

CAPÍTULO 4

MATERIAL E MÉTODOS

A pesquisa foi dividida em duas fases, de acordo com o modo operativo dos filtros anaeróbios e levando-se em conta o ingresso dos banhados construídos no sistema de tratamento. Assim, a primeira fase, doravante simplesmente denominada “Fase 1”, diz respeito à avaliação dos filtros anaeróbios operados em série e utilizou dados de controle do sistema do período de agosto de 2004 a setembro de 2006. A segunda fase, por sua vez, doravante simplesmente denominada “Fase 2”, refere-se à avaliação dos filtros quando operados em paralelo e em conjunto com os banhados construídos também em paralelo, tendo para isso utilizado dados de controle do período fevereiro de 2007 até dezembro de 2007.

4.1. DESCRIÇÃO GERAL

A pesquisa foi desenvolvida com base nos dados obtidos no acompanhamento da operação da Estação de Tratamento de Lixiviado (ETL) do aterro sanitário da Central de Resíduos do Recreio. O aterro sanitário, em operação desde 2002, está localizado no município de Minas do Leão, no Rio Grande do Sul, distante 80 km de Porto Alegre, em local que vem sendo explorado há algumas décadas por mineração de carvão a céu aberto. O resultado da atividade mineradora são grandes cavas, nas quais atualmente são dispostos de maneira final os resíduos sólidos domiciliares de 150 municípios gaúchos (aproximadamente 40% do estado), número que determina uma média superior a 50.000 toneladas por mês. O material utilizado para o recobrimento das frentes diárias de serviço é um resíduo gerado durante o beneficiamento do carvão, resultado de peneiramentos sucessivos e cujo aproveitamento energético não é interessante. As características desse material certamente influenciam na constituição do lixiviado nos seguintes aspectos: o material apresenta elevada concentração de enxofre, conseqüentemente elevando os teores de enxofre do lixiviado, e grande quantidade de sólidos muitíssimo finos, agravando o problema relativo à concentração de sólidos totais do lixiviado.

O clima do Rio Grande do Sul é subtropical-úmido, apresentando estações bem definidas, com verões que podem apresentar temperaturas superiores a 35 °C e invernos com mínimas inferiores aos 5 °C. As temperaturas médias variam entre 15 e 18 °C.

As Figuras 4.1 e 4.2 apresentam duas vistas do aterro.



Figura 4.1 Descarga do material usado no recobrimento da massa de resíduos.



Figura 4.2 Vista de uma das enormes cavas de mineração existentes na área do aterro.

4.2. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE LIXIVIADO PROPOSTA ORIGINALMENTE

O sistema de tratamento de lixiviado proposto quando do início da operação do aterro, em 2002, utilizava duas lagoas anaeróbias em série, seguidas de três lagoas facultativas também em série. O tempo de detenção hidráulica (TDH) projetado para cada uma das lagoas anaeróbias era de 8 dias, diferentemente do que Qasim & Chiang (1994) indicaram: o TDH para lagoas anaeróbias que tratam lixiviado de aterro sanitário deve estar entre 20 e 50 dias. Além disso, a elevada concentração de N-amoniacal afluente às lagoas facultativas – decorrência dos processos anaeróbios ocorridos tanto no âmbito da massa de resíduos dispostos quanto nas lagoas anaeróbias – determinava inibição do crescimento dos microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica. Como consequência principalmente dos fatores citados anteriormente, o sistema não viabilizava que os padrões de emissão de efluentes, estabelecidos nas licenças do empreendimento, fossem alcançados. As Figuras 4.3 e 4.4 apresentam o sistema de tratamento proposto originalmente.



Figura 4.3 Vista das duas lagoas anaeróbias e das três lagoas facultativas.

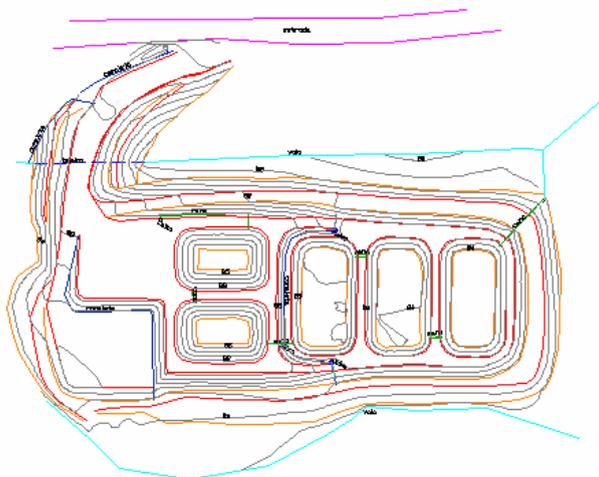


Figura 4.4 Esquema das duas lagoas anaeróbias em série com as três lagoas facultativas.

4.3. ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE LIXIVIADO REFORMULADA

No primeiro semestre de 2004, orientada pelo entendimento de que alternativas passivas (pouco mecanizadas) são as mais aplicáveis para países em desenvolvimento, deu-se a modificação do sistema de tratamento proposto originalmente, através de projeto que previu: transformação das duas lagoas anaeróbias em dois filtros anaeróbios de fluxo ascendente; exclusão das três lagoas facultativas do sistema; implantação de dois banhados construídos a jusante dos filtros anaeróbios. Essas medidas, em princípio, viabilizariam a diminuição das concentrações efluentes do sistema de tratamento, em termos de $DBO_{5,20}$, DQO, COT e N-amoniacal. Ainda, a questão da vazão de lixiviado foi importante na reformulação do sistema de tratamento, pois o rápido aumento da massa de resíduos disposta no aterro superou a previsão estabelecida na concepção do projeto original, fato cuja consequência seria a extrapolação da geração de lixiviado projetada inicialmente.

A partir do exposto, ficou então a Estação de tratamento de lixiviado (ETL) composta por dois filtros anaeróbios de fluxo ascendente, operados em série durante a Fase 1 desta pesquisa e em paralelo durante a sua Fase 2, quando também foram implantados no sistema dois banhados construídos

em paralelo, sendo um deles de fluxo superficial e o outro de fluxo subsuperficial. O sistema de tratamento foi dimensionado para vazão média de projeto igual a 355 m³/dia (4,11 L/s). A Figura 4.5 apresenta um esquema da disposição das unidades no terreno onde está implantada a ETL.

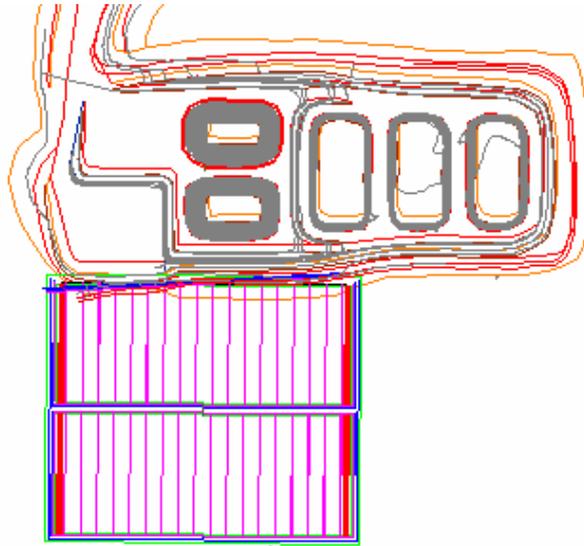


Figura 4.5 Os dois filtros anaeróbios de fluxo ascendente (ao lado das três lagoas facultativas desativadas) e, na parte inferior da figura, os dois banhados construídos.

As Figuras 4.6 e 4.7 apresentam dois fluxogramas da ETL (Fase 1 e Fase 2).

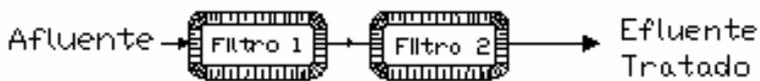


Figura 4.6 Fluxograma de funcionamento do sistema na Fase 1 da pesquisa.

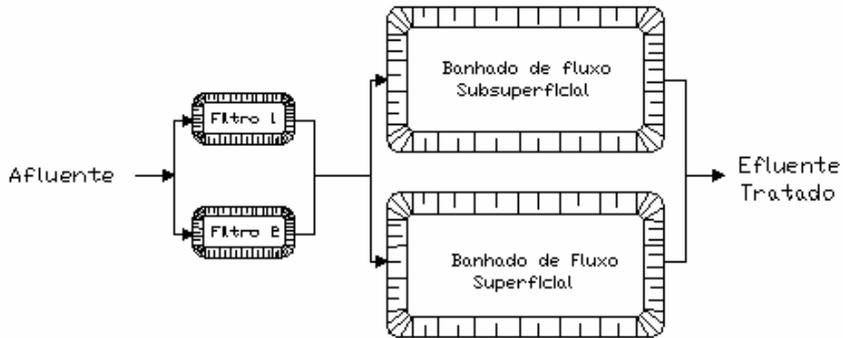


Figura 4.7 Fluxograma de funcionamento do sistema na Fase 2 da pesquisa.

4.4. CARACTERIZAÇÃO DOS FILTROS

4.4.1. Dimensões

- Volume útil de cada um dos filtros, já preenchidos com brita: 1.365 m³.
- Profundidade útil de cada um dos filtros: 4,0 m.
- Área da base de cada um dos filtros: 160 m².
- Área na superfície líquida em cada um dos filtros: 640 m².
- Altura da camada de brita: 3,5 m.
- Leito suporte: composto por brita 3, cuja maior dimensão deve estar compreendida entre 25 mm e 48 mm.

A Figura 4.8 apresenta um corte esquemático dos filtros.

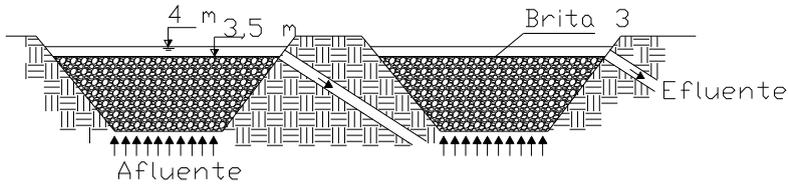


Figura 4.8 Corte esquemático dos filtros.

4.4.2. Tempo médio de detenção hidráulica nos filtros

A verificação do tempo médio de detenção hidráulica (TDH) nos filtros deu-se pela relação entre o volume útil de cada um dos filtros e a vazão de lixiviado aplicada diariamente em cada uma dessas unidades. Assim, na Fase 1, o TDH médio em cada um dos filtros resultou igual a 3,8 d, totalizando o TDH do conjunto igual a aproximadamente 7,6 d. Na Fase 2, por sua vez, o TDH médio em cada um dos filtros resultou igual a 7,6 d, pois a vazão afluente de lixiviado foi dividida entre as duas unidades.

4.4.3. Abastecimento dos filtros

O lixiviado era encaminhado em um conduto forçado por gravidade até os filtros, a partir de uma câmara receptora localizada no divisor de águas do aterro. Para chegar nessa câmara o lixiviado era bombeado a partir de um tanque (com capacidade máxima de 350 m³), previsto como instrumento de atenuação de vazões de pico, equalização e homogeneização do líquido, localizado a jusante e ao pé de uma das células do aterro. A Figura 4.9 apresenta o referido tanque.



Figura 4.9 Tanque a partir do qual era bombeado o lixiviado até o divisor de águas do aterro.

4.4.4. Construção dos filtros

As Figuras 4.10, 4.11 e 4.12 apresentam o registro fotográfico da construção dos filtros.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.10

(a) Vista geral da área de localização dos filtros. (b) Espalhamento de camada de areia sobre lona plástica amarela disposta, ainda, sobre manta de PEAD. (c) Seqüência do espalhamento da camada de areia. (d) Começo da colocação de pranchas de madeira no fundo do filtro. (e) Seqüência da colocação das pranchas de madeira sobre as quais foi colocado o leito filtrante. (f) Distribuição das pranchas de madeira no fundo da unidade.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.11

(a) Colocação da primeira camada de pedras (pedra-de-mão) na base dos filtros. (b) Etapa final de preenchimento do fundo dos filtros com pedra-de-mão. (c) Vista do fundo de um dos filtros com a base já preenchida. (d) Detalhe do fundo de um dos filtros. (e) Espalhamento da brita que constitui o horizonte de filtração. (f) Tubos que, durante o início da operação do sistema, introduziam o lixiviado no primeiro dos filtros.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.12

(a) Estrutura partidora de vazão que foi utilizada no início da operação dos filtros. (b) Mangueiras que introduziam o lixiviado nos tubos alimentadores do primeiro filtro da série. (c) Caminhão-pipa descarregando o lixiviado em tubulação que se estendia até o partidor de vazão. (d) Ascensão da lâmina de lixiviado no filtro. (e) Vista do primeiro e do segundo filtro. (f) Estrutura partidora de vazão modificada, substituindo a distribuição inicial.



Figura 4.13

No primeiro plano, os dois filtros anaeróbios e, ao fundo, as três lagoas facultativas (conjunto que compunha o sistema de tratamento originalmente).

4.5. CARACTERIZAÇÃO DOS BANHADOS

4.5.1. Considerações iniciais

As macrófitas usadas no banhado construído de fluxo subsuperficial são da espécie *Typha subulata*, conforme apresenta a Figura 4.14, pois essas estão amplamente distribuídas no Rio Grande do Sul. A preferência pela espécie deveu-se também à sua capacidade de desenvolver-se em ambientes perturbados e com elevada concentração de nutrientes, com grande produção de biomassa. As macrófitas plantadas no banhado de fluxo superficial são da espécie *Scirpus californicus*.

O estabelecimento de comunidades adultas de macrófitas aquáticas em banhados construídos depende em muito da densidade inicial de propágulos² (Bidone, 2004). Nos banhados em questão, a densidade inicial é de 1 propágulo por metro quadrado.



Figura 4.14 Macrófita aquática da espécie *Typha subulata*.

4.5.2. Banhado de fluxo subsuperficial

O fundo do banhado de fluxo subsuperficial foi executado em nível. A altura do leito suporte das raízes das macrófitas foi de 0,6 m, ficando 0,5 m preenchidos permanentemente pela lâmina líquida, durante a operação normal do banhado. O material utilizado no leito suporte do banhado é a brita 1, cuja maior dimensão deve estar compreendida entre 9,5 mm e 19 mm. A área superficial projetada para o banhado foi de 10.000 m², para a

² Em Botânica, propágulos são estruturas que se despreendem de uma planta adulta para dar origem a uma nova. Os propágulos possuem a função de propagar a espécie, ou seja, são estruturas adaptadas para garantir o sucesso na dispersão das algumas plantas.

qual o TDH da unidade seria igual a 11,3 d. Porém, dado o ineditismo da iniciativa de utilização de banhados construídos no tratamento de lixiviado em escala real no Brasil, optou-se pela execução e operação de um banhado cuja área é igual a 5.000 m², para o qual o TDH resultou igual a 5,6 d. A Figura 4.15 apresenta um corte esquemático do referido banhado.

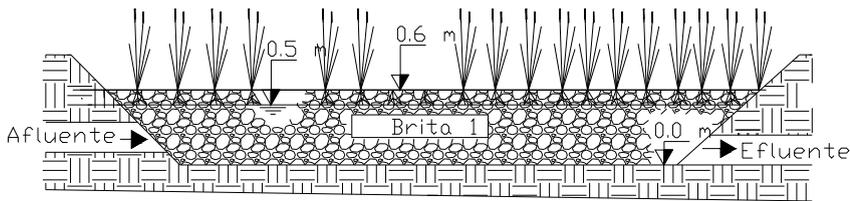


Figura 4.15 Corte esquemático do banhado de fluxo subsuperficial.

4.5.3. Banhado de fluxo superficial

O fundo do banhado de fluxo superficial foi executado em nível. Esse banhado não possui leito suporte de brita para as raízes das macrófitas. As mudas foram plantadas diretamente em uma camada de 0,15 m de argila orgânica, sobre a qual previu-se escoar uma lâmina líquida de 0,5 m. Assim como no caso do banhado de fluxo subsuperficial, a área superficial projetada para o banhado foi de 10.000 m², para a qual o TDH no banhado seria igual a 11,3 d. Optou-se pela execução e operação de um banhado cuja área é igual a 5.000 m², para o qual o TDH resultou igual a 5,6 d. A Figura 4.16 apresenta um corte esquemático do banhado de fluxo superficial.

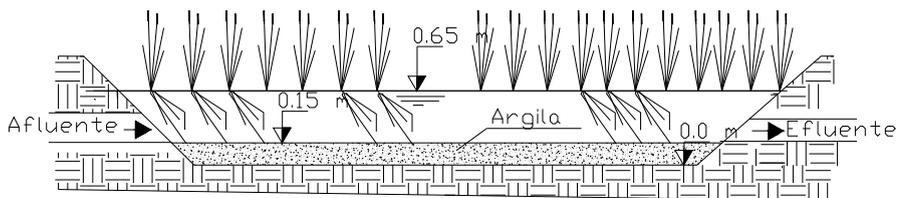


Figura 4.16 Corte esquemático do banhado de fluxo superficial.

4.5.4. Operação dos banhados construídos

Os banhados seriam operados em paralelo, com o objetivo de estudar-se qual o tipo de fluxo potencialmente mais eficiente na remoção de matéria orgânica e de nitrogênio amoniacal. Por isso, cada um deles receberia metade da vazão do lixiviado efluente dos filtros anaeróbios. A operação do banhado de fluxo superficial não chegou a efetivar-se visto que as macrófitas nele plantadas, da espécie *Scirpus californicus*, não se adaptaram ao local em que foram plantadas. As possíveis razões para a não aclimação das plantas são citadas no item Resultados e Discussão. Portanto, não aconteceu introdução de lixiviado no banhado de fluxo superficial.

No banhado de fluxo subsuperficial, não ocorreu colheita da parte das plantas que poderia ser removida. Essa atividade teria sido realizada no início do outono de 2007, se as macrófitas houvessem apresentado crescimento uniforme, diferentemente do verificado. Para o seu corte teriam sido utilizadas foices, deixando-se sempre um “toco” acima do material suporte com não menos de 0,10 cm de altura. Não seriam removidos os rizomas e as raízes, os quais permitiriam, com o devido tempo, o restabelecimento da comunidade de macrófitas.

4.5.5. Construção dos banhados

As Figuras 4.17, 4.18, 4.19 e 4.20 apresentam a construção dos banhados.



(a)



(b)



(c)

Figura 4.17

(a) Vista do terreno onde foram executados os banhados. (b) Impermeabilização da base dos banhados. (c) Finalização do preenchimento com brita do banhado de fluxo subsuperficial.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)



(f)

Figura 4.18

(a) Vista das bases dos banhados. (b) Preparação do canal de alimentação do banhado de fluxo superficial. (c) Canal de alimentação do banhado de fluxo superficial concluído. (d) Detalhe da brita 1 utilizada no banhado de fluxo subsuperficial. (e) Coleta de mudas de macrófitas em banhado natural, dentro do próprio aterro. (f) Começo do plantio das macrófitas no banhado de fluxo subsuperficial.



(a)



(b)



(c)



(d)



(e)

Figura 4.19

(a) Detalhe de uma muda de *Typha subulata*. (b) Mudas plantadas no banhado de fluxo sub-superficial. (c) Vista dos dois banhados em fase de aclimatação. (d) Vista da melhor adaptação das macrófitas no banhado de fluxo subsuperficial (ao fundo). (e) Transcorridos 4 meses desde o plantio, o banhado de fluxo superficial indica a dificuldade de adaptação do *Scirpus californicus*.



(a)



(b)

Figura 4.20

(a) No banhado de fluxo subsuperficial a boa adaptação da *Typha*, 6 meses após o seu plantio. (b) Entre as duas unidades, o autor deste trabalho, evidenciando a diferença na adaptação das plantas de um banhado com relação ao outro.

4.6. ANÁLISES E EXAMES

4.6.1. Ensaio de caracterização

A Fase 1 da pesquisa, filtros anaeróbios operados em série entre agosto de 2004 e setembro de 2006, somente objetivou a avaliação das eficiências obtidas nas unidades na remoção da matéria orgânica presente no lixiviado. Para essa finalidade, bastaram os ensaios que permitiram o “controle” do sistema do ponto de vista da remoção de $DBO_{5,20}$, DQO e COT, conforme mostra a Tabela 4.2, no item 4.6.2. Assim, no referido período não foi realizada a caracterização do lixiviado, que implicaria em vários outros ensaios.

Os ensaios realizados durante a Fase 2 do trabalho tiveram os seguintes objetivos: caracterização do lixiviado gerado no aterro sanitário; avaliação das eficiências dos filtros anaeróbios na remoção de matéria orgânica, quando operados em paralelo; avaliação das eficiências obtidas nos banhados construídos na remoção de N-amoniaco e também na remoção de matéria orgânica. A Tabela 4.1 apresenta as análises físico-químicas que foram usadas para caracterizar o lixiviado durante a Fase 2 do processo de tratamento. Apresentam-se também a frequência e os pontos de amostragem dos ensaios. O período de amostragem da Fase 2 estendeu-se de fevereiro de 2007 até dezembro de 2007. A Tabela A1 (em anexo) apresenta as metodologias utilizadas para a realização das análises aqui propostas.

As análises físico-químicas foram realizadas pelo Laboratório de Análises Químicas Laborquímica Ltda., em atendimento ao que estabelece o *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (1999)*. Os resultados foram ratificados no Laboratório de Saneamento da EESC.

Tabela 4.1 Ensaios usados na caracterização do lixiviado durante a Fase 2

Ensaio	Frequência	Amostra
DBO _{5,20} (mgO ₂ /L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
DQO (mgO ₂ /L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
COT (mgC/L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
Série de sólidos (mg/L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
pH	Quinzenal	Lixiviado bruto
Temperatura (°C)	Quinzenal	Lixiviado bruto
Ácidos voláteis (mgÁc.acético/L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
Alc. total (mgCaCO ₃ /L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
N-amoniaco (mgN/L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
NTK (mgN/L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
Sulfato (mgSO ₄ ²⁻ /L)	Mensal	Lixiviado bruto
Sulfeto (mgH ₂ S/L)	Única	Lixiviado bruto
Fosfato total (mgPO ₄ ³⁻ /L)	Quinzenal	Lixiviado bruto
Coliformes fecais (NMP/100mL)	Mensal	Lixiviado bruto
Bactérias heterotróficas (UFC/mL)	Mensal	Lixiviado bruto
Metais pesados (mg/L)	Mensal	Lixiviado bruto

4.6.2. Ensaios de controle

A Tabela 4.2 apresenta as análises físico-químicas que foram usadas para controlar o líquido durante a Fase 1 do processo de tratamento. O período de amostragem estendeu-se de agosto de 2004 a setembro de 2006. Apresentam-se também a frequência e os pontos amostrais.

Tabela 4.2 Ensaios usados no controle do lixiviado durante a Fase 1

Ensaio	Frequência	Amostra	
		Filtros	
DBO _{5,20} (mgO ₂ /L)	Semanal	Entrada/Saída	
DQO (mgO ₂ /L)	Semanal	Entrada/Saída	
COT (mgC/L)	Semanal	Entrada/Saída	

A Tabela 4.3 apresenta as análises físico-químicas que foram usadas para controle do lixiviado durante a Fase 2 do processo de tratamento. Esses foram os ensaios que permitiram a avaliação das eficiências obtidas em cada uma das unidades que compõem o sistema de tratamento. Na referida tabela, apresentam-se também a frequência e os pontos de amostragem.

Tabela 4.3 Ensaios usados no controle do lixiviado durante a Fase 2

Ensaio	Frequência	Amostra	
		Filtros	Banhados
DBO _{5,20} (mgO ₂ /L)	Quinzenal	Entrada/Saída	Entrada/Saída
DQO (mgO ₂ /L)	Quinzenal	Entrada/Saída	Entrada/Saída
COT (mgC/L)	Quinzenal	Entrada/Saída	Entrada/Saída
N-amoniaco (mgN/L)	Quinzenal	Entrada/Saída	Entrada/Saída
Nitrito (mgNO ₂ /L)	Quinzenal	-	Entrada/Saída
Nitrato (mgNO ₃ /L)	Quinzenal	-	Entrada/Saída
Ácidos voláteis (mgÁc. acético/L)	Quinzenal	Entrada/Saída	-
Alc. total (mgCaCO ₃ /L)	Quinzenal	Entrada/Saída	-

Todas as imagens apresentadas no corpo deste trabalho pertencem à SIL – Soluções Ambientais LTDA. ou ao autor desta pesquisa.