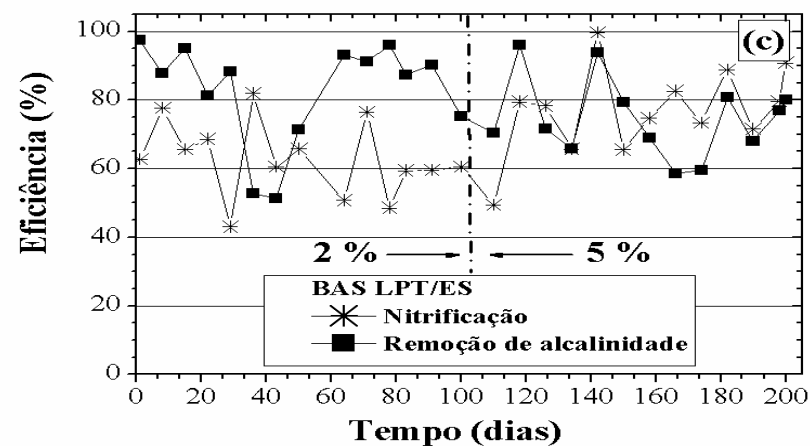
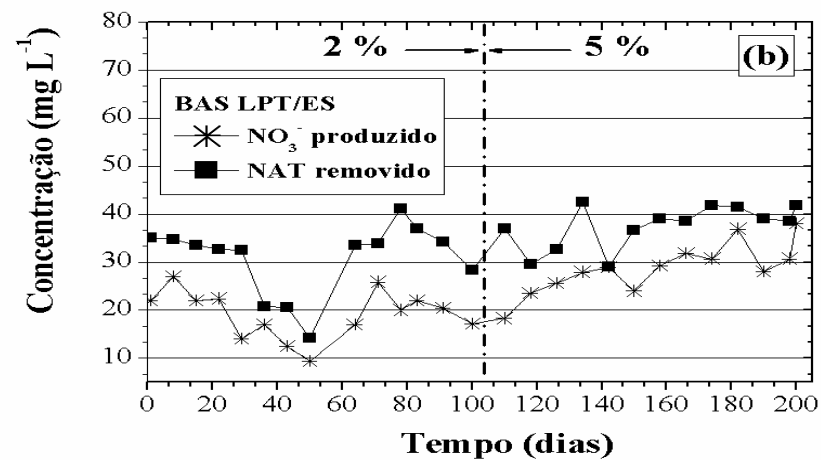
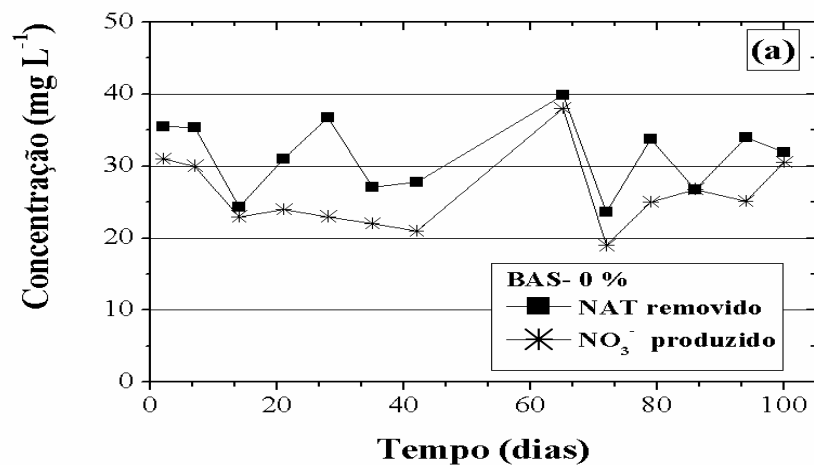
Novamente, essas médias foram consideradas idênticas pelo teste ANOVA para o nível de significância de 0,01, indicando que o biofiltro apresentou melhor capacidade de assimilar os efeitos tóxicos do lixiviado pré-tratado do que os reatores de lodos ativados.

Assim como para os reatores de lodos ativados, nos biofiltros houve remoção da alcalinidade consoante à nitrificação, como mostrado na Figura 62.

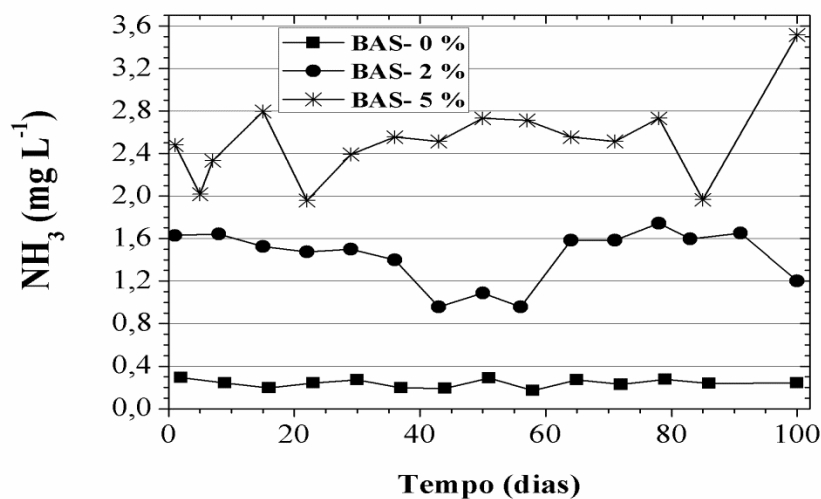
Nota-se na Figura 63 que as concentrações médias de  $\text{NH}_3$  nos afluentes dos biofiltros foram similares às daquelas dos reatores de lodos ativados (BAS-0 %:  $0,24 \text{ mg L}^{-1}$ ; BAS-2 %:  $1,44 \text{ mg L}^{-1}$ ; BAS-5 %:  $2,52 \text{ mg L}^{-1}$ ). Todavia, processo de biomassa aderida apresentou maior estabilidade às concentrações de  $\text{NH}_3$  no decorrer da operação.



**Figura 61** – Variação temporal da concentração de NTK (a) no BAS-0 % e (b) no BAS-2 % e BAS-5 % , e de NAT(c) no BAS-0 % e (d) no BAS-2 % e BAS-5 % .



**Figura 62**– NAT removido e nitrato produzido (a) no BAS- 0 % e (b) no BAS-2 % e BAS-5 %, e eficiência de nitrificação e remoção da alcalinidade (c) no BAS-2 % e BAS-5 %, e (d) no BAS-0 %.



**Figura 63** – Concentração de  $\text{NH}_3$  nos afluentes dos reatores BAS-0 %, BAS-2 % e BAS-5 %.

#### 5.1.5.4 Concentração de metais no ensaio com os biofiltros aerados submersos em escala piloto

No Quadro 2 é apresentada a concentração de metais nas amostras do afluente, efluente e lodo dos biofiltros. Como nos ensaios com os reatores de lodos ativados, a concentração dos metais analisados nas amostras do afluente, efluente e lodo dos biofiltros foi bastante inferior aos limites máximos determinados pelas Resoluções CONAMA 430/11 e 380/06.

**Quadro 2** – Concentração média de metais nas amostras dos BAS-0 %, BAS-2 % e BAS-5 %, operados com TDH de 24 h por 100 dias.

| <i>Reatores</i> | <i>Metais</i>                       | <i>Zn</i> | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Ni</i> | <i>Fe</i> | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | <i>Cr</i> |
|-----------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                 | <i>Amostras</i>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                 | <b>Inóculo (mg kg<sup>-1</sup>)</b> | 337       | 28        | 0,2       | 22        | 9960      | 173       | 13        | 42        |
| <b>BAS-0 %</b>  | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,06      | 0,16      | 0,02      | 0,01      | 0,25      | 0,02      | 0,015     | 0,02      |
|                 | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,03      | 0,13      | 0,01      | 0         | 0,02      | 0,01      | 0,014     | 0         |
|                 | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 1206      | 429       | 4         | 70        | 12188     | 70        | 1269      | 152       |
| <b>BAS-2 %</b>  | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,23      | 0,11      | 0,01      | 0,03      | 0,88      | 0,02      | 0,77      | 0,01      |
|                 | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,02      | 0,08      | 0,01      | 0,01      | 0,1       | 0,01      | 0,01      | 0         |
|                 | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 938       | 37        | 1,6       | 26        | 8652      | 76        | 554       | 49        |
| <b>BAS-5 %</b>  | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,11      | 0,15      | 0,025     | 0,04      | 0,86      | 0,02      | 0,06      | 0         |
|                 | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,05      | 0,10      | 0,020     | 0,02      | 0         | 0,10      | 0,001     | 0         |
|                 | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 1102      | 26        | 5         | 42        | 2480      | 0         | 475       | 0         |

Af: afluente; Ef: efluente.

#### 5.1.5.5 *Análise de Componentes Principais (PCA) nos ensaios com os biofiltros aerados submersos em escala piloto*

Como nos ensaios anteriores, foi bem sucedida a aplicação da PCA aos dados obtidos com o biofiltro aerado submerso. A matriz inicial dos dados com 82 linhas por 6 colunas foi reduzida a uma matriz de 2x6, mantendo 95 % das informações (variância acumulada) originais com apenas 2 componentes principais ou fatores (Figura 64).

Na Figura 64a, o gráfico dos *scores* mostra o agrupamento das amostras em função da concentração de amônia livre (classe 1, de 0 a 0,5 mg L<sup>-1</sup>; classe 2, de 0,5 a 1 mg L<sup>-1</sup>; classe 3, de 2 a 3 mg L<sup>-1</sup>). As amostras mais próximas daquelas do reator controle, BAS-0 %, foram as do reator BAS-2 %, evidenciando que a proporção volumétrica de 2 % foi mais apropriada do que 5 %.

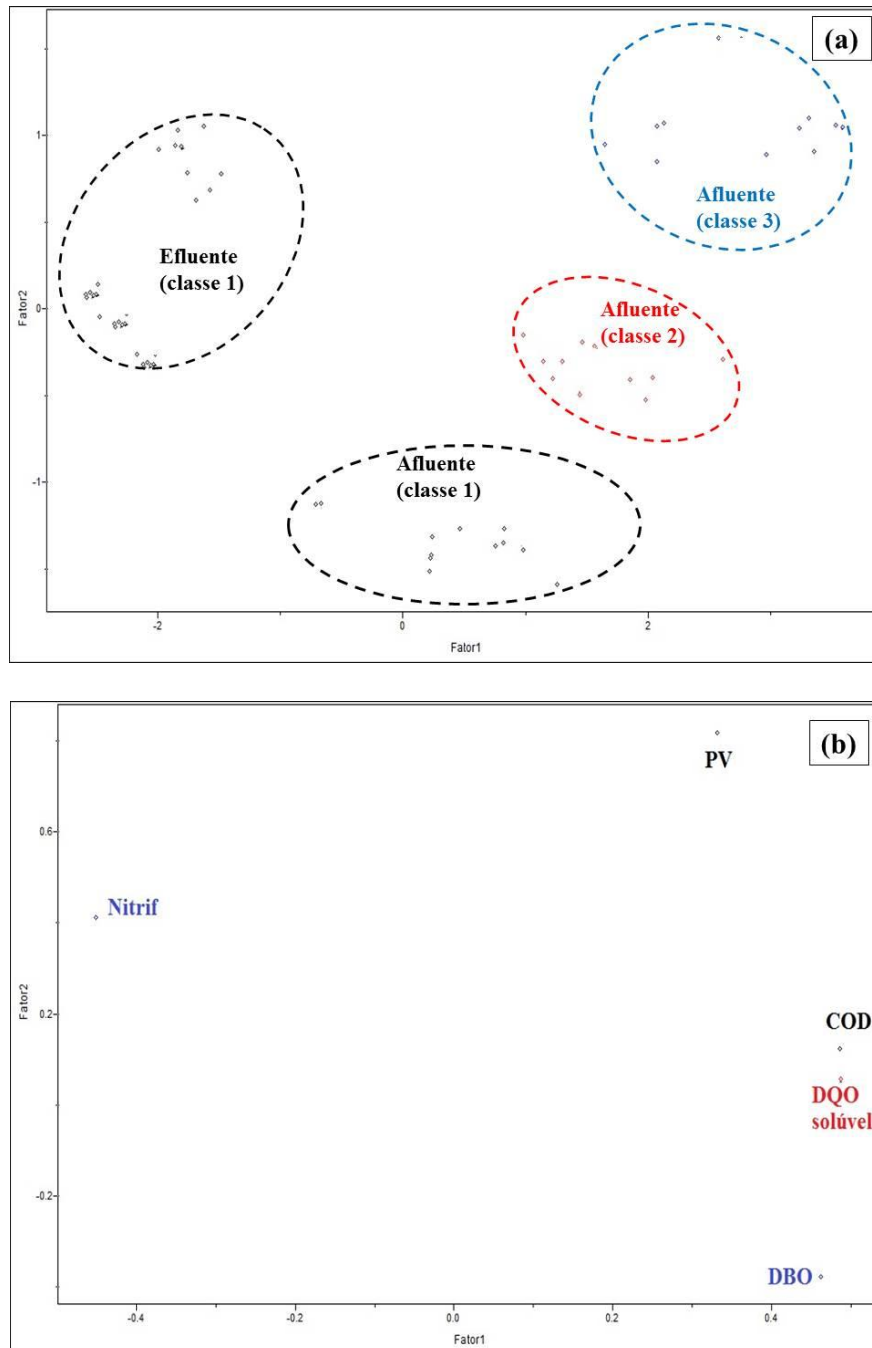
Segundo o gráfico dos *loadings* (Figura 64b) e a Equação 18, DQO solúvel e COD foram as variáveis de maior peso na composição do primeiro fator. Devido à diferença entre a DQO solúvel e concentração de COD antes e após o tratamento aeróbio, houve separação entre os *scores* dos efluentes e afluentes, que se alocaram predominantemente nos valores positivos do primeiro fator (Figura 64a).

$$\text{Fator 1} = 0,3PV + 0,5DQO_{\text{solúvel}} + 0,4DBO + 0,5COD - 0,4Nitri \quad (\text{Equação 18})$$

Ao contrário do primeiro fator, a composição do segundo fator teve maior influência das variáveis proporções volumétricas (PV) e nitrificação (Nitri), conforme mostrado na Figura 64b e Equação 19. Essas duas variáveis foram correlacionadas porque com o aumento



das PV de lixiviado pré-tratado, maior foi a concentração de amônia livre e, conseqüentemente, menor a eficiência de nitrificação.



**Figura 64** – Análise de componentes principais nos ensaios com reator de lodos ativados em escala piloto: (a) *scores* e (b) *loadings*.

(\*) Classe 1, 0 a 0,5 mgNH<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>; classe 2, 0,5 a 1 mg NH<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>; classe 3, 2 a 3 mg NH<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>.

$$Fator\ 2 = 0,8PV + 0,1DQO_{solúvel} - 0,3DBO + 0,1COD + 0,4Nitrif \text{ (Equação 19)}$$

#### 5.1.5.6 Aplicação do método proposto “Equivalente em ácido húmico”(Eq.AH) para os ensaios com os biofiltros aerados submersos em escala piloto

Nota-se na Figuras 65 e 66 que, diferentemente dos parâmetros DBO, DQO e COD, as proporções volumétricas crescentes de lixiviado interferiram na remoção da matéria orgânica de difícil degradação.

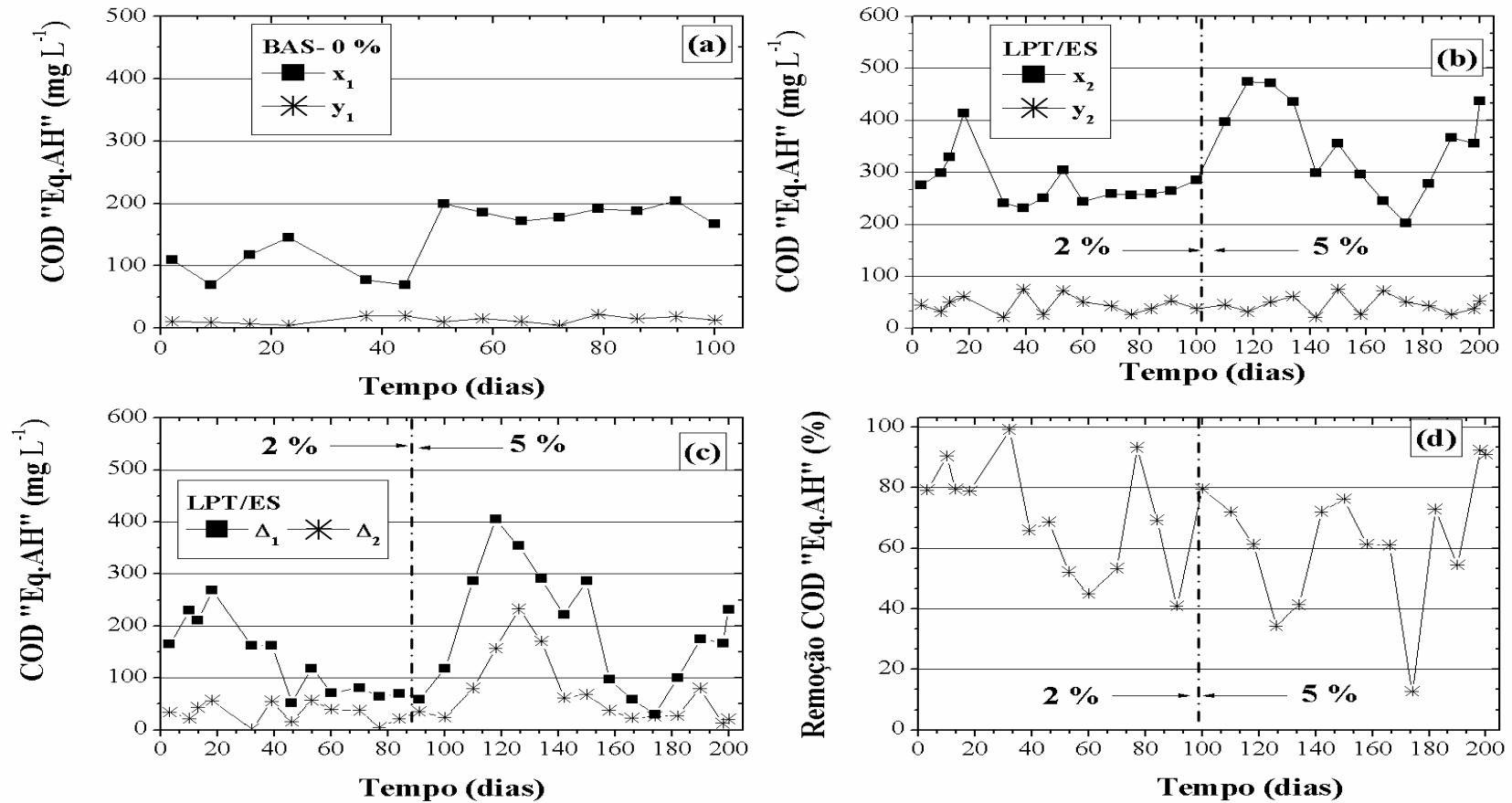
Aparentemente, a adição de lixiviado na proporção volumétrica de 2 % não pôde sequer alterar a razão DBO/DQO, que foi idêntica à esgoto sanitário (0,5). Todavia, a remoção do COD “Eq.AH” não foi completa no BAS-2 %, mas sim 71 %. No BAS-0 % essa remoção foi de 90 %.

A razão DBO/DQO só foi alterada com lixiviado a 5 %, diminuindo seu valor para 0,4, na medida em que maior teor da matéria de difícil degradação foi adicionado ao esgoto. Conseqüentemente, a remoção do COD “Eq.AH” foi 62 %.

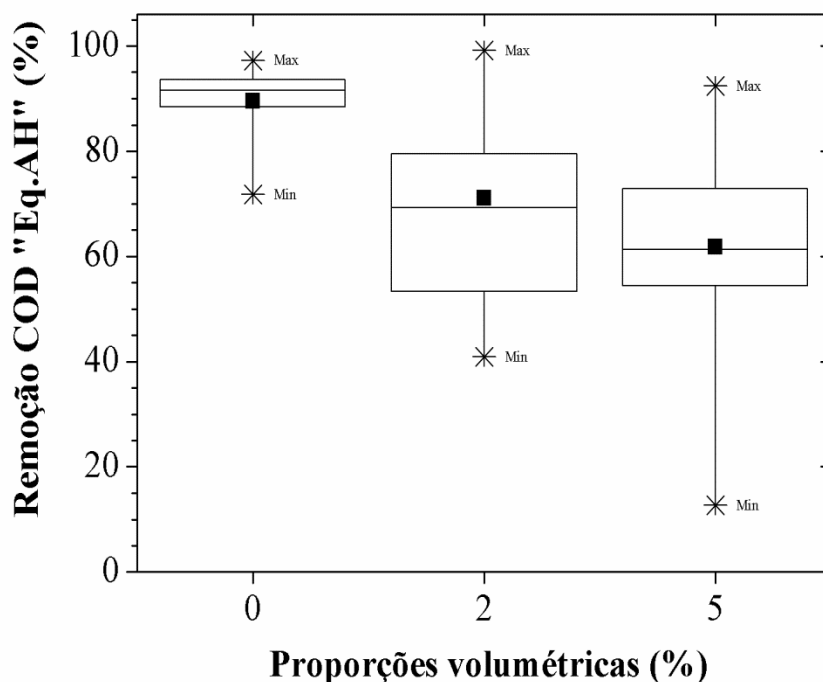
O teste ANOVA indicou que, para nível de significância de 0,01, as diferenças entre essas médias de remoção do COD “Eq.AH” não foram devidas ao acaso ( $F = 9$  e  $F$  crítico = 5).

O *box-plot* da Figura 66 mostra que houve grande variabilidade nos dados medidos no reator BAS-2 %, enquanto as eficiências dos reatores BAS-0 % e BAS-5 % mostraram-se mais homogêneas.

No estudo de Çeçen and Çakıroğlu (2001) sobre o tratamento consorciado aeróbio do lixiviado com esgoto sanitário, o teor da DQO inerte no efluente tratado devido à adição de lixiviado a 10 %, correspondeu a 56 % da DQO inerte do afluente.



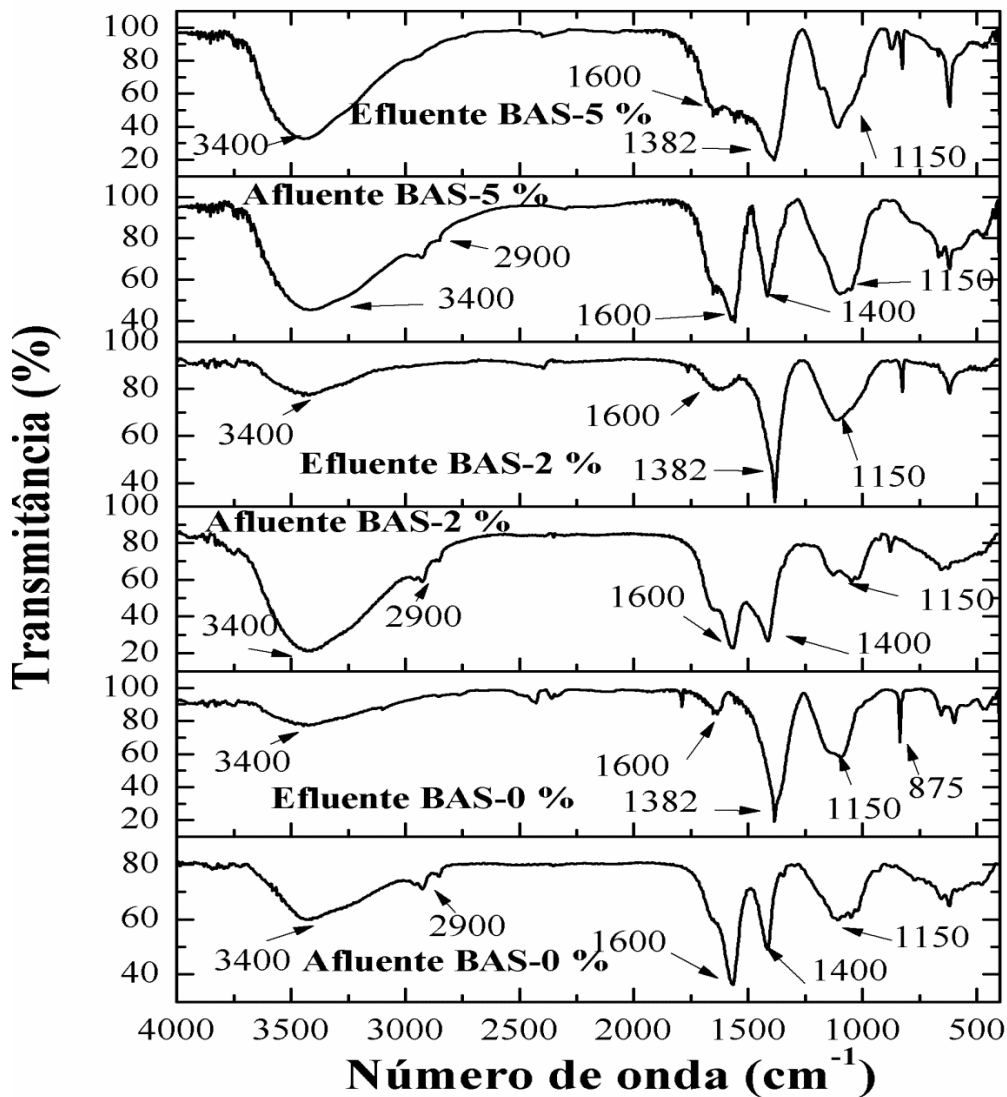
**Figura 65** – Aplicação do método “equivalente em ácido húmico” (Eq.AH) nos ensaios com os biofiltros: (a) COD “Eq.AH” para o esgoto sanitário (BAS-0 %), antes e após a aeração; (b) COD “Eq.AH” para a mistura lixiviado pré-tratado/sgoto sanitário (LPT/ES) antes e após a aeração; (c) COD “Eq.AH” na mistura LPT/ES devido à adição de LPT, antes e após a aeração; (d) eficiência de remoção do COD “Eq.AH”.



**Figura 66** – *Box-plot* da remoção do COD “Eq.AH” em função das proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado, nos ensaios com o biofiltro aerado submerso.

Apesar das diferenças nas condições operacionais, os resultados desta Tese foram consistentes e proporcionais aos de Çeçen and Çakıroğlu (2001). O COD “Eq.AH” remanescente no efluente tratado e devido à adição de lixiviado ao esgoto foi de 11 % no BAS-2 % e 22 % no BAS-5 %. Embora a pesquisa citada tenha se baseado em medidas de DQO ao invés de COD, seus resultados confirmam a eficácia do método tentativo “Eq.AH” para águas residuárias não sintéticas.

De acordo com os espectros da Figura 67, foram encontradas nos afluentes dos reatores BAS-0 %, BAS-2 % e BAS-5 % as seguintes bandas de absorção: 3400  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento OH de álcoois e fenóis); 1600  $\text{cm}^{-1}$  (C=C de aromáticos); 1400  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C=O do íon carboxilato); e 1150  $\text{cm}^{-1}$  (estiramento C-O de polissacarídeos) (Liang et al., 2009; Silverstein et al., 2005; Smidt and Meissl, 2007; Stevenson, 1994).



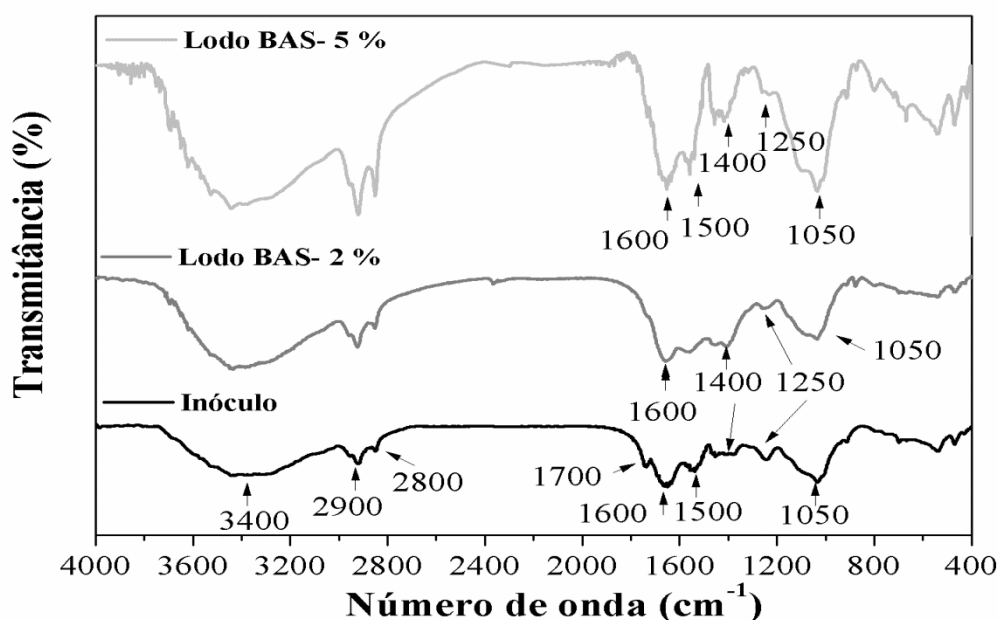
**Figura 67** - Espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de afluente e efluente dos biofiltros controle (BAS-0%) e alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário nas proporções volumétricas de 2 (BAS-2 %) e 5 % (BAS-5 %).

Os espectros dos efluentes dos reatores BAS-0 % e BAS-2 % foram praticamente idênticos, apresentando eliminação das bandas  $2900\text{ cm}^{-1}$  e  $1400\text{ cm}^{-1}$  e a mesma intensidade de absorção nas bandas remanescentes. A proporção volumétrica de lixiviado 5 % não foi

indicada para o tratamento consorciado com o biofiltro aerado submerso, visto que os espectros do afluente e efluente foram muito similares.

Para verificar a possibilidade de remoção da matéria orgânica por adsorção no lodo, foram analisadas as amostras de lodo dos reatores antes e depois da adição de lixiviado. Nota-se na Figura 68 que não houve diferenças nas bandas detectadas e em suas intensidades de absorção para as amostras de inóculo e lodo do reator BAS-2. Portanto, a remoção da matéria orgânica se deu por biodegradação parcial nos reatores BAS-0 % e BAS-2 % e, mais provavelmente, por diluição no reator BAS-5 %.

Observa-se na Figura 68 que embora as bandas detectadas para inóculo sejam as mesmas do lodo do reator BAS-5 %, elas se apresentaram com maior intensidade de absorção nesse reator, o que pode ser resultado da adsorção no lodo de parte da matéria orgânica.

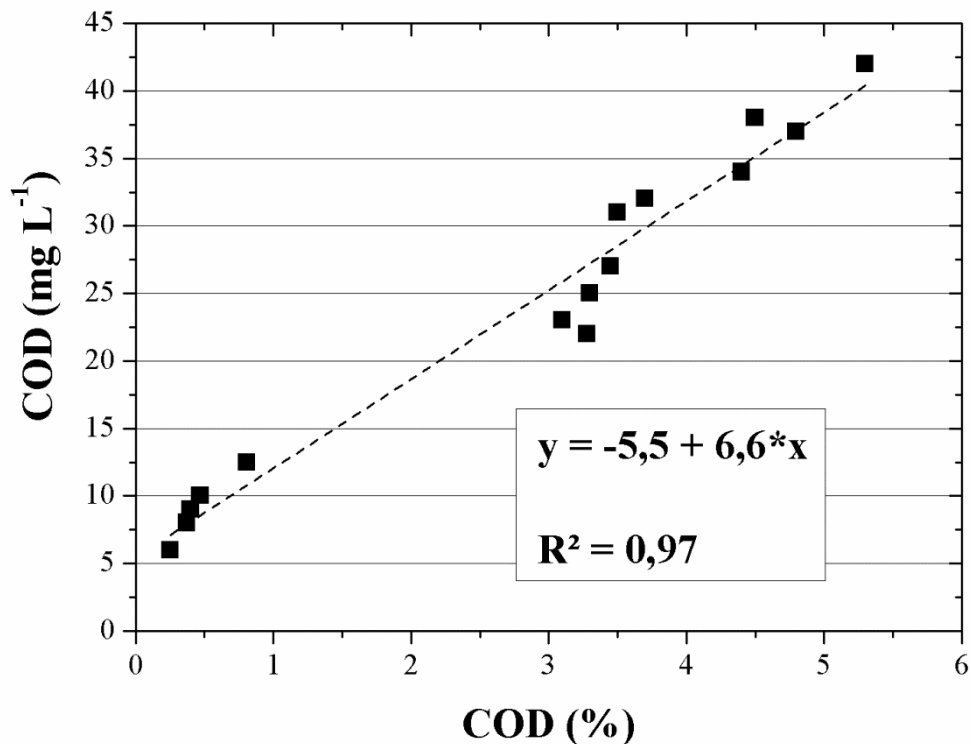


**Figura 68** - Espectros de infravermelho com transformada de Fourier das amostras de lodo dos biofiltros controle (BAS-0%) e alimentado com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário nas proporções volumétricas de 2 (BAS-2 %) e 5 % (BAS-5 %).

### 5.1.5.7 Resultados dos exames microscópicos aplicados aos reatores de lodos ativados em escala piloto

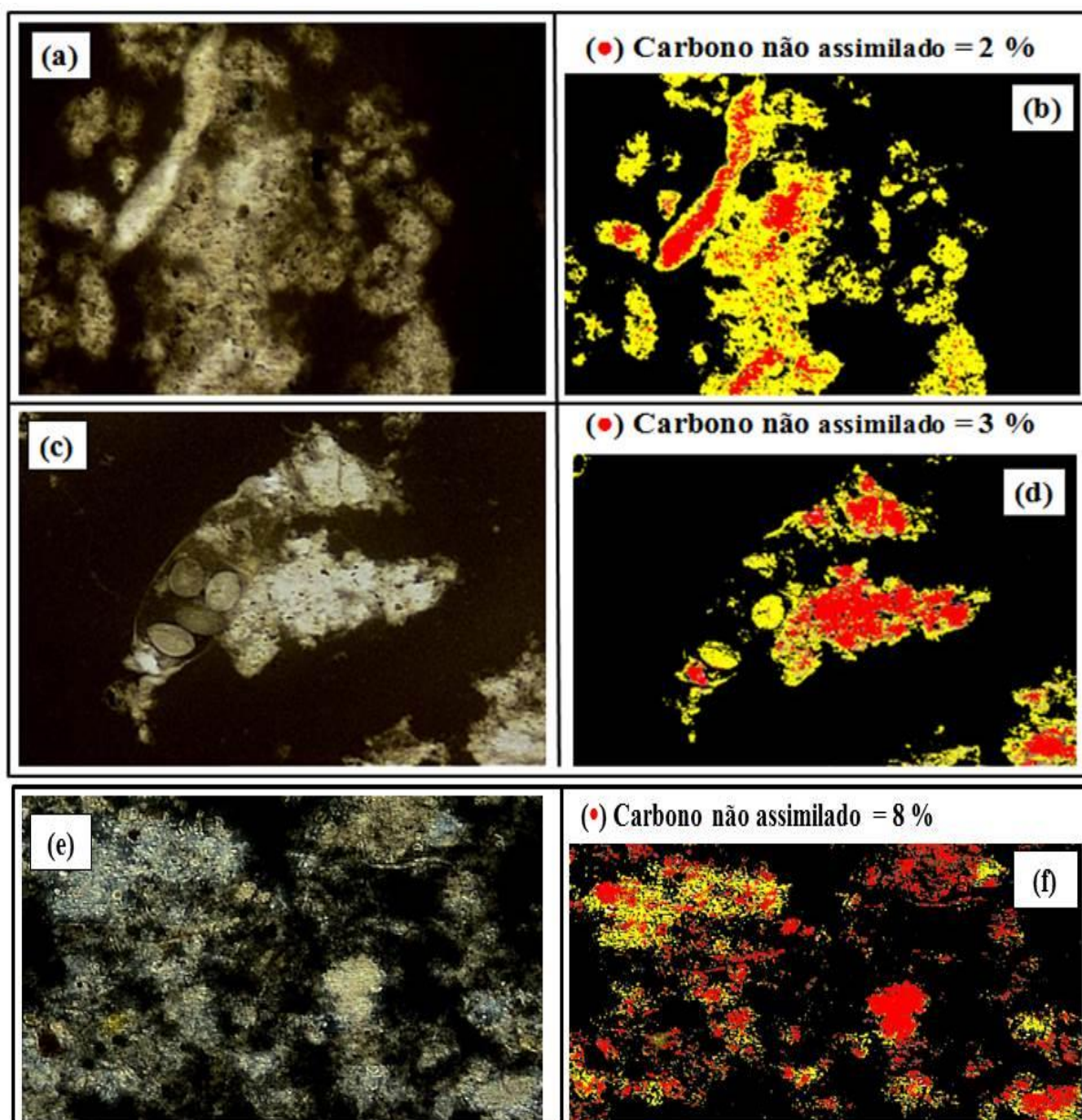
Nas Figuras 69 e 70 são apresentados os resultados da aplicação do método proposto nesta Tese para quantificação do carbono não assimilado pelos microrganismos, por meio do teste de coloração com nanquim.

Como observado para os reatores de lodos ativados, no caso dos biofiltros também houve boa correlação entre o COD estimado pelo método proposto e as medidas de COD, indicando a viabilidade desse procedimento alternativo para monitoramento da matéria orgânica (Figura 69).



**Figura 69-** Relação entre as medidas de COD nos efluentes dos biofiltros aerados submersos e o COD estimado quantitativamente com teste de coloração por nanquim.

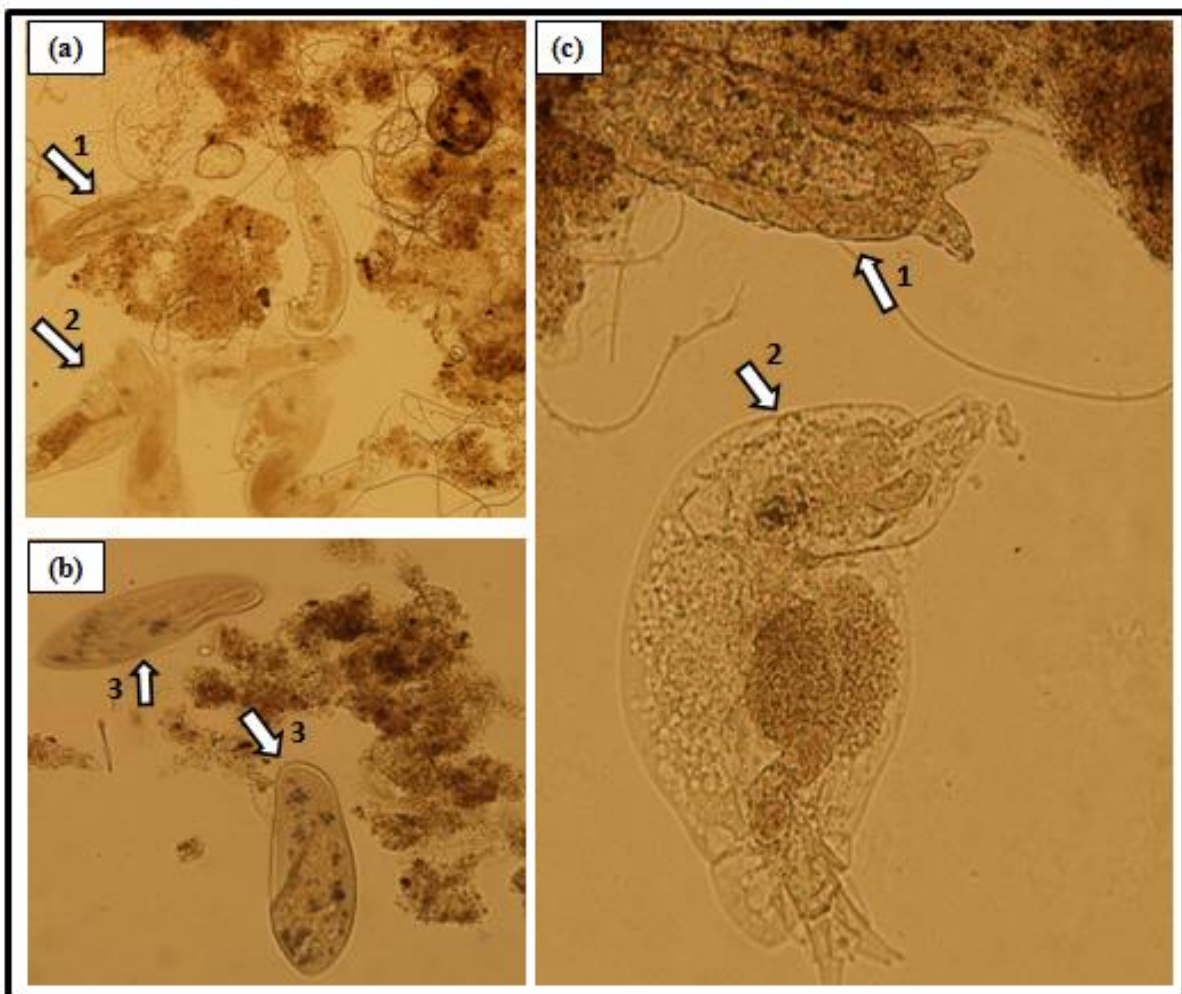
Assim como indicaram as variáveis físico-químicas, a proporção volumétrica de lixiviado de 2 % foi a mais indicada ao tratamento consorciado. O teor de COD do reator BAS-0 % foi apenas 33 % menor do que no reator BAS-2 %, enquanto para o reator BAS-5 % essa diferença chega a 75 % (Figura 70).



**Figura 70** – Aplicação do teste de coloração com nanquim e quantificação do carbono não assimilado em amostras dos reatores: (a-b) BAS-0 %, (c-d) BAS-2 % e (e-f) BAS-5 %.



Os exames de microscopia ótica comum indicaram que a diversidade de microrganismos nos reatores BAS-0 % e BAS-2 % foi similar ( Tabelas 14 e 15). Nota-se na Figura 71 a presença de tardígrados e aspidisca, microrganismos indicadores de nitrificação e que são sensíveis à presença de amônia (Jenkins et al., 2003). No reator LA-5 %, a diversidade de microrganismos foi menor, com predominância de bactérias coloniais e arcelas.



**Figura 71**– Microscopia ótica comum do lodo do BAS-2 %: (a) 1 - tardígrado, com aumento de 100 x, 2 – rotífero, com aumento de 100 x;(b) 3 - protozoário ciliado semelhante ao *Paramecium* sp, com aumento de 200 x; (c) 1 - tardígrado, com aumento de 100 x, 2 – rotífero, com aumento de 100 x.

**Tabela 14** – Frequência da microfauna nos biofiltros em escala piloto tratando esgoto sanitário (BAS-0 %) e a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (BAS-2 %) (adaptado de Povinelli et al., 1989).

| Controle |           |     |       |              |                      |     |             |      | Mistura LPT/ES 2 % |      |           |       |      |                      |     |     |             |  |  |
|----------|-----------|-----|-------|--------------|----------------------|-----|-------------|------|--------------------|------|-----------|-------|------|----------------------|-----|-----|-------------|--|--|
| t        | Bactérias |     |       | Protozoários |                      |     | Metazoários |      |                    | t    | Bactérias |       |      | Protozoários         |     |     | Metazoários |  |  |
| (dias)   | col.      | fil | fixos | flag.        | livres<br>nat/rastej | Rot | Nem         | Tard | (dias)             | col. | fil       | fixos | flag | livres<br>nat/rastej | Rot | Nem | Tard        |  |  |
| 9        | +++       | +   | ++    | +            | +++                  | ++  | ++          | +    | 16                 | +++  | ++        | +++   | ND   | ++                   | +++ | +   | ++          |  |  |
| 23       | +++       | +   | ++    | +            | +++                  | ++  | ++          | +    | 79                 | +++  | +         | ++    | ND   | +++                  | +++ | ++  | +++         |  |  |
| 37       | +++       | +   | ++    | +            | +++                  | +   | ++          | ++   | 107                | +++  | ++        | +++   | ND   | ++                   | +++ | +   | ++          |  |  |
| 44       | +++       | +   | ++    | +            | +++                  | ++  | ++          | +    | 121                | ++   | +         | ++    | ND   | +++                  | +++ | +   | +++         |  |  |
| 65       | +++       | +   | ++    | +            | +++                  | ++  | +           | +    | 128                | +++  | +         | ++    | ND   | +++                  | +++ | +   | +++         |  |  |
| 79       | +++       | +   | ++    | +            | +++                  | ++  | ++          | ++   | 135                | ++   | +         | ++    | ND   | +++                  | +++ | ++  | +++         |  |  |
| 86       | +++       | +   | ++    | ND           | +++                  | +++ | ++          | ++   | 142                | ++   | +         | ++    | ND   | +++                  | +++ | ++  | +++         |  |  |
| 100      | +++       | +   | ++    | ND           | +++                  | +++ | +           | ++   | 150                | ++   | +         | +++   | ND   | ++                   | +++ | +   | ++          |  |  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; col.: coloniais; fil.: filamentosas; flag: flagelados; nat: natantes; rastej: rastejantes; rot: rotífero; nem: nematodo; tard: tardígrado; t: tempo.

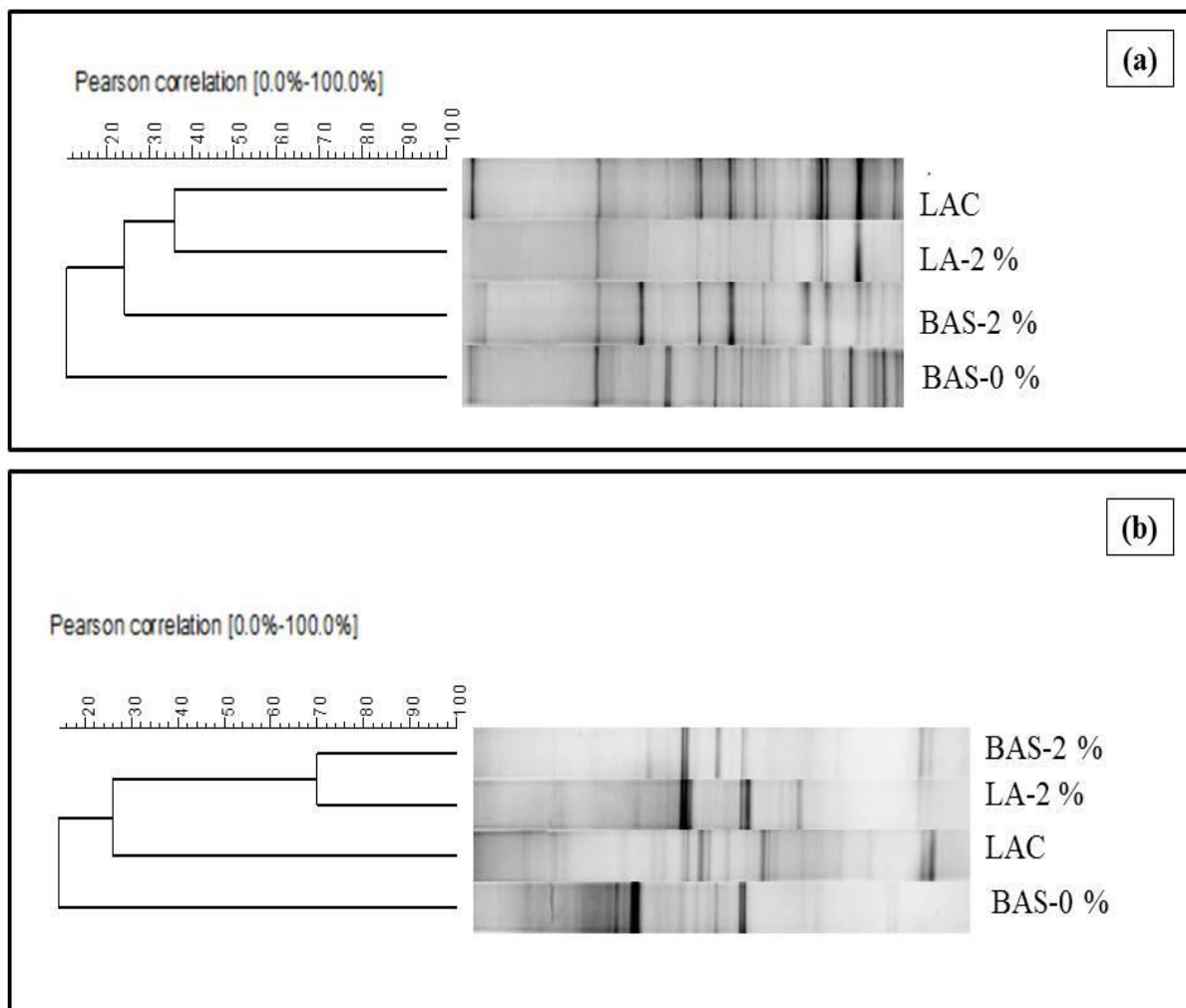
**Tabela 15** – Frequência da microfauna nos biofiltros em escala piloto tratando esgoto sanitário (BAS-0 %) e a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 5 % (BAS-5 %) (adaptado de Povinelli et al., 1989).

| Controle  |      |     |              |       |                      |             |     |      | Mistura LPT/ES 2 % |           |     |       |              |                      |     |             |      |  |
|-----------|------|-----|--------------|-------|----------------------|-------------|-----|------|--------------------|-----------|-----|-------|--------------|----------------------|-----|-------------|------|--|
| Bactérias |      |     | Protozoários |       |                      | Metazoários |     |      | t                  | Bactérias |     |       | Protozoários |                      |     | Metazoários |      |  |
| (dias)    | col. | fil | fixos        | flag. | livres<br>nat/rastej | Rot         | Nem | Tard | (dias)             | col.      | fil | fixos | flag         | livres<br>nat/rastej | Rot | Nem         | Tard |  |
| 9         | +++  | +   | ++           | +     | +++                  | ++          | ++  | +    | 13                 | +++       | ++  | +     | ++           | +                    | +   | ++          | ND   |  |
| 23        | +++  | +   | ++           | +     | +++                  | ++          | ++  | +    | 39                 | +++       | ++  | +     | +            | ++                   | ++  | ++          | ND   |  |
| 37        | +++  | +   | ++           | +     | +++                  | +           | ++  | ++   | 53                 | +++       | ++  | ++    | ND           | ++                   | +   | ++          | ND   |  |
| 44        | +++  | +   | ++           | +     | +++                  | ++          | ++  | +    | 60                 | +++       | ++  | +     | ND           | ++                   | ++  | ++          | ND   |  |
| 65        | +++  | +   | ++           | +     | +++                  | ++          | +   | +    | 70                 | +++       | ++  | +     | ND           | ++                   | ++  | ++          | ND   |  |
| 79        | +++  | +   | ++           | +     | +++                  | ++          | ++  | ++   | 84                 | +++       | ++  | +     | ND           | ++                   | ++  | ++          | ND   |  |
| 86        | +++  | +   | ++           | ND    | +++                  | +++         | ++  | ++   | 91                 | +++       | ++  | +     | ND           | ++                   | ++  | ++          | ND   |  |
| 100       | +++  | +   | ++           | ND    | +++                  | +++         | +   | ++   | 100                | +++       | ++  | +     | ND           | ++                   | ++  | ++          | ND   |  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; col.: coloniais; fil.: filamentosas; flag: flagelados; nat: natantes; rastej: rastejantes; rot: rotífero; nem: nematodo; tard: tardígrado; t: tempo.

### 5.1.6 PCR-DGGE

Na Figura 72 são apresentadas as bandas dos géis para as amostras dos reatores pilotos, com os respectivos coeficientes de similaridade de Pearson para os domínios Eucarya e Bacteria.



**Figura 72** – Perfil de DGGE para os domínios (a) Bacteria e (b) Eucarya, nas amostras dos reatores pilotos de lodos ativados e biofiltro aerado submerso.

Para o domínio Bacteria, a similaridade entre as amostras dos reatores LAC e LA-2 % foi em torno de 35 % (Figura 72a). A similaridade entre os reatores LAC/LA-2 % e BAS-2 % foi 25 %, ficando o reator BAS-0 % com similaridade inferior a 20 % em relação aos três primeiros reatores. A diversidade do domínio Bacteria, estimada pelo índice de Shannon-Wiener (IS), foi 30 % menor no reator LA-2 % (IS = 1,4) em relação ao reator LAC (IS=2). Como observado nas análises físico-químicas, os biofiltros apresentaram melhor desempenho do que os reatores de lodos ativados. Esse resultado foi confirmado pela maior diversidade do domínio Bacteria, em relação aos lodos ativados. Para esse domínio, a diversidade no reator BAS-2 % (IS = 2,6) foi apenas 21 % menor do que no reator BAS-0 % (3,3).

De acordo com a Figura 72b, para o domínio Eucarya a houve maior similaridade entre os reatores BAS-2 % e LA-2 % (70 %). O reator LAC apresentou cerca de 25 % de similaridade com os reatores alimentados com lixiviado pré-tratado, e o BAS-0 % foi o que menos se assemelhou com os outros reatores.

A diversidade do domínio Eucarya também foi bastante próxima entre os reatores alimentados com lixiviado e os controles. O reator LA-2 % apresentou diversidade (IS = 2,5) apenas 16 % menor do que o reator LAC (IS = 3). O mesmo ocorreu nos biofiltros: a diversidade no BAS-2 % (IS = 2,4) foi apenas 12 % inferior àquela do BAS-0 % (2,7).

### **5.1.7 Considerações sobre o tratamento consorciado**

Diante de todos os resultados apresentados, verificou-se nas análises físico-químicas e espectroscópicas, exames microscópicos e análise de biologia molecular, que os reatores puderam operar com desempenho semelhante à condição controle quando alimentados com lixiviado pré-tratado na proporção máxima de 2 %.

Segundo as Teses de Castro (2001) e Santos (2010), dificilmente essa proporção de 2 % seria extrapolada. Esses dois autores verificaram que em relação à vazão diária de esgoto, a proporção de lixiviado gerado diariamente variou de 0,09 a 0,13 %.

Segundo informação bastante recente fornecida pela SABESP (Informação pessoal)<sup>4</sup>, as ETE Barueri, Parque Novo Mundo, São Miguel e Suzano, todas da Região Metropolitana de São Paulo, operam com reatores de lodos ativados tratando esgoto sanitário com lixiviado na proporção volumétrica de 1,4 %. Ressalta-se que a população atendida pela ETE Barueri é de 4,4 milhões de habitantes e a vazão diária de esgoto  $9,7 \text{ m}^3 \text{ s}^{-1}$ . Esses valores são muito superiores à população e vazão de esgoto das cidades utilizadas nas Teses de Castro (2001) – Piracicaba - e Santos (2010) - Rio de Janeiro, mas mesmo assim a proporção de lixiviado não ultrapassa 2 % da vazão diária de esgoto.

Salienta-se que, nos ensaios com reatores piloto, a adição de lixiviado se deu continuamente, mantendo-se a proporção volumétrica sempre próxima de 2 %, ao invés dessa adição se dar na forma de pulso.

---

<sup>4</sup> SABESP. Mensagem eletrônica recebida em 6 de set. de 2013.

## 5.2 TRATAMENTO AERÓBIO DOS LIXIVIADOS BRUTO E PRÉ-TRATADO COM CAL

### 5.2.1 Remoção da matéria orgânica e nitrogênio

Ao contrário do tratamento consorciado, no tratamento aeróbio dos lixiviados bruto e pré-tratado com foram obtidas eficiências muito baixas de remoção da matéria orgânica (Tabelas 16 e 17). As remoções da DQO e COD do lixiviado alcalinizado foram 28 e 42 %; e, para o lixiviado bruto, 19 e 31 %.

**Tabela 16** - Remoção da matéria orgânica do lixiviado bruto, no reator de lodos ativados em escala de bancada, alimentado em regime de batelada por 20 dias.

| Tempo de operação do reator (dias) | DQO <sub>bruta</sub> (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> ) | DQO <sub>solúvel</sub> (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> ) | COD (mg L <sup>-1</sup> ) | DBO (mg L <sup>-1</sup> ) | SST (mg L <sup>-1</sup> ) | SST TA (mg L <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------|--|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 0                                  | 4400   | 3890   | 1430                      | 558                       | 165                       | 7567                         |
| 2                                  | 3750   | 3340   | 1350                      | 470                       | 156                       | 7200                         |
| 7                                  | 3600   | 3060   | 1225                      | 300                       | 159                       | 6900                         |
| 20                                 | 3570   | 3115   | 986                       | 280                       | 154                       | 6660                         |

Verifica-se nas Tabelas 18 e 19 que a remoção do NAT para o lixiviado bruto e alcalinizado foi de 38 e 26 %. Todavia, em ambos os casos, o mecanismo de remoção mais provável foi a volatilização do NAT ao invés de nitrificação, visto que os valores de nitrito e nitrato mantiveram-se constantes e próximos a zero, nos afluentes e efluentes. Dessa forma, não se mostrou viável a tratabilidade dos lixiviado bruto e pré-tratado com cal no reator de lodos ativados em escala de bancada, alimentado em regime de batelada.

**Tabela 17** - Remoção da matéria orgânica do lixiviado pré-tratado com cal, no reator de lodos ativados em escala de bancada, alimentado em regime de batelada por 20 dias.

| Tempo de operação do reator (dias) | DQO <sub>bruta</sub> (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> ) | DQO <sub>solúvel</sub> (mgO <sub>2</sub> L <sup>-1</sup> ) | COD (mg L <sup>-1</sup> ) | DBO (mg L <sup>-1</sup> ) | SST (mg L <sup>-1</sup> ) | SST TA (mg L <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------|--|--|---------------------------|---------------------------|---------------------------|------------------------------|
| 0                                  | 3875   | 3025   | 1670                      | 380                       | 162                       | 8000                         |
| 2                                  | 3136   | 2900   | 1090                      | 290                       | 156                       | 7400                         |
| 7                                  | 3000   | 2660   | 1221                      | 220                       | 92                        | 7500                         |
| 20                                 | 2791   | 2110   | 973                       | 180                       | 73                        | 7000                         |

**Tabela 18** - Remoção da concentração de nitrogênio do lixiviado bruto, no reator de lodos ativados em escala de bancada, alimentado em regime de batelada por 20 dias.

| Tempo de operação do reator (dias) | NTK (mg L <sup>-1</sup> ) | NAT (mg L <sup>-1</sup> ) | N <sub>org</sub> (mg L <sup>-1</sup> ) | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> ) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> ) | Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--|--|--|---|
| 0                                  | 977                       | 821                       | 156                                    | 0,3  | 0  | 6000  |
| 2                                  | 549                       | 528                       | 21                                     | 0,3  | 0  | 5100  |
| 7                                  | 550                       | 516                       | 34                                     | 0  | 0  | 4400  |
| 20                                 | 518                       | 508                       | 10                                     | 0  | 0  | 3400  |

**Tabela 19** - Remoção da concentração de nitrogênio do lixiviado pré-tratado com cal, no reator de lodos ativados em escala de bancada alimentado em regime de batelada por 20 dias.

| Tempo de operação do reator (dias) | NTK (mg L <sup>-1</sup> ) | NAT (mg L <sup>-1</sup> ) | N <sub>org</sub> (mg L <sup>-1</sup> ) | NO <sub>2</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> ) | NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg L <sup>-1</sup> ) | Alcalinidade (mgCaCO <sub>3</sub> L <sup>-1</sup> ) |
|------------------------------------|---------------------------|---------------------------|--|--|--|---|
| 0                                  | 439                       | 372                       | 67                                     | 0,13   | 0,1  | 2100  |
| 2                                  | 300                       | 284                       | 16                                     | 0,25   | 0,01   | 2000  |
| 7                                  | 305                       | 277                       | 28                                     | 0  | 0  | 1700  |
| 20                                 | 293                       | 275                       | 18                                     | 0  | 0  | 1670  |

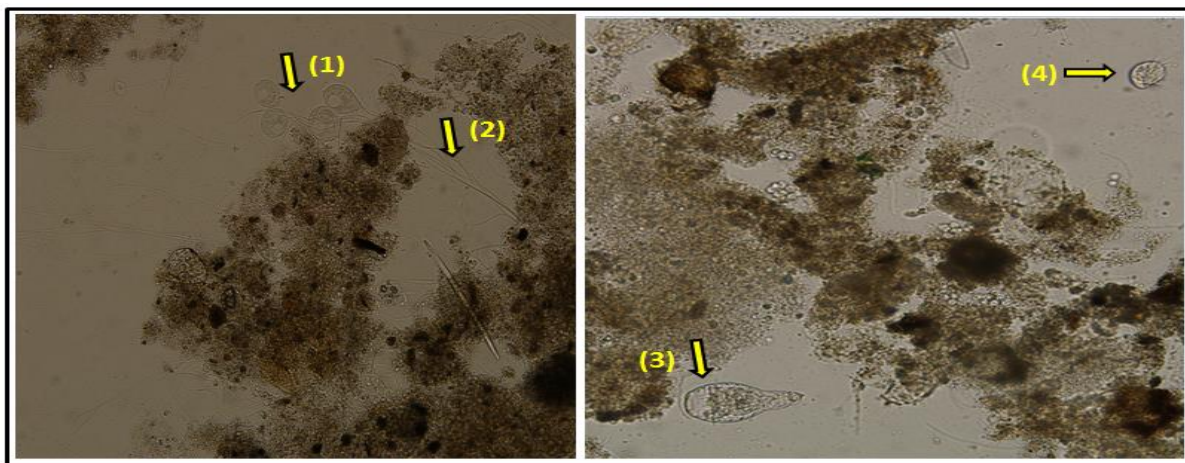


### 5.2.2 Exames microscópicos

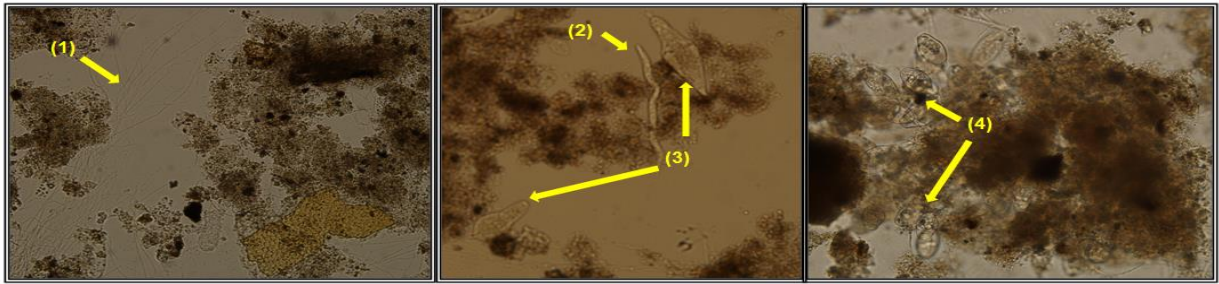
Nas Figuras 73 a 77 e Tabela 20 são apresentados os resultados dos exames microbiológicos do inoculo utilizado no subprojeto 2 (com reator de lodos ativados em escala de bancada), bem como as morfologias observadas nesse inoculo durante o período de adaptação e operação do reator com os lixiviados bruto e pré-tratado com cal.

De acordo com a Figura 73, o inoculo apresentou boa diversidade de microrganismos responsáveis pela depuração da matéria orgânica (como rotíferos) e remoção de nitrogênio (como a *Aspidisca* sp). Essa diversidade de microrganismos foi mantida após a adaptação do inoculo aos lixiviados bruto e alcalinizado (Figuras 74 e 75).

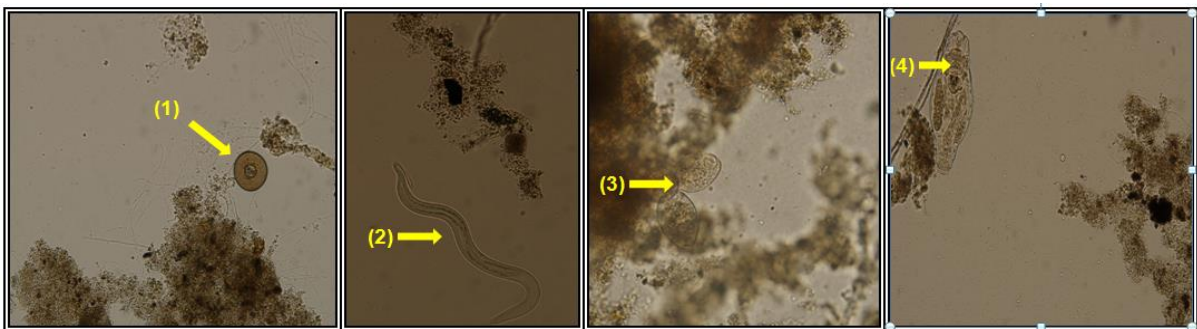
Todavia, transcorridos os 20 dias de operação, foi considerável a perda na diversidade de microrganismos responsáveis pela remoção da matéria orgânica e nitrogênio.



**Figura 73** – Observações microscópicas do inoculo utilizado no subprojeto 3: (1) aumento de 400x, presença de protozoários pedunculados e (2) bactérias filamentosos; (3) aumento de 200x, presença de metazoário semelhante a rotífero e (4) aumento de 200 x, presença de protozoário rastejante semelhante à *Aspidisca* sp.



**Figura 74** - Inóculo do reator de lodos ativados durante a fase de adaptação com lixiviado bruto: (1) aumento de 200x, microrganismos filamentosos; (2) aumento de 100x, nematóide e (3) rotíferos; (4) aumento de 200x, protozoários pedunculados.



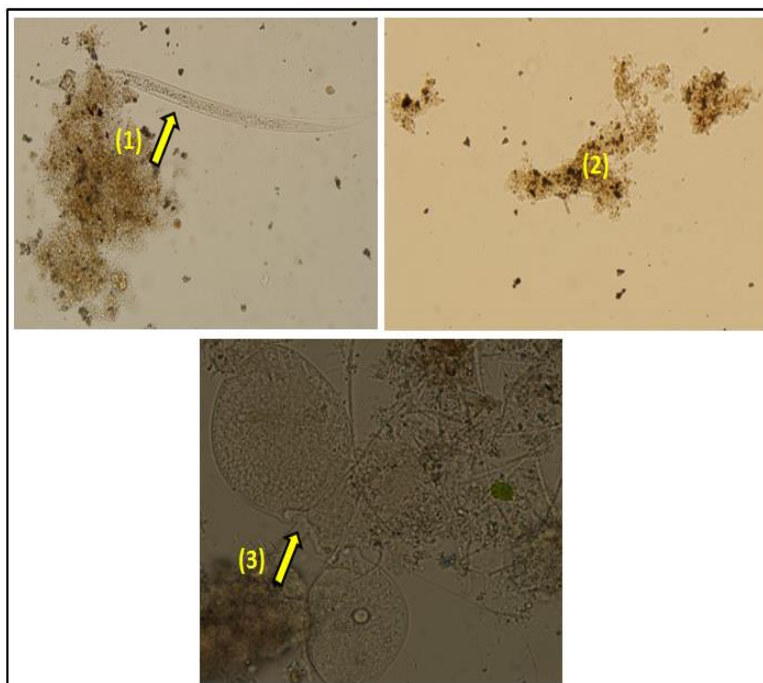
**Figura 75**- Inóculo do reator de lodos ativados durante a fase de adaptação com lixiviado pretratado com cal: (1) aumento de 200x, microrganismo semelhante à *Arcella*; (2) aumento de 100x, nematóide; (3) aumento de 400x, protozoários pedunculados; (4) aumento de 200x, rotífero.

Verifica-se nas Figuras 76 e 77 que os flocos do lodo se apresentaram dispersos, associados às bactérias filamentosas e sem a presença de protozoários fixos, rotíferos, protozoários rastejantes e ciliados livres natantes. A ausência de ciliados livres natantes, rastejantes e tardígrados, por exemplo, está associada à toxicidade do meio (Jenkins et al., 2003).

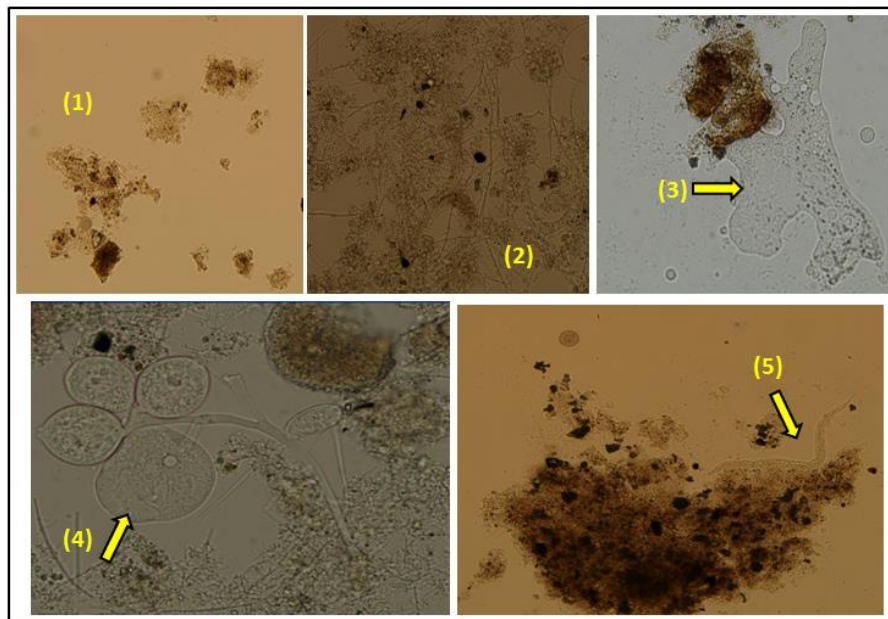
**Tabela 20** – Frequência de observação dos microrganismos encontrados no lodo do reator de LA em escala de bancada alimentado com os lixiviados bruto e alcalinizado, no decorrer dos 20 dias de operação (adaptado de Povinelli et al., 1989).

| Microrganismos                                     | Lixiviado bruto |     |     | Lixiviado alcalinizado |     |     |     |
|--|-----------------|-----|-----|------------------------|-----|-----|-----|
|  | Tempo (dias)    | 2   | 7   | 20                     | 2   | 7   | 20  |
| <b>Bact. col.</b>                                  |                 | +   | +   | +                      | +   | +   | +   |
| <b>Bact. fil.</b>                                  |                 | +++ | +++ | +++                    | +++ | +++ | +++ |
| <b>Prot. ciliados fixos</b>                        |                 | +   | +   | +                      | +   | +   | +   |
| <b>Prot. flagelados</b>                            |                 | ND  | ND  | ND                     | ND  | ND  | ND  |
| <b>Prot. ciliados livre natantes e rastejantes</b> |                 | +   | +   | +                      | +   | +   | +   |
| <b>Rotíferos</b>                                   |                 | ND  | ND  | ND                     | ND  | ND  | ND  |
| <b>Nematóides</b>                                  |                 | ++  | ++  | ++                     | ++  | ++  | ++  |
| <b>Flocos compactos</b>                            |                 | +   | +   | +                      | +   | +   | +   |
| <b>Flocos filamentosos</b>                         |                 | ++  | ++  | ++                     | ++  | ++  | ++  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente freqüente; +: pouco frequente; ND: não detectado; Bact. Col.: bactérias coloniais; Bact. Fil.: bactérias filamentosas; Prot.: protozoários.



**Figura 76** – Microrganismos observados nas amostras do tanque de aeração do reator de lodos ativados alimentado com lixiviado bruto, no decorrer dos 20 dias operação: (1) aumento de 200x, nematóide; (2) aumento de 100 x, flocos dispersos; (3) aumento de 800 x, protozoários pedunculados.



**Figura 77**– Microrganismos observados nas amostras do tanque de aeração do reator de lodos ativados alimentado com lixiviado bruto, no decorrer dos 20 dias operação: (1) aumento de 200x, nematóide; (2) aumento de 100 x, floco disperso; (3) aumento de 800 x, protozoários pedunculados.

## 6 CONCLUSÕES

### 6.1 CONCLUSÕES DO TRATAMENTO CONSORCIADO DOS LIXIVIADOS DE ATERROS SANITÁRIOS COM ESGOTO SANITÁRIO

- a) Nos ensaios de bancada, a melhor condição operacional consistiu da mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário na proporção volumétrica de 2 %. A remoção de matéria orgânica foi de 72 % para o COT e 57 % do NAT foi convertido à nitrato;
- b) nos ensaios com reatores pilotos operados em regime contínuo foi bem sucedida a aplicação do método tentativo “Eq.AH”. Pôde-se verificar que a remoção COD “Eq.AH” do lixiviado deu-se por degradação parcial junto com o esgoto. Nos reatores piloto de lodos ativados LAC e LA-2 % as remoções do COD “Eq.AH” foram 79 e 47 %, enquanto nos biofiltros aerados submersos BAS-0 % e BAS-2 %, as eficiências foram 90 e 71 %;
- c) os espectros de infravermelho por transformada de Fourier foram diferentes para o afluente e efluente dos reatores LA-2 % e BAS-2 %. A maioria das bandas detectadas nos espectros dos afluentes não foram detectadas ou tiveram sua intensidade de absorção diminuída nos espectros dos efluentes tratados. A análise espectroscópica também mostrou que não houve alteração nas intensidades de absorção dos grupos funcionais detectados no lodo antes e após a operação dos reatores. Isso indica que a remoção de matéria orgânica

se deu, mais provavelmente pela degradação parcial do que por mecanismo de precipitação no lodo, por exemplo;

- d) o tratamento do lixiviado a 5 % não foi viável à operação dos reatores nas condições avaliadas nesta pesquisa, devido à maior concentração de amônia livre. Os espectros de infravermelho por transformada de Fourier dos afluentes e efluentes dos reatores LA-5 % e BAS-5 % foram praticamente idênticos, indicando que o provável mecanismo de remoção da matéria orgânica do lixiviado tenha sido a diluição no esgoto sanitário;
- e) a concentração dos metais analisados nos efluentes dos reatores de bancada e pilotos foi inferior aos limites estabelecidos pelas Resoluções CONAMA 430/11 e 380/06;
- f) o método de classificação de tonalidades associadas ao teste de coloração com nanquim, permitiu o monitoramento da remoção da matéria orgânica por meio de exame microscópico, realizado de forma rápida e prática se comparado a análises como a DQO;
- g) dentre os reatores piloto estudados, verificou-se pela análise de biologia molecular PCR-DGGE que nos biofiltros houve maior diversidade para os domínios Bacteria e Eucarya;

## 6.2 CONCLUSÕES DO TRATAMENTO AERÓBIO DOS LIXIVIADOS BRUTO E PRÉ-TRATADO COM CAL

- a) Para o lixiviado bruto, as eficiências de remoção da matéria orgânica foram: DQO, 19 %; COD, 31 %, DBO, 50 %. O tratamento aeróbio praticamente não alterou o valor da relação DBO/DQO, que foi de 0,1 no afluente e efluente, evidenciando a recalcitrância do lixiviado bruto. A remoção de NTK foi de 47 % e a do NAT, 38 %. Contudo, a concentração de nitrito no efluente foi nula, indicando que a remoção de NTK e NAT se deu por volatilização e não por nitrificação;
- b) para o lixiviado alcalinizado, as eficiências de remoção da matéria orgânica foram: DQO, 28 %; COD, 42 %, DBO, 52 %. O tratamento aeróbio praticamente não alterou o valor da relação DBO/DQO, que foi de 0,2 no afluente e 0,1 no efluente, evidenciando a recalcitrância do lixiviado alcalinizado. A remoção de NTK foi de 33 % e a do NAT, 26 %. Contudo, a concentração de nitrito no efluente foi nula, indicando que a remoção de NTK e NAT se deu por volatilização e não por nitrificação, tal como observado para o lixiviado bruto;
- c) os resultados obtidos indicaram que o tratamento aeróbio dos lixiviado bruto e alcalinizado no reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias, não se mostrou viável em termos de remoção de matéria orgânica e nitrogênio.

## 7 SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

A partir dos resultados obtidos nesta Tese, sugerem-se para futuras pesquisas:

- otimização dos decantadores dos reatores pilotos de lodos ativados, para que seja mais efetiva a recirculação do lodo, evitando a perda da biomassa por flotação;
- otimização das condições operacionais, visando a desnitrificação;
- avaliação das possíveis interferências do lixiviado na desnitrificação sem adição de fonte externa de carbono;
- determinação do TDH mínimo em que os reatores aeróbios podem operar mantendo eficiências desejáveis de remoção de matéria orgânica e nutrientes;
- extração das substâncias húmicas dos afluentes e efluentes dos reatores, visando otimização das respostas analíticas;
- determinação de compostos orgânicos específicos que estejam presentes apenas no lixiviado, e que possam servir de indicadores de biodegradabilidade no tratamento consorciado com esgoto sanitário;
- avaliação de técnicas alternativas à espectroscopia de infravermelho, visando a quantificação de compostos de difícil degradação, que possam ser indicadores da eficácia do tratamento consorciado;
- se as substâncias húmicas forem utilizadas como indicadores de tratabilidade, verificar quais as frações (ácidos húmicos ou fúlvicos) predominam no efluente tratado;



- estudos para determinação da vazão diária de lixiviado, para que se obtenha maior precisão nas proporções volumétricas nas quais o lixiviado será tratado nas ETE;
- desenvolvimento de estudos em reatores em escala real, verificando os efeitos das variações diárias de vazão do esgoto sanitário e lixiviado;

## REFERÊNCIAS

ABREU, A. A et al. Engineered heat treated methanogenic granules: a promising biotechnological approach for extreme thermophilic biohydrogen production. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 24, p. 9577–86, dez. 2010.

AKTAŞ, O.; CEÇEN, F. Addition of activated carbon to batch activated sludge reactors in the treatment of landfill leachate and domestic wastewater. **Journal of Chemical Technology and Biotechnoloy**, v.76, p.793-802, 2001.

AMARAL, M. C. S. et al. Characterization of Landfill Leachates by Molecular Size Distribution, Biodegradability, and Inert Chemical Oxygen Demand. **Water Environment Research**, v. 81, n. 5, p. 499–505, 1 maio 2009.

ANTHONISEN, A.C. et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. **J. Wat. Pol. Contr. Fed.**, v. 48, n.5, p. 835–852, 1976.

APHA - American Public Health Association, AWWA - American Water Works Association, WEF - Water Environment Federation. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 22<sup>nd</sup> ed. Washington: APHA, AWWA, WEF, 2012.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. (1992). **Apresentação de projetos de aterros sanitários de resíduos sólidos urbanos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1992. 7p.

BANCO MUNDIAL. What a waste - A global review of solid waste management., 2012. Disponível em: <http://web.worldbank.org/WBSITE/EXTERNAL/TOPICS/EXTURBANDEVELOPMENT/0,,contentMDK:23172887~pagePK:210058~piPK:210062~theSitePK:337178,00.html>. Acesso 6 ago. 2013.

BARBER, L.B et al. Nature and Transformation of Dissolved Organic Matter in Treatment Wetlands. **Environ. Sci. Technol.**, v. 36, p. 4805–4816, 2001.

BRERETON, R.G. **Chemometrics: Data Analysis for the Laboratory and Chemical Plant**, John Wiley & Sons Ltd., Chichester, 2003.

BIDONE, F.R.A. & POVINELLI, J. **Conceitos Básicos de Resíduos Sólidos**. São Carlos: EESC-USP. Projeto REENGE, 2010.

BONMATÍ, A.; FLOTATS, X. Air stripping of ammonia from pig slurry: characterisation and feasibility as a pre- or post-treatment to mesophilic anaerobic digestion. **Wast. Manag.**, v. 23, n. 3, p. 261–72, jan. 2003.

BOOTH, S. D. J. et al. All use subject to JSTOR terms and conditions of a the impact assessing on a Canadian water waste landfill treatment leachate plant. **Wat. Environ. Fed.**, v. 68, n. 7, p. 1179–1186, 1996.

BORGHI, A. DEL et al. Combined Treatment of Leachate from Sanitary Landfill and Municipal Wastewater by Activated Sludge. **Chem. Biochem. Eng. Q.**, v.17, n. 4, p. 277–283, 2003.

BU, L. et al. Characterization of dissolved organic matter during landfill leachate treatment by sequencing batch reactor, aeration corrosive cell-Fenton, and granular activated carbon in series. **Journal of hazardous materials**, v. 179, n. 1-3, p. 1096–105, 2010.

CAMPOS, A. R. C. **Tratamento conjugado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto sanitário em lagoas de estabilização rasas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2012.

CAMPOS, R. **Estudo da tratabilidade das soluções de lactose com ácidos húmicos e lactose com lixiviado de aterro sanitário por lodos ativados em escala de bancada**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

CASTRO, M.C.A.A. **Avaliação de um sistema australiano no tratamento conjunto de esgoto sanitário e líquidos percolados gerados em aterros sanitários**. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2013.

ÇEÇEN, F.; AKTAS, Ö. Aerobic Co-Treatment of Landfill Leachate with Domestic Wastewater. **Environmental Engineering Science**, v. 21, n. 3, p. 303–312, 2004.

ÇEÇEN, F.; ÇAKIROĞ, D. Impact of landfill leachate on the co-treatment of domestic wastewater. **Biotechnology Letters**, n. Table 1, p. 821–826, 2001.

COLETTI, F. J. **Pós-tratamento por lodos ativados de efluente de um reator anaeróbio compartimentado no tratamento do esgoto sanitário**. V.1, 169 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1997.

COTMAN, M.; GOTVAJN, A. Z. Comparison of different physico-chemical methods for the removal of toxicants from landfill leachate. **Journal of hazardous materials**, v. 178, n. 1-3, p. 298–305, 2010.

European Commission (2013). Disponível em: [http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/waste\\_generation\\_management/management/disposal](http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/waste_generation_management/management/disposal). Acesso em 6 ago. 2013.

FARABEGOLI, G.; CHIAVOLA, A; ROLLE, E. The Biological Aerated Filter (BAF) as alternative treatment for domestic sewage. Optimization of plant performance. **Journal of hazardous materials**, v. 171, n. 1-3, p. 1126–32, 2009.

FERRAZ, F.M. **Recuperação da amônia liberada no processo de “air stripping” aplicado ao tratamento do lixiviado de aterros sanitários**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

FERRAZ, F. M.; BRUNI, A. T.; BIANCHI, V. L. DEL. Performance of an anaerobic baffled reactor ( ABR ) in treatment of cassava wastewater. **Braz. J. Microbiol.**, v.40, p. 48–53, 2009.

FERRAZ, F. M.; POVINELLI, J.; MARIA VIEIRA, E. Ammonia removal from landfill leachate by air stripping and absorption. **Environmental Technology**, v. 34, n. 15, p2317-2326, 2013.

GABARRÓ, J. et al. Effect of temperature on AOB activity of a partial nitrification SBR treating landfill leachate with extremely high nitrogen concentration. **Bioresource Technology**, v. 126, p. 283–9, 2012.

GÁLVEZ, A et al. Treatment of landfill leachate with aerated and non-aerated submerged biofilters. **Journal of Environmental Science and Health. Part A, Toxic/Hazardous Substances & Environmental Engineering**, v. 41, n. 6, p. 1129–44, jan. 2006.

GOTVAJN, A Z.; TISLER, T.; ZAGORC-KONCAN, J. Comparison of different treatment strategies for industrial landfill leachate. **J. Haz. Mat**, v. 162, n. 2-3, p. 1446–56, 15 mar. 2009.

GRIFFITHS, R. et al. Rapid method for coextraction of DNA and RNA from natural environments for analysis of ribosomal DNA and rRNA-based microbial community composition. **Appl. Environ. Microbiol.** v. 66, n.12, p.5488–5491, 2000.

GUO, J.-S. et al. Treatment of landfill leachate using a combined stripping, Fenton, SBR, and coagulation process. **J. Haz. Mat**, v. 178, n. 1-3, p. 699–705, 15 jul. 2010.

HA, B. et al. Utilization of Stabilized and Solidified Sewage Sludge as a Daily Landfill Cover Material. **KSCE J. Civ. Eng.**, v. 10, n. 4, p. 255–258, 2006.

KALKA, J. Landfill leachate toxicity removal in combined treatment with municipal wastewater. **TheScientificWorldJournal**, v. 2012, p. 202897, 2012.

KALKA, J; ÓSLISŁOK, A; SURMACZ-GÓRSKA, J; KRAJEWSKA, K., MARCIOCHA, D; RASZKA, A. A laboratory study on toxicity removal from landfill leachate in combined treatment with municipal wastewater. **Environmental Engineering III**, p. 185–189, 2010.

KANG, K.-H.; SHIN, H. S.; PARK, H. Characterization of humic substances present in landfill leachates with different landfill ages and its implications. **Water Research**, v. 36, n. 16, p. 4023–32, set. 2002.

KEIDING, K.; NIELSEN, P. H. Desorption of organic macromolecules from activated sludge: Effect of ionic composition. **Water Research**, v. 31, n. 7, p. 1665–1672, 1997.

KJELDSEN, P. et al. Present and Long-Term Composition of MSW Landfill Leachate: A Review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297–336, 2002.

LIANG, Z.; LIU, J.-X.; LI, J. Decomposition and mineralization of aquatic humic substances (AHS) in treating landfill leachate using the Anammox process. **Chemosphere**, v. 74, n. 10, p. 1315–20, 2009.

LIAO, M. Y.; RANDTKE, S. J. Predicting the removal of soluble organic contaminants by lime softening. **Water Research**, v. 20, n. 1, p. 27–35, jan. 1986.

LITAS, G. C. et al. Desalination and Water Treatment The use of a submerged membrane batch reactor ( S . M . B . R ) for co-treatment of landfill leachates and domestic wastewater The use of a submerged membrane batch reactor ( S . M . B . R ) for co-treatment. **Desalination and Water Treatments**, v. 39, n. 1-3, p. 284–290, 2012.

MANNARINO, C. F. “Avaliação do Tratamento Combinado de Lixiviado de Aterros de Resíduos Sólidos Urbanos e Esgoto Doméstico Utilizando Indicadores Físico-Químicos e Biológicos. Programa de Pós-Graduação em Saúde Pública e Meio Ambiente da FIOCRUZ, Rio de Janeiro, 2010.

MANTSCH H.H, CHAPMAN D. **Infrared spectroscopy of biomolecules**. Wiley-Liss, New York, 1996.

MARAÑÓN, E. et al. Colour, turbidity and COD removal from old landfill leachate by coagulation-flocculation treatment. **Waste management & research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, v. 28, n. 8, p. 731–7, ago. 2010.

MARIO TAKAYUKI KATO. **Estudo e Tratamento de Águas Residuárias de Abatedouro de Aves**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1982.

MARTTINEN, S. K. et al. Screening of physical-chemical methods for removal of organic material, nitrogen and toxicity from low strength landfill leachates. **Chemosphere**, v. 46, n. 6, p. 851–8, mar. 2002.

METCALF & EDDY, INC. **Wastewater engineering: treatment and reuse**. 4<sup>a</sup> ed. International Edition. Revisada por TCHOBANOGLOUS, G.; BURTON, F.L.; STENSEL,

H.D. New York: McGraw-Hill, 2003. 1 819 p. (McGraw-Hill series in civil and environmental engineering).

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2006). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução 380 de 2006, altera o Anexo I da Resolução nº 375, de 29 de agosto de 2006, publicada no **Diário Oficial da União** de 30 de agosto de 2006.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2008). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 397, 03 de abril de 2008, altera o inciso II do § 4o e a Tabela X do § 5o, ambos do art. 34 da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA nº 357, de 2005, que dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes. **Diário Oficial da União**, Brasília, 7 de abril de 2008. Seção 1, p. 68.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2011). Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA). Resolução nº 430, 13 de maio de 2011 “Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução no 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial da União**, Brasília, 16 de maio de 2011. p. 89.

MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE. (2012). Plano Nacional de Resíduos Sólidos.

MORAVIA, W. G.; AMARAL, M. C. S.; LANGE, L. C. Evaluation of landfill leachate treatment by advanced oxidative process by Fenton ' s reagent combined with membrane separation system. **Waste Management**, v. 33, n. 1, p. 89–101, 2013.

MORGAN-SAGASTUME, J. M.; NOYOLA, A. Evaluation of an aerobic submerged filter packed with volcanic scoria. **Bioresource Technology**, v. 99, n. 7, p. 2528–36, maio 2008.

NURISEPEHR, M. et al. Sequencing treatment of landfill leachate using ammonia stripping, Fenton oxidation and biological treatment. **Waste Management & Research : the journal of the International Solid Wastes and Public Cleansing Association, ISWA**, v. 30, n. 9, p. 883–7, set. 2012.

NUZZO, A. et al. Conformational changes of dissolved humic and fulvic superstructures with progressive iron complexation. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 129, p. 1–5, jun. 2013.

OLIVEIRA, A.G. **Indicadores microbiológicos do tratamento conjugado de lixiviado de aterro sanitário e esgoto sanitário em lagoas de estabilização rasas**. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Estadual da Paraíba, Campina Grande, 2013.

PASQUALINI, L.N. **Oxidação da material orgânica dos lixiviados de aterros sanitários por ozônio, peróxido de hidrogênio e radiação ultravioleta**. 122 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2010.

POVINELI, J.; MATHEUS, C.E.; FRAGIACOMO, P. (1989). Aclimação de um resíduo industrial. **Revista DAE**, v.49, nº 154.

POVINELLI, J.; ALEM SOBRINHO, P. Introdução. In: GOMES, L.P. **Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para condições brasileiras**. Rio de Janeiro: ABES, 2009. 360 p.

POVINELLI, S.C.S. **Cinética, hidrodinâmica e biomassa em reator anaeróbio compartimentado alimentado com esgoto sanitário**. 137p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1999.

PÉDROT, M.; DIA, A.; DAVRANCHE, M. Dynamic structure of humic substances: rare earth elements as a fingerprint. **Journal of colloid and interface science**, v. 345, n. 2, p. 206–13, 15 maio 2010.

PI, K. W. et al. Pretreatment of municipal landfill leachate by a combined process. **Process Safety and Environmental Protection**, v. 87, n. 3, p. 191–196, maio 2009.

PICCOLO, A. the Supramolecular Structure of Humic Substances. **Soil Science**, v. 166, n. 11, p. 810–832, nov. 2001.



QASIM, S.R.; CHIANG, W. **Sanitary landfill leachate: generation, control and treatment**. Lancaster, Pennsylvania, EUA: Technomic Publishing Company, Inc, 1994. 339 p.

RENOU, S. et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of hazardous materials**, v. 150, n. 3, p. 468–93, 11 fev. 2008.

RENOU, S. et al. Amelioration of ultrafiltration process by lime treatment: Case of landfill leachate. **Desalination**, v. 249, n. 1, p. 72–82, nov. 2009.

ROCHA, J.C.; ROSA, A.H. **Substâncias húmicas aquáticas: interações com espécies metálicas**. São Paulo: Editora UNESP, 2003, 120 p.

SANTOS, A. S. P. Aspectos técnicos e econômicos do tratamento combinado de lixiviado de aterro sanitário com esgoto doméstico em lagoas de estabilização. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Civil - COPE/UFRJ , Rio de Janeiro, 2010.

SECRETARIA DO MEIO AMBIENTE DO ESTADO DE SÃO PAULO. Decreto Estadual nº 32.955/91, que regulamenta a Lei nº 6.134, de 2 de junho de 1988, que dispõe sobre a preservação dos depósitos naturais de águas subterrâneas do Estado de São Paulo e dá outras providências.

SHISKOWSKI, D.M; MAVINIC, D.S. Biological treatment of high ammonia leachate: influence of external carbon during initial startup. **Wat. Res.**, v.32, n.8, p.2544-2541, 1998.

SILVERSTEIN, R.M.; BONLER, G.C.; MORRIL, T.C.; KIEMLE, D.J. **Identificação espectrométrica de compostos orgânicos**. Rio de Janeiro: LTC, 2007. 490 p.

SMIDT, E.; MEISSL, K. The applicability of Fourier transform infrared (FT-IR) spectroscopy in waste management. **Wast. Manag.**, v. 27, n. 2, p. 268–76, 2007.

SOUTO, G.D.B. **Lixiviado de aterros sanitários brasileiros – estudo de remoção do nitrogênio amoniacal por processo de arraste com ar ( “stripping”)**. 371 p. Tese de Doutorado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2009.

STEPHENSON, T. et al. Feasibility of biological aerated filters (BAFs) for leachate treatment. In: 9<sup>th</sup> International Waste Magement and Landfill Symposium, 2003, Cagliari-Itália. **Proceedings**...Cagliari: IWWA, 2003.

Stevenson, F.J., **Humus Chemistry: Genesis, Composition and Reactions**, John Wily & Sons, New York, 1994.

TRABELSI, I.; SALAH, S.; OUNAEIS, F. Coupling short-time sequencing batch reactor and coagulation–settling process for co-treatment of landfill leachate with raw municipal wastewater. **Arabian Journal of Geosciences**, v. 6, n. 6, p. 2071–2079, 2013.

TURETTA, L. **Estudo da tratabilidade de efluente de reator anaeróbio e lixiviado de aterro sanitário por processo de lodos ativados**. 103 p. Dissertação de Mestrado, Programa de Pós-Graduação da Escola de Engenharia de São Carlos - Universidade de São Paulo, São Carlos, 2011.

VADIVELU, V. M.; KELLER, J.; YUAN, Z. Effect of free ammonia on the respiration and growth processes of an enriched Nitrobacter culture. **Water Research**, v. 41, n. 4, p. 826–34, 2007.

VAN HANNEN, E.J., VAN AGTERVELD, M.P., GONS, H.J., LAANBROEK, H.J. Revealing genetic diversity of eukaryotic microorganisms in aquatic environments by denaturing gradient gel electrophoresis. **J. Phycol.** 34, 206–213, 1998.

WEI, Y. et al. Organic and nitrogen removal from landfill leachate in aerobic granular sludge sequencing batch reactors. **Waste Management**, v. 32, n. 3, p. 448–55, 2012.

WISZNIOWSKI, J. et al. The effect of landfill leachate composition on organics and nitrogen removal in an activated sludge system with bentonite additive. **Journal of Environmental Management**, v. 85, n. 1, p. 59–68, out. 2007.

XU, Z.-Y. et al. Biological treatment of landfill leachate with the integration of partial nitrification, anaerobic ammonium oxidation and heterotrophic denitrification. **Bioresource Technology**, v. 101, n. 1, p. 79–86, 2010.

YU, J.; ZHOU, S.; WANG, W. Combined treatment of domestic wastewater with landfill leachate by using A2/O process. **Journal of Hazardous Materials**, v. 178, n. 1-3, p. 81–8, 15, 2010.

YUSOF, N. et al. Nitrification of ammonium-rich sanitary landfill leachate. **Waste Management (New York, N.Y.)**, v. 30, n. 1, p. 100–9, 2010.

ZHU, R. et al. Biological nitrogen removal from landfill leachate using anaerobic-aerobic process: denitrification via organics in raw leachate and intracellular storage polymers of microorganisms. **Bioresource Technology**, v. 128, p. 401–8, 2013.

## **ANEXO A**

**DADOS OBTIDOS COM O REATOR DE LODOS ATIVADOS EM  
ESCALA DE BANCADA APLICADO AO TRATAMENTO DA  
MISTURA LIXIVIADO/ESGOTO SANITÁRIO EM PROPORÇÕES  
VOLUMÉTRICAS DE 0 A 5 %**

**Tabela A1 - Remoção dos sólidos totais (ST) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |
|---|---|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|   | <i>0 %</i>  |                               |                | <i>0,2 %</i>                  |                               |                | <i>2 %</i>                    |                               |                | <i>5 %</i>                    |                               |                |
|   | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i>                                       | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> |
| 2   | 562   | 424                           | 25             | 610                           | 320                           | 48             | 864                           | 586                           | 32             | 1264                          | 694                           | 45             |
| 7   | 322   | 256                           | 20             | 338                           | 200                           | 41             | 806                           | 646                           | 20             | 1140                          | 928                           | 19             |
| 20  | 1078  | 278                           | 74             | 658                           | 358                           | 46             | 1162                          | 676                           | 42             | 1326                          | 1018                          | 23             |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A2 - Remoção dos sólidos totais fixos (STF) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |
|---|---|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|   | <i>0 %</i>  |                               |                | <i>0,2 %</i>                  |                               |                | <i>2 %</i>                    |                               |                | <i>5 %</i>                    |                               |                |
|   | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i>                                       | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> |
| 2   | 390   | 304                           | 22             | 88                            | 34                            | 61             | 240                           | 168                           | 30             | 666                           | 450                           | 32             |
| 7   | 168   | 150                           | 11             | 180                           | 80                            | 56             | 679                           | 544                           | 20             | 776                           | 632                           | 19             |
| 20  | 12  | 125                           | 0              | 350                           | 194                           | 45             | 598                           | 374                           | 37             | 466                           | 396                           | 15             |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A3-** Concentração de sólidos totais voláteis (STV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, com proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário de 0 a 5 %.

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 172   | 120        | 30                         | 522          | 286                        | 45         | 624                        | 418        | 33                         | 598        | 244                        | 59         |
| 7             | 154   | 106        | 31                         | 158          | 120                        | 24         | 127                        | 102        | 20                         | 364        | 296                        | 19         |
| 20            | 1066  | 153        | 86                         | 308          | 164                        | 47         | 564                        | 302        | 46                         | 860        | 622                        | 28         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A4 -** Remoção dos sólidos totais (ST) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário (%)</i> |            |                            |                            |            |                            |                            |            |            |
|---|---|------------|----------------------------|----------------------------|------------|----------------------------|----------------------------|------------|------------|
|   | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|   | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>                | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2   | 320   | 264        | 18                         | 640                        | 618        | 3                          | 450                        | 400        | 11         |
| 7   | 440   | 312        | 29                         | 748                        | 700        | 6                          | 1274                       | 1120       | 12         |
| 20  | 400   | 292        | 27                         | 884                        | 676        | 24                         | 1524                       | 1430       | 6          |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A5** - Remoção dos sólidos totais fixos (STF) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.

| <i>Tempo de<br/>operação do<br/>reator<br/>(dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário (%)</i> |                                   |                    |                                   |                                   |                    |                                   |                                   |                    |
|---|---|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|   | <i>0,2 %</i>  |                                   |                    | <i>2 %</i>                        |                                   |                    | <i>5 %</i>                        |                                   |                    |
|   | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i>   | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem<br/>(%)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem<br/>(%)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem<br/>(%)</i> |
| 2   | 136   | 120                               | 12                 | 316                               | 300                               | 5                  | 192                               | 178                               | 7                  |
| 7   | 178   | 165                               | 7                  | 510                               | 496                               | 3                  | 746                               | 668                               | 10                 |
| 20  | 204   | 110                               | 46                 | 360                               | 224                               | 38                 | 580                               | 530                               | 9                  |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A6** - Concentração de sólidos totais voláteis (STV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário de 0 a 5%.

| <i>T.Op<br/>(dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |                                   |                    |                                   |                                   |                    |                                   |                                   |                    |
|------------------------|---|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|--------------------|
|                        | <i>0,2 %</i>  |                                   |                    | <i>2 %</i>                        |                                   |                    | <i>5 %</i>                        |                                   |                    |
|                        | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i>   | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem<br/>(%)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem<br/>(%)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem<br/>(%)</i> |
| 2                      | 184   | 144                               | 22                 | 324                               | 318                               | 2                  | 258                               | 222                               | 14                 |
| 7                      | 262   | 147                               | 44                 | 238                               | 204                               | 14                 | 528                               | 452                               | 14                 |
| 20                     | 291   | 182                               | 37                 | 524                               | 452                               | 14                 | 944                               | 900                               | 5                  |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A7** - Remoção dos sólidos totais (ST) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0 a 5 %.

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |
|---|---|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|   | <i>0 %</i>  |                               |                | <i>0,2 %</i>                  |                               |                | <i>2 %</i>                    |                               |                | <i>5 %</i>                    |                               |                |
|   | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i>   | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> |
| 2   | 250   | 104                           | 58             | 272                           | 208                           | 24             | 638                           | 540                           | 15             | 814                           | 574                           | 29             |
| 7   | 556   | 278                           | 50             | 480                           | 220                           | 54             | 806                           | 646                           | 20             | 1140                          | 928                           | 19             |
| 20  | 276   | 110                           | 60             | 876                           | 492                           | 44             | 578                           | 444                           | 23             | 998                           | 612                           | 39             |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A8** - Remoção dos sólidos totais fixos (STF) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0 a 5 %.

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |
|---|---|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|   | <i>0 %</i>  |                               |                | <i>0,2 %</i>                  |                               |                | <i>2 %</i>                    |                               |                | <i>5 %</i>                    |                               |                |
|   | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i>   | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> |
| 2   | 156   | 88                            | 44             | 46                            | 24                            | 48             | 301                           | 280                           | 7              | 346                           | 210                           | 39             |
| 7   | 200   | 170                           | 15             | 280                           | 191                           | 32             | 540                           | 477                           | 12             | 840                           | 660                           | 21             |
| 20  | 186   | 93                            | 50             | 112                           | 56                            | 50             | 256                           | 214                           | 16             | 674                           | 312                           | 54             |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.



**Tabela A9** - Concentração de sólidos totais voláteis (STV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, com proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio de 0 a 5 %.

| <i>T.Op</i><br>(dias) | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |                              |                   |                              |                              |                   |                              |                              |                   |                              |                              |                   |
|-----------------------|---|------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
|                       | <i>0 %</i>  |                              |                   | <i>0,2 %</i>                 |                              |                   | <i>2 %</i>                   |                              |                   | <i>5 %</i>                   |                              |                   |
|                       | <i>Af</i><br>( $mg L^{-1}$ )  | <i>Ef</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Ef</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Ef</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Ef</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Rem</i><br>(%) |
| 2                     | 94  | 16                           | 83                | 226                          | 184                          | 19                | 337                          | 260                          | 23                | 468                          | 364                          | 22                |
| 7                     | 356   | 108                          | 70                | 200                          | 29                           | 86                | 266                          | 169                          | 36                | 300                          | 268                          | 11                |
| 20                    | 90  | 17                           | 81                | 764                          | 436                          | 43                | 322                          | 230                          | 29                | 324                          | 300                          | 7                 |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A10** - Remoção dos sólidos totais (ST) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio variando de 0 a 5 %.

| <i>Tempo de operação do reator</i><br>(dias) | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio (%)</i> |                              |                   |                              |                              |                   |                              |                              |                   |
|--|---|------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|------------------------------|------------------------------|-------------------|
|  | <i>0,2 %</i>  |                              |                   | <i>2 %</i>                   |                              |                   | <i>5 %</i>                   |                              |                   |
|  | <i>Af</i><br>( $mg L^{-1}$ )  | <i>Ef</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Ef</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Ef</i><br>( $mg L^{-1}$ ) | <i>Rem</i><br>(%) |
| 2  | 408   | 346                          | 15                | 552                          | 438                          | 21                | 1036                         | 904                          | 13                |
| 7  | 200   | 106                          | 47                | 748                          | 352                          | 53                | 828                          | 702                          | 15                |
| 20   | 316   | 188                          | 41                | 570                          | 376                          | 34                | 1524                         | 812                          | 47                |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A11 - Remoção dos sólidos totais fixos (STF) pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio variando de 0 a 5 %.**

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio (%)</i> |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |
|---|---|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|   | <i>0,2 %</i>  |                               |                | <i>2 %</i>                    |                               |                | <i>5 %</i>                    |                               |                |
|   | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i>   | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> |
| 2   | 124   | 86                            | 31             | 334                           | 260                           | 22             | 766                           | 694                           | 9              |
| 7   | 18  | 12                            | 33             | 474                           | 238                           | 50             | 746                           | 662                           | 11             |
| 20  | 172   | 114                           | 34             | 380                           | 302                           | 21             | 864                           | 592                           | 31             |

Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A12 - Concentração de sólidos totais voláteis (STV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio</i> |                               |                |                               |                               |                |                               |                               |                |
|--------------------|---|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|-------------------------------|-------------------------------|----------------|
|                    | <i>0,2 %</i>  |                               |                | <i>2 %</i>                    |                               |                | <i>5 %</i>                    |                               |                |
|                    | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i>   | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> | <i>Af (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Rem (%)</i> |
| 2                  | 284   | 260                           | 8              | 218                           | 178                           | 18             | 270                           | 210                           | 22             |
| 7                  | 182   | 94                            | 48             | 274                           | 114                           | 58             | 82                            | 40                            | 51             |
| 20                 | 144   | 74                            | 49             | 190                           | 74                            | 61             | 660                           | 220                           | 67             |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A13 - Índice volumétrico do lodo (IVL), sólidos sedimentáveis (SD) e concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) do reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias (T.Op), no ensaio 1, com proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|---------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|               | <i>0 %</i>  |                            |                            | <i>0,2 %</i>               |                            |                            | <i>2 %</i>                 |                            |                            | <i>5 %</i>                 |                            |                            |
|               | <i>SSVTA</i>  | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> |
| 2             | 2960  | 250                        | 84                         | 3600                       | 220                        | 61                         | 2790                       | 290                        | 104                        | 3186                       | 310                        | 97                         |
| 7             | 4633  | 230                        | 50                         | 3386                       | 260                        | 77                         | 3000                       | 210                        | 70                         | 2904                       | 240                        | 83                         |
| 20            | 5729  | 240                        | 42                         | 4400                       | 240                        | 55                         | 5514                       | 270                        | 49                         | 6286                       | 280                        | 45                         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A14 - Índice volumétrico do lodo (IVL), sólidos sedimentáveis (SD) e concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) do reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i>  | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|---------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |                            |                            | <i>2 %</i>                 |                            |                            | <i>5 %</i>                 |                            |                            |
|               | <i>SSVTA</i>  | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> |
| 2             | 2750  | 250                        | 91                         | 4700                       | 350                        | 74                         | 7000                       | 380                        | 54                         |
| 7             | 1345  | 100                        | 74                         | 3914                       | 300                        | 77                         | 4444                       | 400                        | 90                         |
| 20            | 2557  | 240                        | 94                         | 4600                       | 350                        | 76                         | 5250                       | 420                        | 80                         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A15 - Índice volumétrico do lodo (IVL), sólidos sedimentáveis (SD) e concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) do reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias (T.Op), no ensaio 3, com proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|---------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|               | <i>0 %</i>  |                            |                            | <i>0,2 %</i>               |                            |                            | <i>2 %</i>                 |                            |                            | <i>5 %</i>                 |                            |                            |
|               | <i>SSVTA</i>  | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> |
| 2             | 2960  | 220                        | 74                         | 2710                       | 320                        | 118                        | 2790                       | 350                        | 125                        | 2476                       | 220                        | 89                         |
| 7             | 4633  | 200                        | 43                         | 3386                       | 280                        | 83                         | 3000                       | 390                        | 130                        | 2904                       | 350                        | 121                        |
| 20            | 5729  | 250                        | 44                         | 4400                       | 300                        | 68                         | 5514                       | 400                        | 73                         | 6286                       | 420                        | 67                         |

**Tabela A16 - Índice volumétrico do lodo (IVL), sólidos sedimentáveis (SD) e concentração de sólidos suspensos voláteis no tanque de aeração (SSVTA) do reator de lodos ativados em escala de bancada, operado em regime de batelada por 20 dias (T.Op), no ensaio 4, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |                            |
|---------------|---|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |                            |                            | <i>2 %</i>                 |                            |                            | <i>5 %</i>                 |                            |                            |
|               | <i>SSVTA</i>  | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 | <i>SSVTA</i>               | <i>SD</i>                  | <i>IVL</i>                 |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(ml L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(mL g<sup>-1</sup>)</i> |
| 2             | 2530  | 200                        | 79                         | 4700                       | 350                        | 74                         | 7000                       | 450                        | 64                         |
| 7             | 1345  | 150                        | 111                        | 3914                       | 300                        | 77                         | 4444                       | 280                        | 63                         |
| 20            | 2557  | 220                        | 86                         | 4600                       | 380                        | 83                         | 5250                       | 350                        | 67                         |

**Tabela A17 - Concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, com proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 67  | 12         | 82                         | 85           | 28                         | 67         | 46                         | 16         | 65                         | 44         | 36                         | 18         |
| 7             | 25  | 0          | 100                        | 50           | 20                         | 60         | 38                         | 13         | 66                         | 42         | 11                         | 74         |
| 20            | 75  | 18         | 76                         | 46           | 12                         | 74         | 154                        | 73         | 53                         | 74         | 27                         | 64         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A18- Concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 67  | 20         | 70                         | 54         | 34                         | 37         | 80                         | 43         | 46         |
| 7             | 50  | 0          | 100                        | 38         | 13                         | 66         | 42                         | 11         | 74         |
| 20            | 54  | 14         | 74                         | 52         | 8                          | 85         | 123                        | 65         | 47         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A19 - Concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, com proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 49  | 12         | 76                         | 59           | 15                         | 75         | 17                         | 11         | 35                         | 18         | 15                         | 17         |
| 7             | 60  | 38         | 37                         | 45           | 24                         | 47         | 57                         | 31         | 46                         | 48         | 24                         | 50         |
| 20            | 40  | 10         | 75                         | 25           | 10                         | 60         | 17                         | 8          | 52                         | 45         | 10                         | 78         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A20 - Concentração de sólidos suspensos voláteis (SSV) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 67  | 20         | 70                         | 44         | 18                         | 59         | 45                         | 28         | 38         |
| 7             | 50  | 18         | 64                         | 38         | 13                         | 66         | 42                         | 31         | 26         |
| 20            | 54  | 14         | 74                         | 42         | 16                         | 62         | 123                        | 77         | 37         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A21 - Concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, com proporções volumétricas de lixiviado bruto em esgoto sanitário de 0 a 5 %.**

| <i>T,Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 495   | 412        | 17                         | 516          | 284                        | 45         | 818                        | 570        | 30                         | 1220       | 658                        | 46         |
| 7             | 288   | 256        | 11                         | 285          | 180                        | 37         | 768                        | 633        | 18                         | 1098       | 917                        | 16         |
| 20            | 1003  | 260        | 74                         | 611          | 346                        | 43         | 949                        | 658        | 31                         | 1252       | 991                        | 21         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A22 - Concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário de 0 a 5 %.**

| <i>T,Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 253   | 244        | 4                          | 586        | 584                        | 0,3        | 370                        | 357        | 4          |
| 7             | 387   | 312        | 19                         | 710        | 687                        | 3          | 1232                       | 1109       | 10         |
| 20            | 346   | 278        | 20                         | 832        | 668                        | 20         | 1391                       | 1365       | 2          |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A23 - Concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, com proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio de 0 a 5 %.**

| <i>T,Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 183   | 68         | 63                         | 178          | 172                        | 3          | 592                        | 519        | 12                         | 778        | 547                        | 30         |
| 7             | 469   | 223        | 52                         | 424          | 188                        | 56         | 734                        | 631        | 14                         | 1072       | 895                        | 17         |
| 20            | 230   | 98         | 57                         | 844          | 481                        | 43         | 546                        | 440        | 19                         | 943        | 600                        | 36         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A24 - Concentração de sólidos dissolvidos totais (SDT) no afluente e efluente dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, operados em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, com proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio de 0 a 5 %.**

| <i>T,Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 354   | 326        | 8                          | 508        | 420                        | 17         | 991                        | 876        | 12         |
| 7             | 147   | 88         | 40                         | 710        | 339                        | 52         | 786                        | 671        | 15         |
| 20            | 262   | 174        | 34                         | 528        | 360                        | 32         | 1391                       | 735        | 47         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.



**Tabela A25 – Remoção da DBO<sub>5,20</sub> bruta pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>T,Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 137   | 3          | 98                         | 189          | 10                         | 95         | 193                        | 3          | 98                         | 189        | 5                          | 98         |
| 7             | 115   | 2          | 98                         | 192          | 5                          | 98         | 175                        | 6          | 98                         | 166        | 7                          | 96         |
| 20            | 169   | 4          | 98                         | 170          | 3                          | 98         | 126                        | 6          | 95                         | 162        | 7                          | 96         |

Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A26 - Remoção da DBO<sub>5,20</sub> bruta pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado por “air stripping” em esgoto sanitário variando de 0,2 a 5%.**

| <i>T,Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2             | 164   | 3          | 98                         | 163        | 12                         | 93         | 169                        | 13         | 92         |
| 7             | 166   | 2          | 99                         | 179        | 12                         | 93         | 104                        | 12         | 88         |
| 20            | 175   | 5          | 97                         | 157        | 5                          | 97         | 152                        | 10         | 93         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: remoção.

**Tabela A27 - Remoção da DBO<sub>5, 20</sub> bruta pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i><br><br>(dias) | Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio |           |                   |                                    |           |                   |                                    |           |                   |                                    |           |                   |
|---------------------------|--|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|
|                           | 0 %  |           |                   | 0,2 %                              |           |                   | 2 %                                |           |                   | 5 %                                |           |                   |
|                           | <i>Af</i><br>(mg L <sup>-1</sup> )                             | <i>Ef</i> | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>(mg L <sup>-1</sup> ) | <i>Ef</i> | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>(mg L <sup>-1</sup> ) | <i>Ef</i> | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>(mg L <sup>-1</sup> ) | <i>Ef</i> | <i>Rem</i><br>(%) |
| 2                         | 98   | 4,4       | 96                | 111                                | 3,3       | 97                | 115                                | 5,5       | 95                | 113                                | 7         | 94                |
| 7                         | 117  | 2,4       | 98                | 92                                 | 4,6       | 95                | 75                                 | 8,4       | 89                | 75                                 | 6,8       | 91                |
| 20                        | 94   | 0         | 100               | 102                                | 3,2       | 97                | 90                                 | 4         | 96                | 100                                | 5,5       | 95                |

(\*) Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A28 - Remoção da DBO<sub>5, 20</sub> bruta pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado por “air stripping” em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.O</i><br><br><i>p</i><br><br>(dias) | Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio |           |                   |                                    |           |                   |                                    |           |                   |
|--|--|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|------------------------------------|-----------|-------------------|
|  | 0,2 %  |           |                   | 2 %                                |           |                   | 5 %                                |           |                   |
|  | <i>Af</i><br>(mg L <sup>-1</sup> )                                   | <i>Ef</i> | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>(mg L <sup>-1</sup> ) | <i>Ef</i> | <i>Rem</i><br>(%) | <i>Af</i><br>(mg L <sup>-1</sup> ) | <i>Ef</i> | <i>Rem</i><br>(%) |
| 2  | 90   | 4         | 95                | 98                                 | 12        | 88                | 106                                | 13        | 88                |
| 7  | 166  | 0         | 100               | 179                                | 5         | 97                | 104                                | 9         | 91                |
| 20                                       | 152  | 2         | 99                | 161                                | 9         | 94                | 152                                | 6         | 96                |

(\*) Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A29 - Remoção do COT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |           |            |                            |           |            |                            |           |            |                            |           |            |
|---------------|---|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |           |            | <i>0,2 %</i>               |           |            | <i>2 %</i>                 |           |            | <i>5 %</i>                 |           |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> |
| 2             | 70  | 10        | 86         | 90                         | 15        | 83         | 130                        | 31        | 76         | 175                        | 72        | 59         |
| 7             | 90  | 17        | 81         | 55                         | 11        | 80         | 74                         | 35        | 52         | 100                        | 39        | 61         |
| 20            | 46  | 8         | 83         | 78                         | 17        | 78         | 131                        | 43        | 67         | 170                        | 74        | 56         |

Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A30 – Remoção do COT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |           |            |                            |           |            |                            |           |            |
|---------------|---|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |           |            | <i>2 %</i>                 |           |            | <i>5 %</i>                 |           |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> |
| 2             | 72  | 11        | 85         | 99                         | 30        | 70         | 115                        | 43        | 62         |
| 7             | 80  | 14        | 83         | 85                         | 22        | 74         | 103                        | 30        | 71         |
| 20            | 104   | 26        | 75         | 124                        | 27        | 78         | 157                        | 38        | 76         |

Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A31 - Remoção do COT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |           |            |                            |           |            |                            |           |            |                            |           |            |
|---------------|---|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |           |            | <i>0,2 %</i>               |           |            | <i>2 %</i>                 |           |            | <i>5 %</i>                 |           |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> |
| 2             | 49  | 14        | 71         | 68                         | 17        | 75         | 88                         | 35        | 60         | 114                        | 67        | 41         |
| 7             | 50  | 12        | 76         | 65                         | 21        | 68         | 80                         | 39        | 51         | 155                        | 79        | 49         |
| 20            | 44  | 11        | 75         | 52                         | 16        | 69         | 86                         | 33        | 62         | 133                        | 66        | 50         |

Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A32 – Remoção do COT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |           |            |                            |           |            |                            |           |            |
|---------------|---|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |           |            | <i>2 %</i>                 |           |            | <i>5 %</i>                 |           |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> |
| 2             | 60  | 21        | 65         | 74                         | 34        | 54         | 101                        | 55        | 46         |
| 7             | 64  | 24        | 63         | 75                         | 30        | 60         | 112                        | 68        | 39         |
| 20            | 58  | 20        | 66         | 78                         | 36        | 54         | 117                        | 60        | 49         |

Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A33 - Remoção da DQO total pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i>  | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 314   | 44         | 86                         | 372          | 124                        | 67         | 469                        | 148        | 69                         | 528        | 285                        | 46         |
| 7             | 255   | 30         | 88                         | 270          | 72                         | 73         | 310                        | 147        | 53                         | 422        | 265                        | 37         |
| 20            | 304   | 40         | 87                         | 395          | 90                         | 77         | 493                        | 151        | 69                         | 589        | 264                        | 55         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluentes; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A33- Remoção da DQO total pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada com por 20 dias, no ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i>  | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2             | 330   | 87         | 74                         | 374        | 176                        | 53         | 509                        | 268        | 47         |
| 7             | 247   | 60         | 75                         | 341        | 154                        | 55         | 444                        | 257        | 42         |
| 20            | 354   | 135        | 62                         | 393        | 151                        | 62         | 524                        | 327        | 38         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluentes; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A34 - Remoção da DQO total pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada com por 20 dias, no ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i> | Proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio |           |                       |           |                       |            |                       |           |                       |           |                       |            |
|--------------|--|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|------------|
|              | 0 %  |           |                       | 0,2 %     |                       |            | 2%                    |           |                       | 5 %       |                       |            |
|              | <i>Af</i>  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i>            | <i>Af</i> | <i>Ef</i>             | <i>Rem</i> | <i>Af</i>             | <i>Ef</i> | <i>Rem</i>            | <i>Af</i> | <i>Ef</i>             | <i>Rem</i> |
| (dias)       | (mg L <sup>-1</sup> )  | (%)       | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)       | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)        | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)       | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)       | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)        |
| 2            | 197  | 100       | 49                    | 252       | 92                    | 63         | 305                   | 163       | 47                    | 389       | 248                   | 36         |
| 7            | 242  | 76        | 68                    | 245       | 78                    | 68         | 371                   | 130       | 65                    | 439       | 263                   | 40         |
| 20           | 156  | 27        | 83                    | 148       | 60                    | 59         | 200                   | 105       | 69                    | 340       | 200                   | 41         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A35 - Remoção da DQO total pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada com por 20 dias, no ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i> | Proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio |           |                       |           |                       |            |                       |           |            |
|--------------|--|-----------|-----------------------|-----------|-----------------------|------------|-----------------------|-----------|------------|
|              | 0,2 %  |           |                       | 2 %       |                       |            | 5 %                   |           |            |
|              | <i>Af</i>  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i>            | <i>Af</i> | <i>Ef</i>             | <i>Rem</i> | <i>Af</i>             | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> |
| (dias)       | (mg L <sup>-1</sup> )  | (%)       | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)       | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)        | (mg L <sup>-1</sup> ) | (%)       | (%)        |
| 2            | 250  | 86        | 66                    | 300       | 188                   | 37         | 385                   | 237       | 38         |
| 7            | 218  | 87        | 60                    | 298       | 139                   | 53         | 420                   | 249       | 41         |
| 20           | 164  | 119       | 62                    | 233       | 121                   | 48         | 321                   | 214       | 33         |

T.Op: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A36 - Remoção da DQO solúvel pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i>  | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 154   | 20         | 87                         | 226          | 61                         | 73         | 305                        | 138        | 55                         | 390        | 221                        | 43         |
| 7             | 189   | 18         | 91                         | 127          | 32                         | 75         | 182                        | 110        | 40                         | 311        | 197                        | 37         |
| 20            | 216   | 16         | 93                         | 256          | 33                         | 87         | 259                        | 103        | 60                         | 397        | 188                        | 53         |

T.Op.: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A37 - Remoção da DQO solúvel pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no Ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i>  | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2             | 174   | 46         | 74                         | 291        | 106                        | 64         | 348                        | 195        | 44         |
| 7             | 129   | 38         | 70                         | 180        | 81                         | 55         | 334                        | 184        | 45         |
| 20            | 237   | 29         | 88                         | 283        | 115                        | 59         | 366                        | 193        | 47         |

T.Op.: tempo de operação; Af: afluente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A38 - Remoção da DQO solúvel pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no Ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i>  | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |           |            |                            |           |            |                            |           |            |                            |           |            |
|---------------|---|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |           |            | <i>0,2 %</i>               |           |            | <i>2 %</i>                 |           |            | <i>5 %</i>                 |           |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> |
| 2             | 141   | 23        | 84         | 163                        | 32        | 80         | 216                        | 75        | 65         | 318                        | 195       | 39         |
| 7             | 83  | 18        | 78         | 88                         | 21        | 76         | 164                        | 70        | 57         | 294                        | 183       | 38         |
| 20            | 81  | 20        | 75         | 88                         | 25        | 72         | 164                        | 84        | 49         | 294                        | 188       | 36         |

T.Op.: tempo de operação; Af: afluyente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.

**Tabela A39 - Remoção da DQO solúvel pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no Ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op.</i>  | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário</i> |           |            |                            |           |            |                            |           |            |
|---------------|---|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|----------------------------|-----------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |           |            | <i>2 %</i>                 |           |            | <i>5 %</i>                 |           |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i> | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>(%)</i> |
| 2             | 148   | 60        | 59         | 185                        | 116       | 37         | 307                        | 195       | 37         |
| 7             | 111   | 38        | 66         | 175                        | 76        | 56         | 257                        | 192       | 25         |
| 20            | 98  | 36        | 63         | 163                        | 102       | 37         | 250                        | 195       | 22         |

T.Op.: tempo de operação; Af: afluyente; Ef: efluente; Rem: eficiência de remoção.



**Tabela A40 - Remoção do NTK pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 35  | 2          | 94                         | 36           | 9                          | 77         | 51                         | 16         | 69                         | 69         | 25                         | 63         |
| 7             | 50  | 4          | 92                         | 39           | 6                          | 84         | 47                         | 10         | 80                         | 47         | 15                         | 68         |
| 20            | 29  | 3          | 89                         | 36           | 5                          | 86         | 71                         | 15         | 79                         | 68         | 15                         | 78         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A41 - Remoção do NTK pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário (%)</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2             | 39  | 4          | 89                         | 51         | 12                         | 77         | 65                         | 14         | 79         |
| 7             | 47  | 5          | 89                         | 60         | 8                          | 86         | 72                         | 18         | 75         |
| 20            | 36  | 2          | 94                         | 39         | 3                          | 92         | 44                         | 7          | 83         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A42 - Remoção do NTK pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 37  | 4          | 89                         | 38           | 4                          | 89         | 47                         | 5          | 89                         | 67         | 8                          | 87         |
| 7             | 39  | 3          | 92                         | 43           | 5                          | 88         | 47                         | 3          | 93                         | 58         | 10                         | 84         |
| 20            | 43  | 1          | 98                         | 43           | 4                          | 90         | 49                         | 6          | 87                         | 50         | 7                          | 85         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A43 - Remoção do NTK pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário (%)</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2             | 38  | 4          | 89                         | 37         | 2                          | 94         | 37                         | 8          | 77         |
| 7             | 41  | 2          | 95                         | 41         | 3                          | 92         | 50                         | 6          | 87         |
| 20            | 71  | 1          | 99                         | 40         | 4                          | 89         | 48                         | 6          | 87         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A44 - Remoção do NAT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 1, para proporções volumétricas de lixiviado em esgoto sanitário variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 32  | 1          | 97                         | 33           | 7                          | 78         | 37                         | 8          | 78                         | 51         | 13                         | 74         |
| 7             | 37  | 4          | 89                         | 35           | 6                          | 83         | 37                         | 7          | 80                         | 35         | 17                         | 51         |
| 20            | 27  | 2          | 93                         | 30           | 4                          | 85         | 35                         | 10         | 71                         | 49         | 12                         | 76         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A45 - Remoção do NAT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 2, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário (%)</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2             | 33  | 2          | 94                         | 37         | 3                          | 91         | 51                         | 4          | 93         |
| 7             | 33  | 3          | 91                         | 34         | 3                          | 93         | 35                         | 4          | 89         |
| 20            | 28  | 1          | 96                         | 30         | 2                          | 95         | 29                         | 3          | 89         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A46 - Remoção do NAT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 3, para proporções volumétricas de lixiviado bruto em efluente anaeróbio variando de 0 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |            |                            |              |                            |            |                            |            |                            |            |                            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|--------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|
|               | <i>0 %</i>  |            |                            | <i>0,2 %</i> |                            |            | <i>2 %</i>                 |            |                            | <i>5 %</i> |                            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i>   | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |
| 2             | 32  | 0          | 100                        | 31           | 3                          | 89         | 42                         | 5          | 88                         | 54         | 6                          | 88         |
| 7             | 36  | 1          | 96                         | 35           | 4                          | 89         | 38                         | 2          | 94                         | 43         | 4                          | 91         |
| 20            | 38  | 1          | 99                         | 37           | 1                          | 99         | 45                         | 4          | 91                         | 36         | 6                          | 83         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A47 - Remoção do NAT pelo reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, no ensaio 4, para proporções volumétricas de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio variando de 0,2 a 5 %.**

| <i>T.Op</i>   | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio (%)</i> |            |                            |            |                            |            |                            |            |            |
|---------------|---|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|----------------------------|------------|------------|
|               | <i>0,2 %</i>  |            |                            | <i>2 %</i> |                            |            | <i>5 %</i>                 |            |            |
|               | <i>Af</i>   | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i>                 | <i>Af</i>  | <i>Ef</i>                  | <i>Rem</i> | <i>Af</i>                  | <i>Ef</i>  | <i>Rem</i> |
| <i>(dias)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i>  | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> | <i>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>(%)</i> |            |
| 2             | 29  | 1          | 96                         | 28         | 1                          | 97         | 29                         | 1          | 98         |
| 7             | 37  | 0          | 100                        | 35         | 0                          | 100        | 37                         | 3          | 93         |
| 20            | 37  | 1          | 97                         | 37         | 2                          | 96         | 36                         | 1          | 98         |

T.Op: tempo de operação do reator; Af.: afluente; Ef.: efluente; Rem.: eficiência de remoção.

**Tabela A48 - Concentração de nitrito no afluente e efluente do reator de lodos ativados em escala de bancada operado em regime de batelada por 20 dias, nos ensaios 1, 2, 3 e 4.**

| Ensaio | Tempo de operação<br>(dias) | Proporções volumétricas |          |                       |          |                       |          |                       |          |
|--------|-----------------------------|-------------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|-----------------------|----------|
|        |                             | 0 %                     |          | 0,2 %                 |          | 2%                    |          | 5%                    |          |
|        |                             | Afluente                | Efluente | Afluente              | Efluente | Afluente              | Efluente | Afluente              | Efluente |
|        |                             | (mg L <sup>-1</sup> )   |          | (mg L <sup>-1</sup> ) |          | (mg L <sup>-1</sup> ) |          | (mg L <sup>-1</sup> ) |          |
| 1      | 2                           | 0,2                     | 0,3      | 1,5                   | 1,4      | 0,2                   | 1,2      | 0,10                  | 1,4      |
|        | 7                           | 0,1                     | 1,0      | 0,1                   | 0,6      | 0,1                   | 0,6      | 0,10                  | 1,0      |
|        | 20                          | 0,3                     | 1,2      | 0,3                   | 1,2      | 0,1                   | 0,8      | 0,10                  | 1,3      |
| 2      | 2                           |                         |          | 0,0                   | 0,7      | 0                     | 0,4      | 0,10                  | 5,3      |
|        | 7                           | NA                      |          | 0,1                   | 0,4      | 0                     | 0,3      | 0,10                  | 0,5      |
|        | 20                          |                         |          | 0,1                   | 2,1      | 0                     | 1,7      | 0,10                  | 3,0      |
| 3      | 2                           | 0,2                     | 0,31     | 1,55                  | 1,38     | 0,24                  | 1,24     | 0,10                  | 1,4      |
|        | 7                           | 0,1                     | 1,05     | 0,08                  | 0,57     | 0,10                  | 0,64     | 0,11                  | 1,0      |
|        | 20                          | 0,3                     | 1,15     | 0,28                  | 1,18     | 0,06                  | 0,75     | 0,08                  | 1,3      |
| 4      | 2                           |                         |          | 0,03                  | 0,7      | 0,04                  | 0,4      | 0,14                  | 5,3      |
|        | 7                           | NA                      |          | 0,07                  | 0,4      | 0,04                  | 0,3      | 0,07                  | 0,5      |
|        | 20                          |                         |          | 0,08                  | 2,1      | 0,03                  | 10       | 0,06                  | 3,0      |

NA: não se aplica, pois as condições controle foram avaliadas apenas nos ensaios 1 e 3.

**Tabela A49 – Microscopia ótica comum do lodo das câmaras de aeração do reator de lodos ativados em escala de bancada, no ensaio 1, durante 20 dias de operação: análise qualitativa (adaptado de Povinelli et al., 1989).**

| Microrganismos                                     | Proporções volumétricas |     |     |       |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|-------------------------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | 0 %                     |     |     | 0,2 % |     |     | 2 % |     |     | 5 % |     |     |
| Tempo (dias)                                       | 2                       | 7   | 20  | 2     | 7   | 20  | 2   | 7   | 20  | 2   | 7   | 20  |
| <b>Bact. col.</b>                                  | +++                     | ++  | ++  | +++   | ++  | ++  | +++ | ++  | ++  | +++ | +   | +   |
| <b>Bact. fil.</b>                                  | +                       | +   | +   | +     | ++  | ++  | +   | +   | ++  | ++  | ++  | ++  |
| <b>Prot. ciliados fixos</b>                        | +++                     | +++ | +++ | +++   | +++ | +++ | +++ | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  |
| <b>Prot. flagelados</b>                            | ND                      | ND  | ND  | ND    | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |
| <b>Prot. ciliados livre natantes e rastejantes</b> | ++                      | ++  | ++  | ++    | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | +   | +   | +   |
| <b>Rotíferos</b>                                   | ++                      | ++  | ++  | ++    | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | +   |
| <b>Nematóides</b>                                  | ND                      | ND  | ND  | ND    | ++  | ND  | ND  | ++  | ND  | ND  | ND  | ND  |
| <b>Flocos compactos</b>                            | +++                     | +++ | +++ | +++   | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ |
| <b>Flocos filamentosos</b>                         | ND                      | ND  | ND  | ND    | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; Bact. Col.: bactérias coloniais; Bact. Fil.: bactéria filamentosas; Prot.: protozoários.

**Tabela A50– Microscopia ótica comum do lodo das câmaras de aeração do reator de lodos ativados em escala de bancada, no ensaio 2, durante 20 dias de operação: análise qualitativa (adaptado de Povinelli et al., 1989).**

| Microorganismos                                    | Proporções volumétricas |     |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | 0,2 %                   |     |     | 2 % |     |     | 5 % |     |     |     |
|  | Tempo (dias)            | 2   | 7   | 20  | 2   | 7   | 20  | 2   | 7   | 20  |
| <b>Bact. col.</b>                                  | ++                      | ND  | ++  | ++  | ++  | +   | +   | +   | +   | +   |
| <b>Bact. fil.</b>                                  | +                       | ND  | +   | +   | +   | +   | +   | +   | ND  | +++ |
| <b>Prot. ciliados fixos</b>                        | +++                     | +++ | +++ | +++ | ++  | ++  | ++  | ++  | +   | +   |
| <b>Prot. flagelados</b>                            | ND                      | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |
| <b>Prot. ciliados livre natantes e rastejantes</b> | +                       | ++  | +   | ++  | ++  | +   | +   | +   | +   | +   |
| <b>Rotíferos</b>                                   | ++                      | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | +   | +   | +   |
| <b>Nematóides</b>                                  | ND                      | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |
| <b>Flocos compactos</b>                            | +++                     | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ |
| <b>Flocos filamentosos</b>                         | ND                      | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; Bact. Col.: bactérias coloniais; Bact. Fil.: bactérias filamentosas; Prot.: protozoários.

**Tabela A51 – Microscopia ótica comum do lodo das câmaras de aeração do reator de lodos ativados em escala de bancada, no ensaio 3, durante 20 dias de operação: análise qualitativa (adaptado de Povinelli et al., 1989).**

| Microrganismos                                     | Proporções volumétricas |     |     |       |     |     |     |     |     |     |    |     |     |
|--|-------------------------|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|----|-----|-----|
|  | 0 %                     |     |     | 0,2 % |     |     | 2 % |     |     | 5 % |    |     |     |
|  | Tempo (dias)            | 2   | 7   | 20    | 2   | 7   | 20  | 2   | 7   | 20  | 2  | 7   | 20  |
| <b>Bact. col.</b>                                  | ++                      | ++  | ++  | ++    | +   | ++  | +   | +   | ++  | +   | +  | ++  |     |
| <b>Bact. fil.</b>                                  | +                       | +   | +   | ++    | ++  | +   | +   | +   | +   | +   | +  | +   |     |
| <b>Prot. ciliados fixos</b>                        | ++                      | ++  | ++  | ++    | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | ++  | ND | ++  | ++  |
| <b>Prot. flagelados</b>                            | ND                      | ND  | ND  | ND    | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND | ND  | ND  |
| <b>Prot. ciliados livre natantes e rastejantes</b> | ++                      | +   | +   | +     | ND  | ND  | +   | ND  | ND  | ND  | +  | ND  | ND  |
| <b>Rotíferos</b>                                   | ++                      | +   | +   | ++    | +   | ND  | ++  | ND  | +   | +   | +  | +   |     |
| <b>Nematóides</b>                                  | ND                      | ND  | ND  | ND    | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND | ND  | ND  |
| <b>Flocos compactos</b>                            | +++                     | +++ | +++ | ++    | +++ | +++ | ++  | +++ | +++ | +++ | ++ | +++ | +++ |
| <b>Flocos filamentosos</b>                         | ND                      | ND  | ND  | ND    | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND | ND  | ND  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; Bact. Col.: bactérias coloniais; Bact. Fil.: bactérias filamentosas; Prot.: protozoários.



**Tabela A52 – Microscopia ótica comum do lodo das câmaras de aeração do reator de lodos ativados em escala de bancada, no ensaio 4, durante 20 dias de operação: análise qualitativa (adaptado de Povinelli et al., 1989).**

| Microorganismos                                    | Proporções volumétricas |     |     |     |     |     |     |     |     |
|--|-------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|-----|
|  | 0,2 %                   |     |     | 2 % |     |     | 5 % |     |     |
|  | 2                       | 7   | 20  | 2   | 7   | 20  | 2   | 7   | 20  |
| <b>Bact. col.</b>                                  | ++                      | ++  | ++  | ++  | ++  | +   | ++  | ++  | ++  |
| <b>Bact. fil.</b>                                  | +                       | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   | +   |
| <b>Prot. ciliados fixos</b>                        | +++                     | ++  | ++  | +++ | +++ | ND  | ++  | ++  | ++  |
| <b>Prot. flagelados</b>                            | ND                      | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |
| <b>Prot. ciliados livre natantes e rastejantes</b> | +                       | +   | +   | +   | +   | +   | ND  | +   | +   |
| <b>Rotíferos</b>                                   | ND                      | +   | ND  | ND  | +   | ND  | ND  | +   | +   |
| <b>Nematóides</b>                                  | ND                      | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |
| <b>Flocos compactos</b>                            | +++                     | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ | +++ |
| <b>Flocos filamentosos</b>                         | ND                      | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  | ND  |

+++ : muito frequente; ++: moderadamente frequente; +: pouco frequente; ND: não detectado; Bact. Col.: bactérias coloniais; Bact. Fil.: bactérias filamentosas; Prot.: protozoários.

**Tabela A49 - Ensaio 1: medidas de pH, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura, no tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, alimentados mistura LIX/ES em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em esgoto sanitário</i> |                               |                  |              |                               |                  |            |                               |                  |            |                               |                  |
|---|---|-------------------------------|------------------|--------------|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|
|   | <i>0 %</i>  |                               |                  | <i>0,2 %</i> |                               |                  | <i>2 %</i> |                               |                  | <i>5 %</i> |                               |                  |
|   | <i>pH</i>   | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>    | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> |
| 2   | 7,2   | 12                            | 22               | 7,74         | 7,66                          | 24               | 7,7        | 12                            | 20               | 7,81       | 11                            | 22               |
| 7   | 7,3   | 13                            | 22               | 7,45         | 2,98                          | 22               | 7,48       | 12                            | 21               | 7,82       | 14                            | 22               |
| 20  | 7,1   | 12                            | 22               | 7,14         | 2,78                          | 22               | 7,48       | 13                            | 20               | 7,47       | 14                            | 21               |

Temp: temperatura.

**Tabela A50 – Ensaio 2: medidas de pH, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura, no tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, alimentados mistura LIX/ES em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em esgoto sanitário (%)</i> |                               |                  |            |                               |                  |            |                               |                  |
|---|---|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|
|   | <i>0,2 %</i>  |                               |                  | <i>2 %</i> |                               |                  | <i>5 %</i> |                               |                  |
|   | <i>pH</i>   | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> |
| 2   | 7,5   | 12                            | 22               | 7,5        | 12                            | 21               | 7,8        | 10                            | 22               |
| 7   | 7,7   | 13                            | 22               | 7,7        | 13                            | 21               | 7,8        | 13                            | 22               |
| 20  | 7,4   | 13                            | 22               | 8,0        | 9,5                           | 21               | 8,0        | 12                            | 22               |

Temp: temperatura

**Tabela A51 - Ensaio 3: medidas de pH, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura, no tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, alimentados mistura LIX/ES em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado bruto em efluente anaeróbio</i> |                               |                  |              |                               |                  |            |                               |                  |            |                               |                  |
|---|---|-------------------------------|------------------|--------------|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|
|   | <i>0 %</i>  |                               |                  | <i>0,2 %</i> |                               |                  | <i>2 %</i> |                               |                  | <i>5 %</i> |                               |                  |
|   | <i>pH</i>   | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>    | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> |
| 2   | 6,5   | 9                             | 24               | 7,22         | 9,5                           | 24               | 7,11       | 16                            | 23               | 7,2        | 11                            | 21               |
| 7   | 7,0   | 9                             | 23               | 7,5          | 12                            | 24               | 7,5        | 15                            | 21               | 7,37       | 9                             | 21               |
| 20  | 7,0   | 10                            | 23               | 7,3          | 9                             | 22               | 7,5        | 17                            | 20               | 7,13       | 14                            | 21               |

Temp: temperatura.

**Tabela A52 - Ensaio 4: medidas de pH, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura, no tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala de bancada, alimentados mistura LIX/ES em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

| <i>Tempo de operação do reator (dias)</i> | <i>Proporção volumétrica de lixiviado pré-tratado em efluente anaeróbio (%)</i> |                               |                  |            |                               |                  |            |                               |                  |
|---|---|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|------------|-------------------------------|------------------|
|   | <i>0,2 %</i>  |                               |                  | <i>2 %</i> |                               |                  | <i>5 %</i> |                               |                  |
|   | <i>pH</i>   | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>pH</i>  | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> |
| 2   | 6,0   | 8,8                           | 23               | 7,0        | 6,2                           | 22               | 7,6        | 15                            | 22               |
| 7   | 6,5   | 6,4                           | 23               | 7,2        | 10,5                          | 23               | 8,4        | 15                            | 23               |
| 20  | 7,0   | 7,0                           | 23               | 7,0        | 7,5                           | 23               | 8,0        | 16                            | 23               |

Temp: temperatura

**Quadro A1 – Concentração de metais nas amostras do ensaio 1: reator de lodos ativados em escala de bancada alimentado com lixiviado bruto e esgoto sanitário em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

| <i>Proporções volumétricas (%)</i> | <i>Metals</i>                       | <i>Zn</i> | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Ni</i> | <i>Fe</i> | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | <i>Cr</i> |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                    | <i>Amostras</i>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                                    | <b>Inóculo (mg kg<sup>-1</sup>)</b> | 220       | 19        | 3         | 16        | 3717      | 38        | 108       | 40        |
| <b>0</b>                           | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,09      | 0,01      | 0         | 0,01      | 0,88      | 0,02      | 0,02      | 0,2       |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,08      | 0         | 0         | 0,17      | 1,05      | 0,05      | 0,02      | 0,32      |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 345       | 16        | 0         | 11        | 5342      | 49        | 81        | 24        |
| <b>0,2</b>                         | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,13      | 0,02      | 0         | 0,06      | 1,31      | 0,04      | 0,03      | 0,2       |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,12      | 0,02      | 0         | 0,48      | 3,85      | 0,11      | 0,03      | 1,6       |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 438       | 35        | 0         | 17        | 8356      | 89        | 172       | 38        |
| <b>2</b>                           | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,09      | 0,03      | 0         | 0         | 1,51      | 0,11      | 0,01      | 0         |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,03      | 0         | 0         | 0         | 0,42      | 0,02      | 0,04      | 0         |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 1145      | 96        | 3,4       | 30        | 13754     | 166       | 829       | 89        |
| <b>5</b>                           | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,13      | 0,01      | 0         | 0         | 0,82      | 0,03      | 0,01      | 0,06      |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,11      | 0         | 0         | 0         | 0,61      | 0,02      | 0,01      | 0,08      |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 668       | 42        | 1,8       | 28        | 11449     | 147       | 193       | 80        |

Af: afluente; Ef: efluente.

**Quadro A2– Concentração de metais nas amostras do ensaio 2: reator de lodos ativados em escala de bancada alimentado com lixiviado pré-tratado e esgoto sanitário em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

| <i>Prop.</i><br>(%) | <i>Metals</i>                       | <i>Zn</i> | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Ni</i> | <i>Fe</i> | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | <i>Cr</i> |
|---------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                     | <i>Amostras</i>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                     | <b>Inóculo (mg kg<sup>-1</sup>)</b> | 220       | 19        | 3         | 16        | 3717      | 38        | 108       | 40        |
| <b>0,2</b>          | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,09      | 0,01      | 0         | 0,2       | 1,8       | 0,06      | 0,02      | 0,4       |
|                     | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,11      | 0,01      | 0         | 1,2       | 8,8       | 0,24      | 0,05      | 2,4       |
|                     | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 458       | 38        | 0,6       | 23        | 9756      | 110       | 184       | 45        |
| <b>2</b>            | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,08      | 0         | 0         | 0         | 0,75      | 0,02      | 0,03      | 0,02      |
|                     | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,01      | 0,01      | 0         | 0,01      | 0,74      | 0,02      | 0,02      | 0,2       |
|                     | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 178       | 12        | 1         | 7         | 2243      | 26        | 62        | 19        |
| <b>5</b>            | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,11      | 0,02      | 0         | 0,4       | 0,8       | 0,13      | 0,10      | 0,6       |
|                     | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,06      | 0,01      | 0         | 0,2       | 1,3       | 0,05      | 0,02      | 0,4       |
|                     | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 230       | 16        | 0         | 6         | 2908      | 48        | 132       | 20        |

Af: afluente; Ef: efluente.

**Quadro A3 – Concentração de metais nas amostras do ensaio 3: reator de lodos ativados em escala de bancada alimentado com lixiviado bruto e efluente anaeróbio em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

| <i>Proporções volumétricas (%)</i> | <i>Amostras</i>                     | <i>Metais</i> |           |           |           |           |           |           |           |
|------------------------------------|-------------------------------------|---------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                    |                                     | <i>Zn</i>     | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Ni</i> | <i>Fe</i> | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | <i>Cr</i> |
| <b>0</b>                           | <b>Inóculo (mg kg<sup>-1</sup>)</b> | 444           | 41        | 4         | 30        | 10447     | 26        | 144       | 63        |
|                                    | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,10          | 0         | 0,02      | 0,07      | 2,70      | 0,04      | 0,00      | 0,05      |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0             | 0,01      | 0,02      | 0,06      | 0,79      | 0,01      | 0,02      | 0         |
| <b>0,2</b>                         | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 682           | 64        | 6         | 7         | 16743     | 77        | 236       | 108       |
|                                    | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0             | 0,05      | 0,02      | 0,05      | 1,65      | 0,03      | 0         | 0,02      |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0             | 0,06      | 0,01      | 0,04      | 0         | 0,02      | 0         | 0         |
| <b>2</b>                           | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 635           | 57        | 5         | 37        | 14534     | 149       | 108       | 106       |
|                                    | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0             | 0         | 0,02      | 0,06      | 0,86      | 0,02      | 0         | 0,002     |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,1           | 0,01      | 0,01      | 0,04      | 0,26      | 0,04      | 0,01      | 0         |
| <b>5</b>                           | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 827           | 63        | 4         | 29        | 10259     | 79        | 437       | 111       |
|                                    | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0             | 0         | 0,02      | 0,06      | 0,33      | 0,03      | 0         | 0         |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,12          | 0,05      | 0,03      | 0,10      | 1,26      | 0,02      | 0         | 0,1       |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 421           | 435       | 3         | 34        | 11101     | 76        | 184       | 96        |

Af: afluyente; Ef: efluente.

**Quadro A4 – Concentração de metais nas amostras do ensaio 4: reator de lodos ativados em escala de bancada alimentado com lixiviado pré-tratado e efluente anaeróbio em proporções volumétricas de 0 a 5 %.**

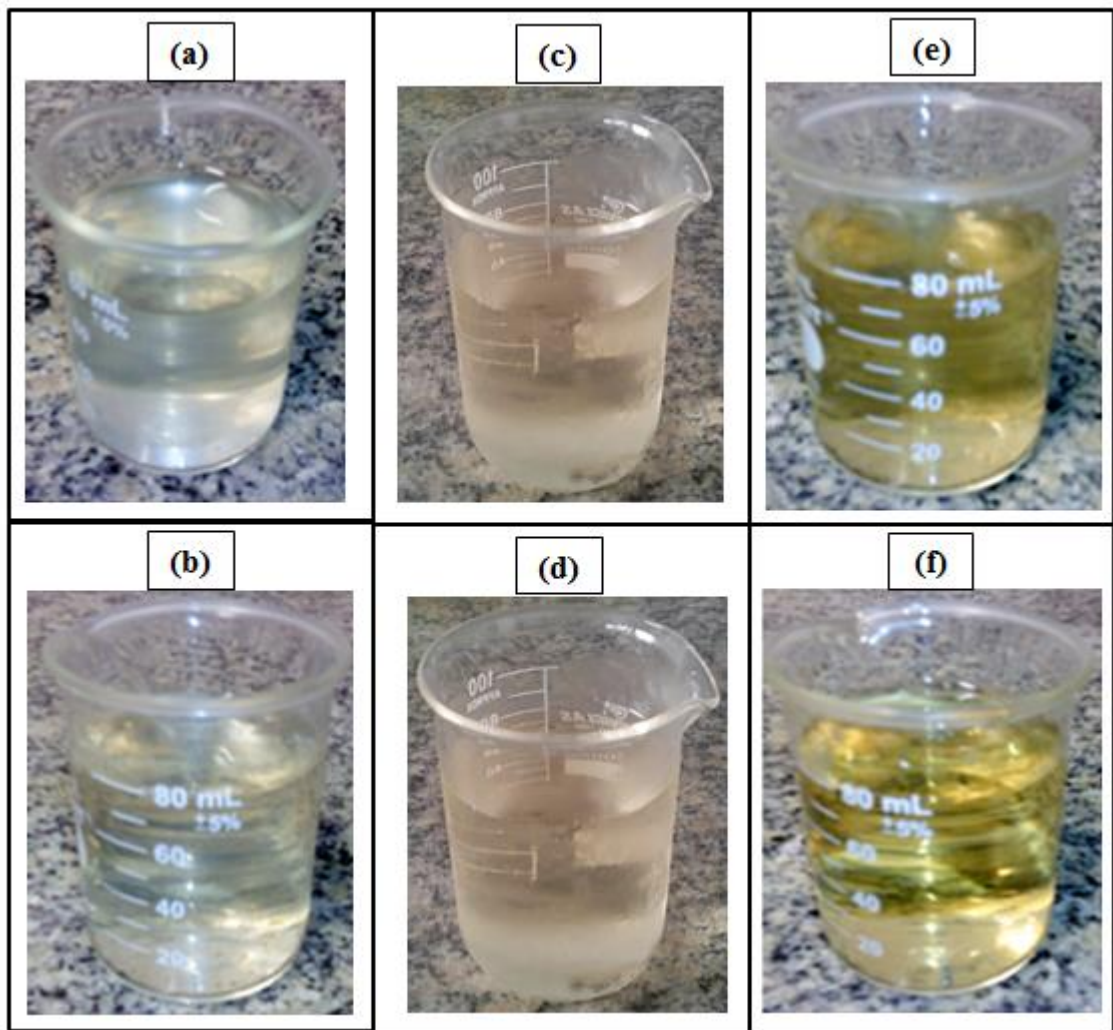
| <i>Proporções volumétricas (%)</i> | <i>Metals</i>                       | <i>Zn</i> | <i>Pb</i> | <i>Cd</i> | <i>Ni</i> | <i>Fe</i> | <i>Mn</i> | <i>Cu</i> | <i>Cr</i> |
|------------------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|-----------|
|                                    | <i>Amostras</i>                     |           |           |           |           |           |           |           |           |
|                                    | <b>Inóculo (mg kg<sup>-1</sup>)</b> | 444       | 41        | 4         | 30        | 10447     | 26        | 144       | 63        |
| <b>0,2</b>                         | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0         | 0,06      | 0,02      | 0,08      | 1,2       | 0,02      | 0,01      | 0,05      |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,002     | 0         | 0,02      | 0,07      | 0,6       | 0,03      | 0,00      | 0,01      |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 1010      | 65        | 13        | 41        | 14136     | 149       | 289       | 112       |
| <b>2</b>                           | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0         | 0         | 0,02      | 0,06      | 1         | 0,02      | 0         | 0,002     |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0,032     | 0,02      | 0,04      | 0,07      | 2         | 0,03      | 0,03      | 0,04      |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 920       | 58        | 4         | 29        | 10259     | 79        | 437       | 111       |
| <b>5</b>                           | <b>Af (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0         | 0         | 0,02      | 0,06      | 0,3       | 0,03      | 0         | 0         |
|                                    | <b>Ef (mg L<sup>-1</sup>)</b>       | 0         | 0         | 0,02      | 0,06      | 1,2       | 0,03      | 0         | 0,03      |
|                                    | <b>Lodo (mg kg<sup>-1</sup>)</b>    | 914       | 67        | 5         | 46        | 13007     | 145       | 376       | 118       |

Af: afluyente; Ef: efluente.

## **ANEXO B**

**Dados obtidos com os reatores de lodos ativados em escala piloto no tratamento do esgoto sanitário e mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 e 5 %**





**Figura B1** – Aspecto visual das amostras de: (a) afluyente e (b) efluente do reator LAC; (c) afluyente e (d) efluente do reator LA-2 %; e (e) afluyente e (f) efluente do reator LA-5 %.

**Tabela B1 - Concentração dos sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV) no reator de lodos ativados em escala piloto alimentado continuamente com esgoto sanitário.**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>ST</i>                         |                                   | <i>STF</i>                        |                                   | <i>STV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 2                       | 294                               | 274                               | 128                               | 114                               | 166                               | 160                               |
| 4                       | 462                               | 168                               | 302                               | 132                               | 160                               | 36                                |
| 9                       | 382                               | 300                               | 134                               | 96                                | 248                               | 204                               |
| 25                      | 534                               | 224                               | 166                               | 142                               | 368                               | 82                                |
| 32                      | 562                               | 358                               | 362                               | 180                               | 200                               | 178                               |
| 46                      | 476                               | 412                               | 160                               | 120                               | 316                               | 292                               |
| 54                      | 538                               | 274                               | 208                               | 132                               | 330                               | 142                               |
| 63                      | 538                               | 274                               | 208                               | 132                               | 330                               | 142                               |
| 82                      | 538                               | 274                               | 200                               | 110                               | 338                               | 164                               |
| 88                      | 403                               | 161                               | 220                               | 88                                | 183                               | 73                                |
| 95                      | 550                               | 327                               | 153                               | 53                                | 397                               | 273                               |
| 109                     | 322                               | 186                               | 190                               | 66                                | 132                               | 120                               |
| 123                     | 354                               | 275                               | 112                               | 80                                | 242                               | 195                               |
| 130                     | 350                               | 220                               | 164                               | 100                               | 186                               | 120                               |
| 137                     | 300                               | 50                                | 38                                | 14                                | 262                               | 36                                |
| 144                     | 380                               | 197                               | 250                               | 150                               | 130                               | 47                                |
| 151                     | 240                               | 105                               | 100                               | 75                                | 140                               | 30                                |
| 158                     | 448                               | 292                               | 300                               | 210                               | 148                               | 82                                |
| 165                     | 456                               | 340                               | 312                               | 284                               | 144                               | 56                                |
| 172                     | 400                               | 300                               | 76                                | 22                                | 324                               | 278                               |
| 179                     | 438                               | 196                               | 210                               | 144                               | 228                               | 52                                |
| 186                     | 432                               | 298                               | 198                               | 160                               | 234                               | 138                               |
| 193                     | 462                               | 300                               | 192                               | 140                               | 270                               | 160                               |
| 200                     | 348                               | 152                               | 174                               | 152                               | 174                               | 0                                 |
| 207                     | 400                               | 289                               | 140                               | 139                               | 260                               | 150                               |
| 214                     | 430                               | 190                               | 198                               | 60                                | 232                               | 130                               |
| 221                     | 428                               | 290                               | 128                               | 30                                | 300                               | 260                               |
| 228                     | 458                               | 288                               | 315                               | 244                               | 143                               | 44                                |
| 235                     | 344                               | 160                               | 214                               | 120                               | 130                               | 40                                |
| 242                     | 400                               | 211                               | 200                               | 109                               | 200                               | 102                               |

**Tabela B2 - Concentração dos sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV) no reator de lodos ativados em escala piloto alimentado continuamente com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (até 150 dias) e 5 % (de 158 a 240 dias).**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>ST</i>                         |                                   | <i>STF</i>                        |                                   | <i>STV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 2                       | 678                               | 432                               | 478                               | 364                               | 200                               | 68                                |
| 4                       | 884                               | 660                               | 506                               | 400                               | 378                               | 260                               |
| 9                       | 930                               | 700                               | 430                               | 380                               | 500                               | 320                               |
| 25                      | 714                               | 320                               | 408                               | 202                               | 306                               | 118                               |
| 32                      | 640                               | 362                               | 420                               | 180                               | 220                               | 182                               |
| 52                      | 558                               | 420                               | 284                               | 202                               | 274                               | 218                               |
| 79                      | 474                               | 274                               | 134                               | 74                                | 340                               | 200                               |
| 93                      | 500                               | 280                               | 200                               | 66                                | 300                               | 214                               |
| 107                     | 587                               | 225                               | 220                               | 80                                | 367                               | 145                               |
| 114                     | 530                               | 199                               | 280                               | 44                                | 250                               | 155                               |
| 121                     | 656                               | 316                               | 278                               | 96                                | 378                               | 220                               |
| 128                     | 858                               | 577                               | 448                               | 373                               | 410                               | 205                               |
| 135                     | 906                               | 512                               | 576                               | 380                               | 330                               | 132                               |
| 142                     | 820                               | 440                               | 600                               | 380                               | 220                               | 60                                |
| 150                     | 968                               | 630                               | 790                               | 600                               | 178                               | 30                                |
| 164                     | 1226                              | 786                               | 680                               | 634                               | 546                               | 152                               |
| 171                     | 1084                              | 400                               | 520                               | 300                               | 564                               | 100                               |
| 178                     | 1070                              | 678                               | 678                               | 611                               | 392                               | 67                                |
| 185                     | 1030                              | 600                               | 700                               | 550                               | 330                               | 50                                |
| 192                     | 830                               | 610                               | 328                               | 280                               | 502                               | 330                               |
| 199                     | 720                               | 394                               | 368                               | 198                               | 352                               | 196                               |
| 206                     | 540                               | 320                               | 390                               | 200                               | 150                               | 120                               |
| 213                     | 700                               | 430                               | 400                               | 300                               | 300                               | 130                               |
| 220                     | 644                               | 390                               | 370                               | 310                               | 274                               | 80                                |
| 227                     | 800                               | 450                               | 550                               | 390                               | 250                               | 60                                |
| 234                     | 550                               | 310                               | 320                               | 256                               | 230                               | 54                                |
| 241                     | 580                               | 300                               | 414                               | 210                               | 166                               | 90                                |

Af: afluente; Ef.: efluente.

**Tabela B3 - Concentração dos sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF) e sólidos suspensos voláteis (SSV) no reator de lodos ativados em escala piloto alimentado continuamente com esgoto sanitário.**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>SST</i>                        |                                   | <i>SSF</i>                        |                                   | <i>SSV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 2                       | 53                                | 34                                | 13                                | 7                                 | 40                                | 27                                |
| 4                       | 168                               | 41                                | 17                                | 14                                | 150                               | 26                                |
| 9                       | 55                                | 6                                 | 25                                | 2                                 | 30                                | 4                                 |
| 25                      | 135                               | 15                                | 29                                | 8                                 | 105                               | 7                                 |
| 32                      | 328                               | 53                                | 132                               | 35                                | 196                               | 18                                |
| 46                      | 6                                 | 1                                 | 0                                 | 0                                 | 6                                 | 1                                 |
| 54                      | 35                                | 26                                | 0                                 | 0                                 | 35                                | 26                                |
| 82                      | 80                                | 54                                | 21                                | 13                                | 59                                | 41                                |
| 88                      | 77                                | 33                                | 35                                | 18                                | 42                                | 15                                |
| 95                      | 91                                | 51                                | 33                                | 13                                | 58                                | 38                                |
| 109                     | 103                               | 27                                | 15                                | 1                                 | 88                                | 26                                |
| 116                     | 58                                | 30                                | 16                                | 2                                 | 42                                | 28                                |
| 123                     | 92                                | 17                                | 7                                 | 0                                 | 85                                | 17                                |
| 130                     | 50                                | 12                                | 14                                | 3                                 | 36                                | 9                                 |
| 137                     | 160                               | 32                                | 35                                | 7                                 | 125                               | 25                                |
| 144                     | 80                                | 11                                | 25                                | 8                                 | 55                                | 3                                 |
| 151                     | 100                               | 11                                | 30                                | 9                                 | 70                                | 2                                 |
| 158                     | 150                               | 67                                | 100                               | 55                                | 50                                | 12                                |
| 165                     | 150                               | 67                                | 100                               | 55                                | 70                                | 15                                |
| 172                     | 88                                | 23                                | 18                                | 8                                 | 132                               | 55                                |
| 179                     | 134                               | 55                                | 2                                 | 0                                 | 71                                | 19                                |
| 186                     | 76                                | 19                                | 4                                 | 0                                 | 104                               | 52                                |
| 193                     | 117                               | 56                                | 13                                | 4                                 | 90                                | 47                                |
| 200                     | 100                               | 50                                | 10                                | 3                                 | 74                                | 19                                |
| 207                     | 84                                | 22                                | 10                                | 3                                 | 71                                | 16                                |
| 214                     | 80                                | 19                                | 9                                 | 3                                 | 92                                | 42                                |
| 221                     | 100                               | 42                                | 8                                 | 0                                 | 127                               | 53                                |
| 228                     | 140                               | 57                                | 13                                | 4                                 | 72                                | 15                                |
| 235                     | 80                                | 17                                | 8                                 | 2                                 | 79                                | 20                                |
| 242                     | 90                                | 24                                | 11                                | 4                                 | 86                                | 24                                |

**Tabela B4 - Concentração dos sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF) e sólidos suspensos voláteis (SSV) no reator de lodos ativados em escala piloto alimentado continuamente com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (até 150 dias) e 5 % (de 158 a 240 dias).**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>SST</i>                        |                                   | <i>SSF</i>                        |                                   | <i>SSV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 2                       | 60                                | 25                                | 26                                | 7                                 | 34                                | 18                                |
| 4                       | 55                                | 19                                | 19                                | 1                                 | 36                                | 18                                |
| 9                       | 100                               | 54                                | 12                                | 6                                 | 88                                | 48                                |
| 25                      | 22                                | 10                                | 12                                | 3                                 | 10                                | 7                                 |
| 32                      | 34                                | 18                                | 9                                 | 4                                 | 25                                | 14                                |
| 52                      | 33                                | 19                                | 5                                 | 4                                 | 28                                | 15                                |
| 79                      | 67                                | 52                                | 37                                | 27                                | 30                                | 25                                |
| 93                      | 55                                | 22                                | 20                                | 11                                | 35                                | 11                                |
| 107                     | 61                                | 17                                | 5                                 | 0                                 | 56                                | 17                                |
| 114                     | 69                                | 37                                | 10                                | 1                                 | 59                                | 37                                |
| 121                     | 64                                | 24                                | 24                                | 12                                | 40                                | 12                                |
| 128                     | 50                                | 18                                | 20                                | 10                                | 30                                | 8                                 |
| 135                     | 23                                | 10                                | 10                                | 4                                 | 13                                | 6                                 |
| 142                     | 60                                | 20                                | 24                                | 14                                | 36                                | 6                                 |
| 150                     | 104                               | 36                                | 33                                | 11                                | 71                                | 25                                |
| 157                     | 59                                | 19                                | 12                                | 1                                 | 47                                | 18                                |
| 164                     | 100                               | 15                                | 21                                | 0                                 | 79                                | 15                                |
| 171                     | 43                                | 21                                | 15                                | 0                                 | 28                                | 21                                |
| 178                     | 72                                | 6                                 | 19                                | 0                                 | 53                                | 6                                 |
| 185                     | 81                                | 29                                | 54                                | 4                                 | 27                                | 26                                |
| 192                     | 90                                | 40                                | 20                                | 14                                | 70                                | 26                                |
| 199                     | 80                                | 33                                | 15                                | 7                                 | 65                                | 26                                |
| 206                     | 90                                | 42                                | 20                                | 12                                | 70                                | 30                                |
| 213                     | 100                               | 60                                | 24                                | 15                                | 76                                | 45                                |
| 220                     | 77                                | 29                                | 12                                | 6                                 | 65                                | 23                                |
| 227                     | 120                               | 77                                | 21                                | 9                                 | 99                                | 68                                |
| 234                     | 84                                | 40                                | 17                                | 9                                 | 67                                | 31                                |
| 241                     | 79                                | 39                                | 33                                | 15                                | 46                                | 24                                |

Af: afluente; Ef.: efluente.

**Tabela B5 - Concentração de nitrogênio orgânico (N-org), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e alcalinidade no reator de lodos ativados em escala piloto alimentado continuamente com esgoto sanitário.**

| <i>t</i><br>(d) | <i>N-org</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           | $\text{NO}_2^-$<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           | $\text{NO}_3^-$<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           | <i>Alcalinidade</i><br>( $\text{mgCaCO}_3 \text{ L}^{-1}$ ) |           |
|-----------------|--|-----------|---|-----------|---|-----------|---|-----------|
|                 | <i>Af</i>                              | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                 | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                 | <i>Ef</i> | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> |
| 2               | 5                                      | 3         | 0,1                                       | 0,2       | 0,5                                       | 25        | 140   | 55        |
| 4               | 9                                      | 10        | 0,0                                       | 1         | 0   | 20        | 158   | 77        |
| 9               | 16                                     | 0         | 0,0                                       | 1         | 0   | 8         | 96  | 38        |
| 25              | 29                                     | 21        | 0,0                                       | 3         | 0,6                                       | 24        | 76  | 11        |
| 32              | 12                                     | 4         | 0,1                                       | 0,3       | 1   | 26        | 288   | 11        |
| 46              | 0                                      | 1         | 0,0                                       | 0,5       | 0,2                                       | 18        | 120   | 10        |
| 54              | 5                                      | 0         | 0,1                                       | 0,7       | 0   | 11        | 144   | 49        |
| 63              | 5                                      | 0         | 0,05                                      | 0,6       | 0   | 11        | 140   | 33        |
| 69              | 10                                     | 3         | 0,05                                      | 1,0       | 0   | 28        | 150   | 38        |
| 83              | 14                                     | 7         | 0,05                                      | 0,6       | 1   | 25        | 168   | 10        |
| 88              | 6                                      | 1         | 0,04                                      | 0,8       | 1   | 33        | 165   | 10        |
| 95              | 16                                     | 4         | 0,01                                      | 0,2       | 0,4                                       | 15        | 180   | 50        |
| 102             | 12                                     | 2         | 0,01                                      | 0,4       | 0,2                                       | 15        | 200   | 96        |
| 109             | 17                                     | 1         | 0,02                                      | 0,2       | 1   | 9         | 192   | 29        |
| 116             | 6                                      | 2         | 0,06                                      | 1,4       | 0,3                                       | 14        | 150   | 35        |
| 123             | 9                                      | 5         | 0,11                                      | 5,6       | 0,4                                       | 14        | 138   | 15        |
| 130             | 3                                      | 2         | 0,11                                      | 1,4       | 0,7                                       | 14        | 218   | 81        |
| 137             | 7                                      | 1         | 0,16                                      | 0,5       | 0,5                                       | 16        | 190   | 40        |
| 144             | 10                                     | 0         | 0,05                                      | 1,2       | 0,3                                       | 16        | 188   | 60        |
| 151             | 12                                     | 1         | 0,19                                      | 2,3       | 0,4                                       | 12        | 125   | 38        |
| 158             | 9                                      | 2         | 0,04                                      | 0,3       | 0,2                                       | 20        | 125   | 30        |
| 165             | 12                                     | 0,92      | 0,17                                      | 0,5       | 0,5                                       | 6         | 124,8   | 38        |
| 172             | 1,2                                    | 0,28      | 0,10                                      | 0,3       | 1,0                                       | 3         | 124,8   | 30        |
| 179             | 3                                      | 1,09      | 0,14                                      | 0,3       | 0,3                                       | 23        | 88,15   | 48        |
| 193             | 17                                     | 9,63      | 1,42                                      | 3,0       | 0,0                                       | 13        | 100   | 22        |
| 200             | 8,4                                    | 7,06      | 0,05                                      | 1,0       | 0,0                                       | 21        | 166   | 32        |
| 242             | 8,7                                    | 4,52      | 1,08                                      | 2,0       | 0,1                                       | 9         | 190   | 23        |

Af: afluente; Ef.: efluente; t: tempo; d: dias

**Tabela B6 - Concentração de nitrogênio-orgânico (N-org), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e alcalinidade no reator de lodos ativados em escala piloto alimentado continuamente com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (até 150 dias) e 5 % (de 158 a 240 dias).**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>N-org<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>NO<sub>2</sub><sup>-</sup><br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>NO<sub>3</sub><sup>-</sup><br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |           | <i>Alcalinidade<br/>(mgCaCO<sub>3</sub> L<sup>-1</sup>)</i> |           |
|-------------------------|--------------------------------------|-----------|---|-----------|---|-----------|---|-----------|
|                         | <i>Af</i>                            | <i>Ef</i> | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> | <i>Af</i>   | <i>Ef</i> |
| 2                       | 6                                    | 2         | 0   | 0,4       | 3   | 23        | 158   | 77        |
| 16                      | 14                                   | 13        | 0,2   | 0,6       | 8   | 26        | 264   | 61        |
| 23                      | 14                                   | 11        | 0,0   | 0,7       | 5   | 31        | 257   | 63        |
| 30                      | 13                                   | 13        | 0,1   | 1,4       | 2   | 16        | 219   | 57        |
| 36                      | 13                                   | 4         | 0,0   | 0,4       | 5   | 23        | 288   | 63        |
| 44                      | 2                                    | 5         | 0,0   | 1,7       | 7   | 29        | 240   | 51        |
| 52                      | 6                                    | 4         | 0,0   | 1,6       | 8   | 14        | 168   | 89        |
| 58                      | 15                                   | 8         | 0,1   | 2,1       | 1   | 13        | 200   | 75        |
| 65                      | 15                                   | 8         | 0,0   | 0,1       | 1   | 13        | 180   | 65        |
| 79                      | 14                                   | 7         | 0,1   | 0,3       | 3   | 9         | 200   | 75        |
| 93                      | 20                                   | 17        | 0,1   | 0,7       | 1   | 10        | 300   | 36        |
| 107                     | 6                                    | 5         | 0,0   | 1,9       | 4   | 17        | 240   | 72        |
| 114                     | 12                                   | 7         | 0,1   | 3,1       | 4   | 16        | 200   | 90        |
| 128                     | 12                                   | 10        | 0,1   | 0,9       | 12  | 23        | 288   | 121       |
| 135                     | 14                                   | 2         | 0,0   | 1,3       | 4   | 15        | 330   | 142       |
| 142                     | 12                                   | 2         | 0,1   | 0,2       | 3   | 15        | 300   | 96        |
| 150                     | 8                                    | 3         | 0,0   | 0,0       | 3   | 25        | 545   | 22        |
| 157                     | 18                                   | 4         | 0,3   | 1,2       | 0,0   | 6         | 925   | 264       |
| 164                     | 6                                    | 5         | 0,0   | 0,5       | 0,0   | 5         | 385   | 264       |
| 171                     | 11                                   | 5         | 0,0   | 0,8       | 0,0   | 6         | 323   | 250       |
| 178                     | 28                                   | 6         | 0,1   | 0,6       | 0,0   | 7         | 376   | 368       |
| 185                     | 18                                   | 14        | 0,0   | 0,8       | 0,2   | 3         | 376   | 300       |
| 192                     | 9                                    | 2,2       | 0,0   | 0,5       | 0,3   | 4         | 215   | 129       |
| 199                     | 15                                   | 1,2       | 0,1   | 0,5       | 0,0   | 1         | 200   | 140       |
| 206                     | 13                                   | 2,6       | 1,7   | 0,4       | 0,1   | 5         | 330   | 220       |
| 213                     | 22                                   | 8         | 0,3   | 0,7       | 0,0   | 13        | 300   | 190       |
| 220                     | 9                                    | 5         | 0,1   | 0,2       | 0,0   | 12        | 288   | 200       |
| 227                     | 26                                   | 11        | 0,1   | 0,2       | 0,0   | 4         | 315   | 100       |
| 240                     | 6                                    | 3         | 1,7   | 0,3       | 0,0   | 10        | 220   | 77        |

Af: afluente; Ef.: efluente.

**Tabela B7 - Medidas de pH, oxigênio dissolvido (OD) e temperatura, no tanque de aeração dos reatores de lodos ativados em escala piloto, alimentados continuamente com esgoto sanitário e com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (até 150 dias) e 5 % (de 158 a 240 dias).**

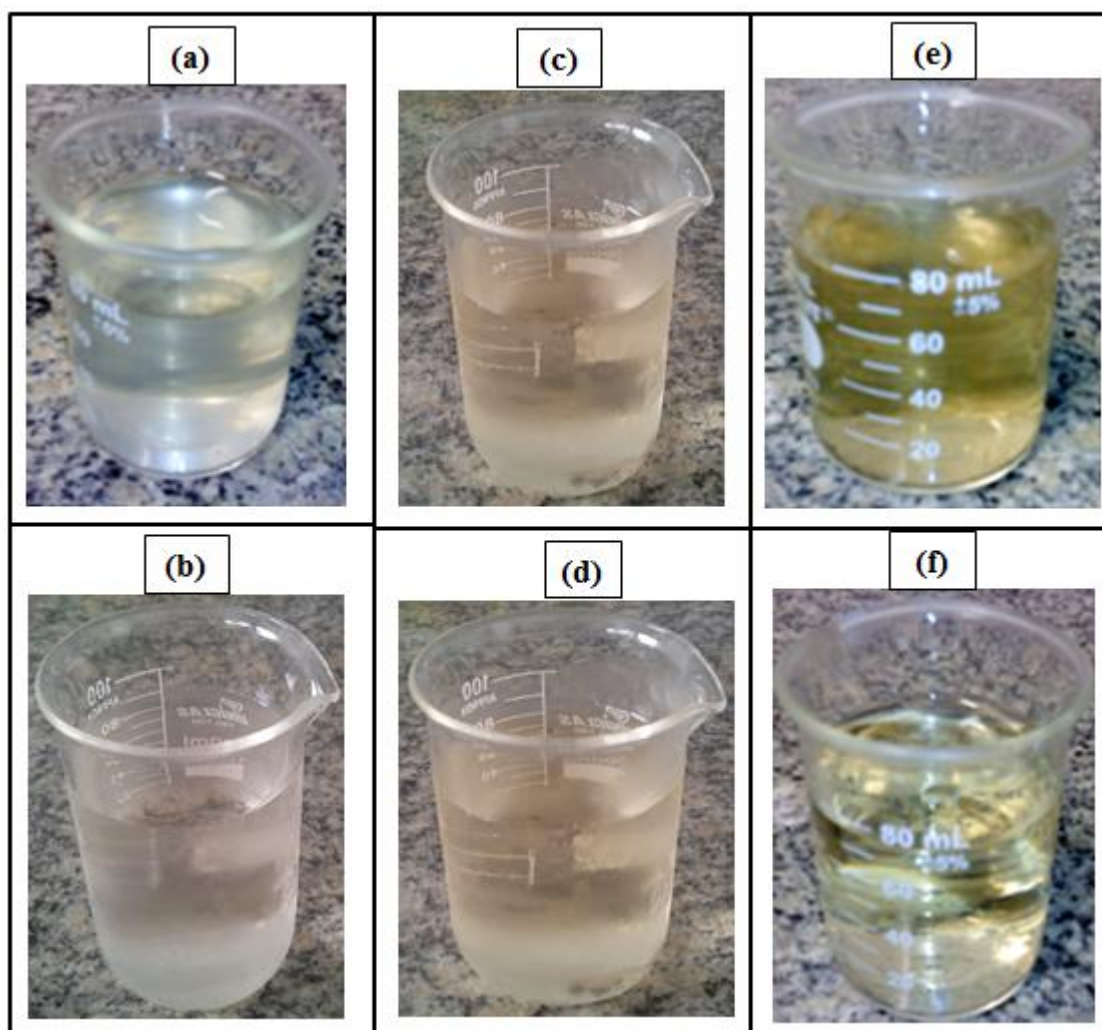
| <i>Reator Controle</i> |           |                               |                  | <i>Mistura LIX/ES</i> |           |                               |                  |
|------------------------|-----------|-------------------------------|------------------|-----------------------|-----------|-------------------------------|------------------|
| <i>Tempo (dias)</i>    | <i>pH</i> | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> | <i>Tempo (dias)</i>   | <i>pH</i> | <i>OD (mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Temp (°C)</i> |
| 2                      | 6,5       | 12                            | 22               | 2                     | 7,1       | 10                            | 19               |
| 4                      | 6,5       | 10                            | 22               | 16                    | 7,1       | 10                            | 20               |
| 9                      | 7         | 9                             | 22               | 23                    | 6,4       | 9,5                           | 22               |
| 25                     | 7         | 12                            | 23               | 30                    | 7,0       | 11                            | 23               |
| 32                     | 7         | 14                            | 22               | 36                    | 7,1       | 12                            | 22               |
| 46                     | 6,7       | 11                            | 22               | 44                    | 7,5       | 10                            | 22               |
| 54                     | 6,5       | 9,5                           | 21               | 58                    | 7,1       | 13                            | 22               |
| 63                     | 7,0       | 10                            | 19               | 79                    | 7,7       | 4                             | 17               |
| 82                     | 6,8       | 10,5                          | 19               | 93                    | 7,5       | 4                             | 16               |
| 88                     | 7,5       | 9,4                           | 18               | 107                   | 7,5       | 3                             | 16               |
| 95                     | 7,0       | 9                             | 18               | 114                   | 7,7       | 5                             | 14               |
| 102                    | 7,5       | 11                            | 18               | 121                   | 7,1       | 4                             | 13               |
| 109                    | 7,7       | 2,3                           | 16               | 128                   | 7,6       | 4                             | 15               |
| 126                    | 7,8       | 4,9                           | 14               | 135                   | 7,7       | 8                             | 12               |
| 143                    | 8,0       | 4,7                           | 12               | 142                   | 7,8       | 13                            | 10               |
| 150                    | 7,3       | 3,6                           | 15               | 150                   | 7,8       | 10                            | 18               |
| 158                    | 7,3       | 9                             | 12               | 157                   | 7,70      | 16                            | 5,5              |
| 176                    | 7         | 18                            | 8                | 164                   | 7,80      | 17                            | 5,0              |
| 190                    | 7,4       | 16                            | 9                | 171                   | 8,00      | 16                            | 4,0              |
| 196                    | 7,5       | 17                            | 9                | 178                   | 7,70      | 18                            | 7,0              |
| 200                    | 7         | 15                            | 7,7              | 220                   | 7,50      | 16                            | 6,5              |
| 215                    | 7,3       | 15                            | 8                | 227                   | 7,70      | 17                            | 9,0              |
| 230                    | 7         | 16                            | 8                | 234                   | 8,00      | 17                            | 6,0              |
| 240                    | 7         | 17                            | 9                | 241                   | 8,00      | 16                            | 6,0              |

Temp.: temperatura.



## **ANEXO C**

**Dados obtidos com os biofiltros aerados submersos em  
escala piloto no tratamento do esgoto sanitário e mistura  
lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 e 5 %**



**Figura C1** – Aspecto visual das amostras de: (a) afluyente e (b) efluente do reator BAS-0 %; (c) afluyente e (d) efluente do reator BAS-2 %; e (e) afluyente e (f) efluente do reator BAS-5 %.

**Tabela C1 - Concentração dos sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV) no BAS em escala piloto alimentado esgoto sanitário.**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>ST</i>                         |                                   | <i>STF</i>                        |                                   | <i>STV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 2                       | 403                               | 196                               | 190                               | 90                                | 213                               | 106                               |
| 9                       | 322                               | 272                               | 122                               | 80                                | 200                               | 192                               |
| 16                      | 352                               | 314                               | 112                               | 98                                | 240                               | 216                               |
| 23                      | 354                               | 170                               | 164                               | 110                               | 190                               | 60                                |
| 30                      | 300                               | 200                               | 38                                | 18                                | 262                               | 182                               |
| 37                      | 380                               | 150                               | 250                               | 120                               | 130                               | 30                                |
| 44                      | 240                               | 90                                | 100                               | 55                                | 140                               | 35                                |
| 51                      | 448                               | 220                               | 300                               | 163                               | 148                               | 57                                |
| 58                      | 240                               | 90                                | 300                               | 234                               | 144                               | 24                                |
| 65                      | 444                               | 258                               | 76                                | 74                                | 324                               | 118                               |
| 72                      | 400                               | 192                               | 108                               | 66                                | 292                               | 126                               |
| 79                      | 550                               | 470                               | 210                               | 204                               | 340                               | 266                               |
| 86                      | 438                               | 308                               | 215                               | 176                               | 223                               | 132                               |
| 100                     | 604                               | 250                               | 150                               | 55                                | 454                               | 195                               |

Af: afluente; Ef.: efluente.

**Tabela C2 - Concentração dos sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF) e sólidos suspensos voláteis (SSV) no BAS em escala piloto alimentado continuamente esgoto sanitário.**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>SST</i>                        |                                   | <i>SSF</i>                        |                                   | <i>SSV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 2                       | 66                                | 30                                | 15                                | 0                                 | 51                                | 30                                |
| 9                       | 103                               | 25                                | 15                                | 0                                 | 88                                | 25                                |
| 16                      | 58                                | 27                                | 16                                | 9                                 | 42                                | 18                                |
| 23                      | 92                                | 41                                | 7                                 | 0                                 | 85                                | 41                                |
| 30                      | 160                               | 12                                | 35                                | 0                                 | 125                               | 12                                |
| 37                      | 80                                | 5                                 | 25                                | 1                                 | 55                                | 4                                 |
| 44                      | 100                               | 15                                | 30                                | 8                                 | 70                                | 7                                 |
| 51                      | 150                               | 10                                | 100                               | 6                                 | 50                                | 4                                 |
| 58                      | 120                               | 2                                 | 18                                | 0                                 | 102                               | 2                                 |
| 65                      | 134                               | 11                                | 2                                 | 0                                 | 132                               | 11                                |
| 72                      | 103                               | 9                                 | 9                                 | 2                                 | 93                                | 7                                 |
| 79                      | 76                                | 3                                 | 4                                 | 1                                 | 71                                | 2                                 |
| 86                      | 130                               | 16                                | 10                                | 6                                 | 120                               | 11                                |
| 100                     | 80                                | 8                                 | 66                                | 5                                 | 14                                | 3                                 |

Af: afluente; Ef.: efluente.

**Tabela C3 - Concentração de NTK, NAT, N-orgânico, nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e alcalinidade no BAS em escala piloto alimentado continuamente com esgoto sanitário.**

| <i>t</i><br>(d) | <i>N-org</i> |           | $\text{NO}_2^-$<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           | $\text{NO}_3^-$<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           | <i>Alcalinidade</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           |
|-----------------|--------------|-----------|---|-----------|---|-----------|---|-----------|
|                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                 | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                 | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                     | <i>Ef</i> |
| 2               | 17,5         | 0,0       | 0,0                                       | 0,0       | 1   | 31        | 192   | 10        |
| 9               | 5,8          | 4,0       | 0,1                                       | 0,2       | 0,3                                       | 30        | 150   | 8         |
| 16              | 9,0          | 2,0       | 0,1                                       | 0,2       | 0,4                                       | 23        | 138   | 10        |
| 23              | 4,4          | 0,0       | 0,1                                       | 0,2       | 0,7                                       | 24        | 218   | 7         |
| 30              | 7,0          | 2,0       | 0,2                                       | 0,5       | 0,5                                       | 23        | 190   | 30        |
| 37              | 9,8          | 2,4       | 0,1                                       | 0,2       | 0,3                                       | 22        | 100,8   | 6         |
| 44              | 11,9         | 2,6       | 0,2                                       | 0,2       | 0,4                                       | 21        | 124,8   | 5         |
| 51              | 9,1          | 3,0       | 0,0                                       | 0,1       | 0,2                                       | 38        | 120   | 5         |
| 58              | 2,4          | 2,0       | 0,2                                       | 0,0       | 0,9                                       | 19        | 88,15   | 22        |
| 72              | 4,8          | 3,8       | 0,1                                       | 0,8       | 0,6                                       | 25        | 249   | 20        |
| 79              | 3,0          | 0,6       | 0,1                                       | 0,2       | 0,9                                       | 27        | 201   | 14        |
| 86              | 10,5         | 5,0       | 0,1                                       | 0,1       | 0,7                                       | 25        | 178   | 69        |
| 100             | 16,8         | 9,0       | 1,4                                       | 0,2       | 0,7                                       | 31        | 172   | 64        |

Af: afluente; Ef.: efluente; t: tempo; d: dias.

**Tabela C4 - Concentração de NTK, NAT, N-orgânico, nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) e alcalinidade no BAS em escala piloto alimentado continuamente com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2% (até 100 dias) e 5 % (de 110 a 150 dias).**

| <i>t</i><br>(d) | <i>N-org</i> |           | $\text{NO}_2^-$<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           | $\text{NO}_3^-$<br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           | <i>Alcalinidade</i><br>( $\text{mg L}^{-1}$ ) |           |
|-----------------|--------------|-----------|---|-----------|---|-----------|---|-----------|
|                 | <i>Af</i>    | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                 | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                 | <i>Ef</i> | <i>Af</i>                                     | <i>Ef</i> |
| 1               | 9,77         | 3,36      | 0,01                                      | 0,03      | 0,3                                       | 30        | 206   | 5         |
| 8               | 6,41         | 5,47      | 0,01                                      | 0,02      | 0,2                                       | 30        | 271   | 23        |
| 15              | 10,07        | 7,02      | 0,01                                      | 0,07      | 0,4                                       | 31        | 274   | 9         |
| 22              | 16,79        | 4,27      | 0,07                                      | 0,29      | 2,9                                       | 30        | 287   | 36        |
| 29              | 11,38        | 3,70      | 0,07                                      | 0,51      | 4,0                                       | 27        | 325   | 23        |
| 36              | 21,70        | 3,29      | 0,05                                      | 0,53      | 3,0                                       | 18        | 235   | 91        |
| 43              | 14,29        | 1,06      | 0,04                                      | 0,62      | 1,6                                       | 12        | 432   | 94        |
| 50              | 18,52        | 3,18      | 0,03                                      | 0,73      | 3,0                                       | 9         | 312   | 55        |
| 64              | 12,56        | 3,54      | 0,01                                      | 0,04      | 2,5                                       | 17        | 133   | 13        |
| 71              | 4,83         | 3,86      | 0,00                                      | 0,07      | 6,1                                       | 26        | 190   | 17        |
| 78              | 15,13        | 7,41      | 0,03                                      | 0,52      | 2,7                                       | 35        | 192   | 8         |
| 83              | 18,00        | 9,34      | 0,03                                      | 0,50      | 2,4                                       | 22        | 214   | 25        |
| 91              | 10,95        | 3,00      | 0,05                                      | 0,04      | 5,0                                       | 20        | 432   | 19        |
| 100             | 6,12         | 3,54      | 0,04                                      | 0,13      | 5,9                                       | 25        | 300   | 48        |
| 110             | 21,25        | 13,2      | 0,3                                       | 0,6       | 6,5                                       | 18        | 925   | 57        |
| 118             | 7,73         | 2,58      | 0,0                                       | 0,2       | 6,9                                       | 24        | 385   | 8         |
| 126             | 2,9          | 0,86      | 0,0                                       | 0,1       | 3,6                                       | 26        | 323   | 55        |
| 134             | 21,2         | 9,55      | 0,1                                       | 0,4       | 3,4                                       | 28        | 376   | 66        |
| 142             | 25           | 11        | 0,0                                       | 0,1       | 8,9                                       | 29        | 376   | 12        |
| 150             | 20           | 14        | 0,0                                       | 0,0       | 8,9                                       | 24        | 215   | 40        |
| 158             | 12           | 3         | 0,1                                       | 0,6       | 8,4                                       | 29        | 200   | 60        |
| 166             | 18           | 2         | 1,7                                       | 0,8       | 6,5                                       | 32        | 330   | 80        |
| 174             | 11           | 0         | 0,3                                       | 0,2       | 13,9                                      | 31        | 300   | 78        |
| 182             | 19           | 5         | 0,1                                       | 0,1       | 7,2                                       | 37        | 288   | 37        |
| 190             | 12           | 4         | 0,1                                       | 0,3       | 0,3                                       | 28        | 350   | 40        |
| 198             | 18           | 1,6       | 1,7                                       | 2,8       | 0,2                                       | 31        | 300   | 33        |
| 200             | 18           | 8,5       | 0,3                                       | 2,3       | 0,0                                       | 38        | 340   | 20        |

Af: afluente; Ef.: efluente; t: tempo; d: dias.

**Tabela C5 - Concentração dos sólidos totais (ST), sólidos totais fixos (STF) e sólidos totais voláteis (STV) no BAS em escala piloto alimentado continuamente com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (até 100 dias) e 5 % (de 110 a 200 dias).**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>ST</i>                         |                                   | <i>STF</i>                        |                                   | <i>STV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 1                       | 578                               | 400                               | 224                               | 218                               | 354                               | 182                               |
| 8                       | 540                               | 366                               | 286                               | 250                               | 254                               | 116                               |
| 15                      | 450                               | 306                               | 250                               | 200                               | 200                               | 106                               |
| 22                      | 610                               | 426                               | 304                               | 224                               | 306                               | 202                               |
| 29                      | 446                               | 330                               | 228                               | 222                               | 218                               | 108                               |
| 36                      | 756                               | 390                               | 256                               | 234                               | 500                               | 156                               |
| 43                      | 502                               | 276                               | 206                               | 151                               | 296                               | 125                               |
| 50                      | 710                               | 562                               | 324                               | 314                               | 386                               | 248                               |
| 64                      | 462                               | 206                               | 234                               | 102                               | 228                               | 104                               |
| 71                      | 500                               | 189                               | 300                               | 90                                | 200                               | 99                                |
| 78                      | 590                               | 200                               | 420                               | 100                               | 170                               | 100                               |
| 83                      | 770                               | 330                               | 320                               | 188                               | 450                               | 142                               |
| 91                      | 610                               | 290                               | 288                               | 145                               | 322                               | 145                               |
| 100                     | 440                               | 190                               | 199                               | 120                               | 241                               | 70                                |
| 110                     | 1226                              | 666                               | 680                               | 356                               | 546                               | 310                               |
| 118                     | 1084                              | 462                               | 520                               | 172                               | 564                               | 290                               |
| 126                     | 1070                              | 718                               | 678                               | 572                               | 392                               | 146                               |
| 134                     | 830                               | 604                               | 552                               | 467                               | 278                               | 138                               |
| 142                     | 608                               | 486                               | 328                               | 260                               | 280                               | 226                               |
| 150                     | 720                               | 383                               | 368                               | 98                                | 352                               | 285                               |
| 158                     | 540                               | 400                               | 390                               | 300                               | 150                               | 100                               |
| 166                     | 700                               | 330                               | 400                               | 288                               | 300                               | 42                                |
| 174                     | 644                               | 401                               | 370                               | 290                               | 274                               | 111                               |
| 182                     | 800                               | 500                               | 550                               | 300                               | 250                               | 200                               |
| 190                     | 550                               | 300                               | 320                               | 180                               | 230                               | 120                               |
| 198                     | 580                               | 303                               | 414                               | 190                               | 166                               | 113                               |
| 200                     | 490                               | 288                               | 320                               | 170                               | 170                               | 118                               |

Af: afluente; Ef.: efluente.

**Tabela C6 - Concentração dos sólidos suspensos totais (SST), sólidos suspensos fixos (SSF) e sólidos suspensos voláteis (SSV) no BAS em escala piloto alimentado continuamente com a mistura lixiviado pré-tratado/esgoto sanitário a 2 % (até 100 dias) e 5 % (de 110 a 200 dias).**

| <i>Tempo<br/>(dias)</i> | <i>SST</i>                        |                                   | <i>SSF</i>                        |                                   | <i>SSV</i>                        |                                   |
|-------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|-----------------------------------|
|                         | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Af<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> | <i>Ef<br/>(mg L<sup>-1</sup>)</i> |
| 3                       | 86                                | 11                                | 1                                 | 1                                 | 85                                | 10                                |
| 10                      | 200                               | 5                                 | 30                                | 4                                 | 170                               | 1                                 |
| 13                      | 59                                | 10                                | 5                                 | 5                                 | 55                                | 5                                 |
| 18                      | 66                                | 5                                 | 9                                 | 5                                 | 57                                | 0,4                               |
| 32                      | 58                                | 4                                 | 15                                | 3                                 | 43                                | 0,8                               |
| 39                      | 30                                | 4                                 | 12                                | 1                                 | 18                                | 3                                 |
| 46                      | 107                               | 1                                 | 22                                | 1                                 | 84                                | 1                                 |
| 53                      | 38                                | 3                                 | 9                                 | 1                                 | 29                                | 2                                 |
| 60                      | 100                               | 11                                | 20                                | 11                                | 80                                | 0                                 |
| 70                      | 88                                | 6                                 | 20                                | 3                                 | 68                                | 3                                 |
| 77                      | 50                                | 10                                | 18                                | 2                                 | 32                                | 8                                 |
| 84                      | 36                                | 4                                 | 15                                | 1                                 | 21                                | 3                                 |
| 91                      | 66                                | 10                                | 25                                | 4                                 | 41                                | 6                                 |
| 100                     | 40                                | 7                                 | 22                                | 2                                 | 18                                | 5                                 |
| 110                     | 59                                | 45                                | 12                                | 8                                 | 47                                | 33                                |
| 118                     | 100                               | 20                                | 21                                | 16                                | 79                                | 5                                 |
| 126                     | 43                                | 5                                 | 15                                | 3                                 | 28                                | 2                                 |
| 134                     | 72                                | 17                                | 19                                | 4                                 | 53                                | 12                                |
| 142                     | 81                                | 40                                | 54                                | 36                                | 27                                | 4                                 |
| 150                     | 90                                | 3                                 | 10                                | 3                                 | 80                                | 1                                 |
| 158                     | 80                                | 1                                 | 15                                | 0                                 | 65                                | 1                                 |
| 166                     | 90                                | 11                                | 20                                | 0                                 | 70                                | 11                                |
| 174                     | 100                               | 15                                | 24                                | 3                                 | 76                                | 12                                |
| 182                     | 77                                | 11                                | 12                                | 2                                 | 65                                | 9                                 |
| 190                     | 120                               | 20                                | 21                                | 5                                 | 99                                | 15                                |
| 198                     | 84                                | 18                                | 17                                | 0                                 | 67                                | 18                                |
| 200                     | 79                                | 25                                | 33                                | 10                                | 46                                | 15                                |

Af: afluente; Ef.: efluente.