HUMBERTO CARLOS RUGGERI JÚNIOR

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LAGOA FACULTATIVA
VISANDO À REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONÍACAL

São Paulo

2011

HUMBERTO CARLOS RUGGERI JÚNIOR

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LAGOA FACULTATIVA
VISANDO À REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONÍACAL

Tese de doutorado apresentada à Escola
Politécnica da Universidade de São Paulo
para obtenção do título de doutor em
Ciências, Programa de Pós-Graduação
em Engenharia Civil

São Paulo

2011

HUMBERTO CARLOS RUGGERI JÚNIOR

PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE LAGOA FACULTATIVA
VISANDO À REMOÇÃO DE NITROGÊNIO AMONÍACAL

Tese de doutorado apresentada à
Escola Politécnica da Universidade
de São Paulo para obtenção do título
de doutor em Ciências, Programa de
Pós-Graduação em Engenharia Civil

Área de concentração:
Engenharia Hidráulica e Sanitária

Orientador:
Prof. Dr. Roque Passos Piveli

São Paulo
2011

Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.

São Paulo, 15 de junho de 2011.

Assinatura do autor _____

Assinatura do orientador _____

FICHA CATALOGRÁFICA

Ruggeri Junior, Humberto Carlos

Pós-tratamento de efluente de lagoa facultativa visando à remoção de nitrogênio amoniacal / H.C. Ruggeri Junior. -- ed.rev. -- São Paulo, 2011.

364 p.

Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de São Paulo. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental.

1.Tratamento de esgotos sanitários 2.Lagoas de estabilização 3.Remoção de nutrientes I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento de Engenharia Hidráulica e Ambiental II.t.

À memória de
minha amiga, Aline Akabochi Fabreti.

Humberto Carlos Ruggeri Júnior

AGRADECIMENTOS

A Deus pela existência, suporte e presença constante no meu coração. Senhor, tu me sondas e me conheces. Sabes quando me assento e quando me levanto e conheces todos os meus caminhos.

Ao longo desses anos de pós-graduação foram várias as pessoas que contribuíram nessa escalada. A estas pessoas, deixo o meu muito obrigado. Mas gostaria de deixar alguns agradecimentos em destaque, principalmente, aos amigos e professores que deram sua contribuição de forma direta.

- Ao meu orientador, Roque Passos Piveli, pela orientação, dedicação, generosidade, confiança e ensinamentos.
- Ao professor Pedro Alem pelos ensinamentos e sugestões neste trabalho.
- Aos professores da Unesp, Dib Gebara e Milton Dall'Aglio Sobrinho, pelo incentivo e apoio.
- Aos meus pais, Humberto Carlos Ruggeri e Thereza Paschoal Ruggeri, pelo apoio e força, sempre me dado com carinho.
- Ao meu irmão, grande incentivador e companheiro.
- Aos meus amigos do PEF, Ana Carolina Marques, Marcelo e Luciana Kataoka, pelas longas conversas a respeito de tudo e apoio.
- Aos amigos de laboratório de saneamento, Diego, Luciano, Rodrigo, Mailer, Márcia, Rodrigo de Freitas, Weverton, Mônica, Mônica Medeiros, Carolina, Gilberto, Jéferson, Silvana Cutolo, Rudi, Fernando Vida e Denis pela convivência prazerosa.
- Aos amigos Cruspianos, Lúcia Zanetti, Cristina, Adelgício, Sérgio Turina, Marielle e Washington, pela grande família.
- Ao pessoal da secretaria, Ângela, Wandréia, Odorico e Ricardo pela atenção dada as minhas solicitações e conversas animadas.
- Aos técnicos do laboratório de saneamento, Fábio Campos e Laerte Carvalho, pelas análises microbiológicas e, principalmente, pelo respeito e amizade.
- Aos técnicos do laboratório de solos, Joaquim Costa e Antônio, pela ajuda na confecção de alguns equipamentos e, principalmente, pela amizade.
- Ao pessoal da Unilins, pela moradia em Lins e apoio de laboratório.
- À Capes pelo fornecimento da bolsa-auxílio de doutorado.
- Ao pessoal da SABESP-Lins, pelo apoio na construção da bancada experimental.
- A todos, novamente, meu muito obrigado.

RESUMO

Discute o pós-tratamento de efluente de lagoas facultativas visando à remoção de nitrogênio amoniacal. Para isso, foram utilizadas unidades terciárias em escala piloto. A escolha do tipo de unidades para o pós-tratamento do efluente levou em consideração a questão do baixo custo e simplicidade de operação. Desta forma, para o estudo, fez-se opção por lagoas rasas e filtros percoladores como unidades de pós-tratamento. O objetivo principal do trabalho foi associar as taxas de aplicação superficial e volumétricas com as remoções de nitrogênio amoniacal nessas unidades. Para lagoas em escala piloto, foram adotadas profundidades de 0,5 m e 1,0 m. As lagoas rasas foram submetidas a diferentes taxas de aplicação e TDH. Para os filtros percoladores, foram escolhidos dois materiais diferentes como meio suporte, pedra britada e anel plástico. Os filtros foram submetidos a diferentes condições operacionais. Para os dois tipos de unidades complementares de tratamento, foram verificados os efeitos das condições ambientais sobre as eficiências de remoção. Na lagoa de 0,5 m foram observadas concentrações de nitrogênio amoniacal abaixo de 20 mg-N/L para tempos de detenção de 5 dias e taxas de aplicação superficial de 50 kgDBO/ha.d. Na lagoa de 1,0 m, concentrações de nitrogênio amoniacal abaixo de 20 mg-N/L só foram possíveis com taxas de aplicação de 50 kgDBO/ha.d e TDH de 10 dias. A lagoa de 0,5 m apresentou uma eficiência maior na remoção de nitrogênio amoniacal do que a lagoa de 1,0 m. Os efluentes dos filtros apresentaram concentrações de nitrogênio amoniacal acima de 20 mg-N/L com taxas acima de 0,20 kgDBO/m³.d. Para taxas de aplicação hidráulica acima de 18 m³/m².d e 0,70 kgDBO/m².d houve o encerramento do processo de nitrificação nos filtros. Os valores de pH e as concentrações de NH₃ no efluente da lagoa facultativa submeteram os filtros a operar dentro da faixa de inibição da nitratação, devido ao NH₃, sendo observadas concentrações significativas de nitrito no seu efluente. Os filtros percoladores não foram adequados como unidades de pós-tratamento de efluente de lagoa. Embora as lagoas rasas não tenham atendido aos aspectos de múltiplas qualidades do efluente, elas foram mais adequadas ao pós-tratamento de efluente de lagoa facultativa do que os filtros percoladores.

Palavras-chave: Lagoa Facultativa. Nitrogênio Amoniacal. Filtro percolador. Lagoas de maturação. Lagoas rasas

ABSTRACT

This study discusses the post treatment of effluent ponds aiming at removing the ammonia nitrogen. To this end, tertiary units were used in a pilot scale. The choice of units for the post treatment of the effluent took into consideration the issue of low cost and simplicity of operation. Thus, for this study, we chose shallow ponds and trickling filters as post-treatment units. The main objective of this study was to associate the superficial and the volumetric application rates with the removal of ammonia nitrogen of these units. For the ponds on a pilot scale, two depths were adopted: a pond of 0.5 m and another one of 1.0 m depth. The shallow ponds were subjected to different loading rates and HRT. For the trickling filters, two different kinds of materials were chosen as a medium support: crushed stone and plastic ring. The filters were also subjected to different operating conditions. For both types of additional treatment units it was observed the effects of the environmental conditions on the removal efficiencies. In the pond of 0.5 m depth, it was observed concentrations of ammonia nitrogen below 20 mg-N/L for detention times of 5 days and superficial application rates of 50 kgBOD/ha.d. In the pond of 1.0 m depth, concentrations of ammonia nitrogen below 20 mg-N/L were only possible with application rates of 50 kgBOD/ha.d and HRT of 10 days. The 0.5m-depth pond showed a better efficiency in the removal of ammonia nitrogen than the 1.0m-depth pond. The filters had concentrations above 20mg-N/L with rates above 0.20 kgBOD/m³.d. For hydraulic application rates above 18m³/m².d and 0.70kgBOD/m².d there was the cessation of the nitrification process in the filters. The pH values and the concentrations of NH₃ in the effluent of the facultative pond made the filters operate within the range of inhibition of nitrification, due to the NH₃, and it was observed significant concentrations of nitrite in the effluent of the filters. The trickling filters were not suitable as units of post-treatment pond effluent. Although the shallow ponds have not met the multiple aspects of quality of the effluent, they were more adequately for facultative pond effluents post-treatment than trickling filters.

Keywords : Shallow pond. Facultative pond. Ammonia nitrogen. Trickling filter. Maturation ponds.

LISTA DE FIGURAS - REVISÃO DE LITERATURA

Figura 3.1 - Distribuição das espécies de amônia em função do pH. Adaptado: Metcalf & Eddy Inc, 2004.....	35
Figura 3.2 - Formas de nitrogênio em sistemas aquáticos. Adaptado: Patrick et al. (1997).....	36
Figura 3.3 - Gráfico obtido por Yánes (2001) a partir de suas investigações em lagoas facultativas precedidas de lagoa anaeróbia.....	44
Figura 3.4 - Transformação e remoção do nitrogênio em lagoas de estabilização facultativas. (Fonte: SENZIA et al. 2003).....	45
Figura 3.5 - Desenho esquemático do sistema de lagoas utilizado no estudo conduzido por Senzia et al. (2002).....	47
Figura 3.6 - Resultados obtidos a partir do modelo proposto por Senzia et al. (2002).	48
Figura 3.7 - Família de soluções - Curvas C (Fonte: Levenspiel, 1972).....	55
Figura 3.8 - Corte esquemático de um biofilme.....	58
Figura 3.9 - Perfil de nitrogênio no interior do biofilme. Adaptado de Iwai e Kitao, (1994).....	60
Figura 3.10 - Efeito da temperatura sobre as taxas de nitrificação em filtros percoladores. Adaptado de Parker et al., (1990).....	68
Figura 3.11 - Taxas de nitrificação em função da altura Fonte: Boller e Gujer (1986a)	70
Figura 3.12 - Taxas de nitrificação em função da altura.Fonte: Boller e Gujer (1986a)	71
Figura 3.13 - Esquema da transformação do nitrogênio - (a) sem inibição da nitrificação (b) com inibição, em um reator em bateladaAdaptado: Anthonisen et al. (1976).....	73
Figura 3.14 - Relações entre amônia livre, ácido nitroso e nitrificadoras. Adaptado: Anthonisen et al. (1976).....	75

LISTA DE FIGURAS – MATERIAIS E MÉTODOS

Figura 4.1 - Esquema geral da estação de tratamento de esgoto da SABESP/Lins e unidade experimental.....	79
Figura 4.2 - Vista aérea da ETE-SABESP/Lins.....	81
Figura 4.3 - Planta e corte esquemático das lagoas em escala piloto.....	82
Figura 4.4 - Lagoa Piloto L1 h=1,0m (a) e Lagoa Piloto L2 h=0,5m (b).....	82
Figura 4.5 - Sistema de controle da vazão das lagoas em escala piloto.....	84
Figura 4.6 - Dispositivo de saída e controle da profundidade.....	85
Figura 4.7 - Esquema do dispositivo de controle da profundidade das lagoas piloto.	85
Figura 4.8 - Amostrador de coluna empregado na retirada de amostras dos pontos intermediários.....	89
Figura 4.9 - Vista superior do filtro percolador.....	93
Figura 4.10 - Vista Esquemática superior do filtro percolador.....	93
Figura 4.11 - Sistema de controle de vazão do filtro percolador.....	94
Figura 4.12 - Esquema do distribuidor do filtro percolador.....	95

Figura 4.13 - Decantadores do filtro percolador.....	96
Figura 4.13 – Vista esquemática do filtro percolador.....	99
Figura 4.15 - Foto de perfil do filtro percolador.....	100

LISTA DE FIGURAS - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Figura 5.1 - Curvas relativas ao ensaio hidrodinâmico: (a) concentração de rodamina WT (a); (b) Curva E(t); (c) Curva F(t) e (d) Curva E(Θ).....	108
Figura 5.2 - Perfil de pH ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L1.....	110
Figura 5.3 - Perfil de temperatura ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L1.....	110
Figura 5.4 - Perfil de OD ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L1.....	111
Figura 5.5 - Perfil de pH ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L2.....	112
Figura 5.6 - Perfil de temperatura ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L2.....	113
Figura 5.7 - Perfil de OD ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L2.....	113
Figura 5.8 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 01).....	114
Figura 5.9 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	116
Figura 5.10 – Box-Whiskers: pH – Efluente lagoa facultativa e pilotos (Fase01)....	116
Figura 5.11 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	117
Figura 5.12 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	117
Figura 5.13: Gráfico Box-Whiskers: DBO total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	119
Figura 5.14 - Gráfico Box-Whiskers: DBO filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	119
Figura 5.15 - Gráfico Box-Whiskers: DQO total – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	121
Figura 5.16 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	121
Figura 5.17 - Gráfico Box-Whiskers: Clorofila-a – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	122
Figura 5.18 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	123
Figura 5.19 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	124
Figura 5.20 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	125
Figura 5.21 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	125
Figura 5.22 - Gráfico Box-Whiskers: Coliformes Totais – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	126
Figura 5.23 - Gráfico Box-Whiskers: E.coli – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	127

Figura 5.24 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 02).....	129
Figura 5.25 - Gráfico Box-Whiskers - Temperatura – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	130
Figura 5.26 - Gráfico Box-Whiskers - pH – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	131
Figura 5.27 - Gráfico Box-Whiskers - OD – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02)....	132
Figura 5.28 - Gráfico Box-Whiskers - Alcalinidade – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	132
Figura 5.29 - Gráfico Box-Whiskers - DBO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	133
Figura 5.30 - Gráfico Box-Whiskers - DBO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	134
Figura 5.31 - Gráfico Box-Whiskers - DQO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	135
Figura 5.32 - Gráfico Box-Whiskers - DQO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	136
Figura 5.33 - Gráfico Box-Whiskers - Clorofila-a – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	137
Figura 5.34 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Totais (ST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	138
Figura 5.35 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	138
Figura 5.36 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	139
Figura 5.37 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)– Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	139
Figura 5.38 - Gráfico Box-Whiskers - Coliformes Totais – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	141
Figura 5.39 - Gráfico Box-Whiskers – E.coli – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	141
Figura 5.40 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 01).....	143
Figura 5.41 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	144
Figura 5.42: Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	145
Figura 5.43 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	146
Figura 5.44 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	147
Figura 5.45 - Relação entre consumo de alcalinidade e pH.....	147
Figura 5.46 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	150
Figura 5.47 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	150
Figura 5.48 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	152

Figura 5.49 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	152
Figura 5.50 -Gráfico Box-Whiskers: Clorofila-a – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	153
Figura 5.51 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	154
Figura 5.52 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	155
Figura 5.53 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SSV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	156
Figura 5.54 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	156
Figura 5.55 - Gráfico Box-Whiskers: Coliformes Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	158
Figura 5.56 - Gráfico Box-Whiskers: E.coli – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	158
Figura 5.57 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 03).....	161
Figura 5.58 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	161
Figura 5.59 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	162
Figura 5.60 - Gráfico Box-Whiskers: Oxigênio Dissolvido – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	163
Figura 5.61 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	164
Figura 5.62 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	165
Figura 5.63 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	166
Figura 5.64 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	167
Figura 5.65 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	167
Figura 5.66 - Gráfico Box-Whiskers: Clorofila-a – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	168
Figura 5.67 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	170
Figura 5.68 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	170
Figura 5.69 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	171
Figura 5.70 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	171
Figura 5.71 - Gráfico Box-Whiskers: Coliformes Totais – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	172
Figura 5.72 - Gráfico Box-Whiskers: E.coli – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	173
Figura 5.73 - Gráfico Box-Whiskers: Taxas de Aplicação de NTK – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01, 02, 03 e 04).....	176

Figura 5.74 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	177
Figura 5.75 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	178
Figura 5.76 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	179
Figura 5.77 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	180
Figura 5.78 - Gráfico Box-Whiskers: Eficiência na remoção de NTK – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01,02,03 e 04).....	181
Figura 5.79 - Relação entre taxa de aplicação superficial de NTK e NTK efluente das lagoas piloto – (a) L1 e (b) L2.....	182
Figura 5.80 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01).....	184
Figura 5.81 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02).....	185
Figura 5.82 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03).....	186
Figura 5.83 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	187
Figura 5.84 - Gráfico Box-Whiskers: Eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal – Lagoa facultativa e pilotos (fase 04).....	188
Figura 5.85 - Concentração de nitrogênio amoniacal em função da temperatura da lagoa L1 e L2 – (a) L1 fase 01, (c) L1 fase 02, (e) L1 fase 03, (b) L2 fase 01, (d) L2 fase 02 e (f) L2 fase 03.	190
Figura 5.86 - Concentração de nitrogênio amoniacal em função do pH da lagoa L1 e L2 – (a) L1 fase 01, (c) L1 fase 02, (e) L1 fase 03, (b) L2 fase 01, (d) L2 fase 02 e (f) L2 fase 03.	191
Figura 5.87 - Concentração de nitrogênio amoniacal em função do OD da lagoa L1 e L2 – (a) L1 fase 01, (c) L1 fase 02, (e) L1 fase 03, (b) L2 fase 01, (d) L2 fase 02 e (f) L2 fase 03.	192
Figura 5.88 - Concentração de nitrogênio amoniacal efluente em função do pH....	194
Figura 5.89 - Perfil de concentração de nitrogênio amoniacal – Lagoa L1 (fases 01,02 e 04).....	195
Figura 5.90 - Perfil de concentração de nitrogênio amoniacal – Lagoa L2 (fases 01,02 e 04).....	196
Figura 5.91 - Razão de nitrogênio efluente e afluente em função da taxa de aplicação superficial de NTK.....	197
Figura 5.92 - Razão de nitrogênio efluente e afluente em função da taxa de aplicação de NTK – Comparação com modelo de Yánes (2001).....	198
Figura 5.93 - Relação entre taxa de aplicação superficial de NTK e de DBO.....	199
Figura 5.94 - Percentual de nitrogênio amoniacal incorporado a biomassa, que volatiliza e que deixa o sistema na lagoa L1 – Fases 01, 02 e 03.....	201
Figura 5.95 - Percentual de nitrogênio amoniacal incorporado a biomassa, que volatiliza e que deixa o sistema na lagoa L2 – Fases 01, 02 e 03.....	202
Figura 5.96 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação hidráulica - Filtros percoladores (fase 01).....	204
Figura 5.97 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação superficial de DBO – Filtros percoladores (fase 01).....	204

Figura 5.98 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação volumétrica de DBO – Filtros percoladores (fase 01).....	205
Figura 5.99 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01).....	206
Figura 5.100 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01).....	206
Figura 5.101 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01).....	207
Figura 5.102 - Gráfico série histórica: OD – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01).....	207
Figura 5.103 - Gráfico Box-Whiskers : Alcalinidade – Efluente da lagoa facultativa e filtros percoladores (fase 01).....	208
Figura 5.104 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01).....	209
Figura 5.105 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01).....	209
Figura 5.106 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01).....	210
Figura 5.107 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01).....	211
Figura 5.108 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01).....	212
Figura 5.109 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01).....	212
Figura 5.110 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01).....	213
Figura 5.111 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01).....	213
Figura 5.112 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação hidráulica – Filtros percoladores (fase 02).....	214
Figura 5.113 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação superficial de DBO – Filtros percoladores (fase 02).....	215
Figura 5.114 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação volumétrica de DBO – Filtros percoladores (fase 02).....	215
Figura 5.115 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	216
Figura 5.116 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	217
Figura 5.117 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	217
Figura 5.118 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	218
Figura 5.119 - Gráfico Box-Whiskers: DBO total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	219
Figura 5.120 - Gráfico Box-Whiskers: DBO filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	219
Figura 5.121 - Gráfico Box-Whiskers: DQO total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	220
Figura 5.122 - Gráfico Box-Whiskers: DQO filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	221

Figura 5.123 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	222
Figura 5.124 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	222
Figura 5.125 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	223
Figura 5.126 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Voláteis – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02).....	223
Figura 5.127 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação hidráulica – filtros percoladores (fase 03).....	225
Figura 5.128 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação superficial de DBO – filtros percoladores (fase 03).....	225
Figura 5.129 - Gráfico Box-Whiskers - Taxa de aplicação volumétrica de DBO – filtros percoladores (fase 03).....	226
Figura 5.130 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente da Lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	227
Figura 5.131 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	227
Figura 5.132 - Gráfico Box-Whiskers: Oxigênio Dissolvido (OD) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	228
Figura 5.133 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	228
Figura 5.134 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	229
Figura 5.135 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Lagoa facultativa e efluente dos filtro percolador (fase 03).....	230
Figura 5.136 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	231
Figura 5.137 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	231
Figura 5.138 - Gráfico série histórica: DQO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	231
Figura 5.139 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	232
Figura 5.140 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	232
Figura 5.141 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	233
Figura 5.142 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03).....	234
Figura 5.143: Gráfico Box-Whiskers - Taxa de aplicação de NTK – Filtros percoladores (fases 01, 02 e 03).....	236
Figura 5.144 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente da lagoa facultativa e filtros percoladores (fase 01).....	238
Figura 5.145 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente da lagoa facultativa e filtros percoladores (fase 02).....	239
Figura 5.146 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente da facultativa e filtros percoladores (fase 03).....	240
Figura 5.147 - Gráfico Box-Whiskers: Eficiência na redução de NTK – Filtros percoladores.....	240

Figura 5.148: Gráfico Box-Whiskers – Nitrogênio Amoniacal, nitrito e nitrato – Filtros percoladores (Fase 01).....	243
Figura 5.149: Gráfico Box-Whiskers – Nitrogênio Amoniacal, nitrito e nitrato – Filtros percoladores (Fase 02).....	245
Figura 5.150: Gráfico Box-Whiskers – Nitrogênio Amoniacal, nitrito e nitrato – Filtros percoladores (Fase 03).....	246
Figura 5.151: Gráfico Box-Whiskers - Eficiência na redução de nitrogênio amoniacal – Filtros percoladores.....	248
Figura 5.152 - Gráfico série de dados da fase 04: Taxa de aplicação hidráulica, superficial de NTK, concentração de N. Amoniacal e eficiência na redução de nitrogênio amoniacal – Filtros percoladores.....	251
Figura 5.153 - Gráfico série de dados da fase 04 – Concentrações de nitrito e nitrato – Filtros percoladores.....	252
Figura 5.154 - Perfis das formas nitrogenadas ao longo da altura – Filtro de plástico	254
Figura 5.155 - Relação entre concentração de amônia livre e ácido nitroso e inibição das nitrificantes – Filtro percolador (Fase 01). Adaptado: Anthonisen et al. (1976). 256	
Figura 5.156 - Relação entre concentração de amônia livre e ácido nitroso e inibição das nitrificantes – Filtro percolador (Fase 02). Adaptado: Anthonisen et al. (1976).....	257
Figura 5.157 - Relação entre concentração de amônia livre e ácido nitroso e inibição das nitrificantes – Filtro percolador (Fase 03) Adaptado: Anthonisen et al. (1976).....	257
Figura 5.158 - Faixa de concentração de amônia livre para a ocorrência de inibição das nitrificantes.....	258
Figura 5.159 - Relação entre a razão de concentração de nitrito e nitrogênio amoniacal oxidado com pH afluente – Filtros percoladores.....	259
Figura 5.160 - Eficiência de redução do nitrogênio amoniacal (a) fase 01 e (b) fase 02 – Filtro percolador.....	264

LISTA DE TABELAS - REVISÃO DE LITERATURA

Tabela 3.1 - Concentração e eficiências médias de remoção dos diversos constituintes.....	30
Tabela 3.2 - Características operacionais do sistema de lagoas utilizado no estudo de remoção de nitrogênio conduzido por Senzia et al. (2002).....	47
Tabela 3.3 – Modelos para remoção de matéria orgânica e coliformes em função do regime hidráulico em reatores.....	51
Tabela 3.4 - Razões do interesse pelo uso de biofilmes.....	57
Tabela 3.5 - Propriedades físicas dos materiais suporte empregados em filtros percoladores.....	61
Tabela 3.6 - Características dos meios suportes utilizados por Harrison e Daigger (1987).....	62
Tabela 3.7 - Condições operacionais dos filtros no estudo realizado por Harrison e Daigger (1987).....	62
Tabela 3.8 - Concentração média de nitrogênio durante a taxa baixa de operação dos filtros – Fonte: Harrison e Daigger (1987).....	63
Tabela 3.9 - Informações típicas de projetos de filtros percoladores.	65
Tabela 3.10 - Concentrações de NTK, nitrogênio amoniacal e nitrato em um sistema PETRO.	66
Tabela 3.11 – Principais características do filtro biológico percolador.....	67
Tabela 3.12 - Características das quatro regiões principais do diagrama proposto por Anthonisen et al. (1976).....	74
Tabela 3.13 - Comparação dos valores relatados na literatura sobre a inibição da oxidação do nitrito pela amônia livre. Fonte: Philips et al. (2002).....	76

LISTA DE TABELAS - MATERIAIS E MÉTODOS

Tabela 4.1 - Dados de projeto do sistema de lagoas de estabilização de Lins/SP....	80
Tabela 4.2: Aspectos geométricos das lagoas pilotos.....	81
Tabela 4.3 - Condições operacionais inicialmente previstas.....	87
Tabela 4.4: Condições operacionais nos filtros percoladores em escala piloto.....	98
Tabela 4.5 - Rotina dos ensaios analíticos propostos: Lagoas rasas em escala piloto.	101
Tabela 4.6 - Rotina dos ensaios analíticos propostos - Filtro percolador em escala piloto.....	101
Tabela 4.7 - Rotina dos ensaios analíticos propostos: Lagoas piloto e filtro percolador.....	102
Tabela 4.8 - Parâmetros e métodos aplicados na investigação experimental.....	103

LISTA DE TABELAS - RESULTADOS E DISCUSSÕES

Tabela 5.1 - Principais critérios e parâmetros de projeto em um sistema australiano seguido de uma lagoa de maturação.....	115
Tabela 5.2 - Resumo estatístico da DBO Total e Filtrada – Fase 01.....	118
Tabela 5.3 - Resumo estatístico da DQO Total e Filtrada – Fase 01.....	120

Tabela 5.4 - Resumo estatístico de ST e STV – Fase 01.....	123
Tabela 5.5 - Resumo estatístico de SST e SSV – Fase 01.....	124
Tabela 5.6 - Resumo estatístico de coliformes totais e E.coli – Fase 01.....	126
Tabela 5.7 - Resumo estatístico pH – Fase 01 e 02.....	131
Tabela 5.8 - Resumo estatístico da DBO total e filtrada – Fase 02.....	133
Tabela 5.9 - Resumo estatístico da DQO total e filtrada – Fase 02.....	135
Tabela 5.10 - Resumo estatístico da Clorofila-a – Fase 02.....	136
Tabela 5.11 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 02.....	137
Tabela 5.12 - Resumo estatístico ST e STV – Comparação entre as fases 01 e 02.....	138
Tabela 5.13 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 02.....	139
Tabela 5.14 - Resumo estatístico Coliforme total e E.coli – Fase 02.....	140
Tabela 5.15 - Resumo estatístico pH – Fase 02 e 03.....	145
Tabela 5.16 - Resumo estatístico OD – Fase 02 e 03.....	146
Tabela 5.17 - Relação entre pH, consumo de alcalinidade e fração de NH ₃	148
Tabela 5.18 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 03.....	148
Tabela 5.19 - Comparação DBO total e filtrada – Fase 01, 02 e 03.....	149
Tabela 5.20: Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 03.....	151
Tabela 5.21 - Comparação DQO total e filtrada – Fase 01, 02 e 03.....	151
Tabela 5.22 - Resumo estatístico clorofila-a – Fase 03.....	153
Tabela 5.23 - Comparação clorofila-a – Fase 02 e 03.....	153
Tabela 5.24 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 03.....	154
Tabela 5.25 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 03.....	155
Tabela 5.26 - Comparação SST e SSV – Fases 01, 02 e 03.....	156
Tabela 5.27 - Resumo estatístico Coliformes totais e E.coli – Fase 03.....	157
Tabela 5.28 - Concentrações médias e remoções de coliformes totais.....	159
Tabela 5.29 - Concentrações médias e remoções de E.coli.....	159
Tabela 5.30: Comparação pH – Fases 03 e 04.....	162
Tabela 5.31 - Comparação pH – Fases 01 e 04.....	163
Tabela 5.32 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 04.....	164
Tabela 5.33 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 04.....	166
Tabela 5.34 - Resumo estatístico clorofila-a – Fase 04.....	168
Tabela 5.35 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 04.....	169
Tabela 5.36 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 04.....	170
Tabela 5.37 - Resumo estatístico coliformes totais e E.coli – Fase 04.....	172
Tabela 5.38 – Desempenho de uma série com 5 lagoas de estabilização no nordeste do Brasil.....	174
Tabela 5.39 - Resumo estatístico NTK – Fase 01.....	177
Tabela 5.40 - Resumo estatístico NTK – Fase 02.....	178
Tabela 5.41 - Resumo estatístico NTK – Fase 03.....	179
Tabela 5.42 - Resumo estatístico NTK – Fase 04.....	180
Tabela 5.43 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 01.....	183
Tabela 5.44 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 02.....	184
Tabela 5.45 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 03.....	185
Tabela 5.46 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 04.....	186
Tabela 5.47 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 01.....	208
Tabela 5.48 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 01.....	210
Tabela 5.49 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 01.....	211
Tabela 5.50 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 01.....	212
Tabela 5.51 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 02.....	218

Tabela 5.52 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 02.....	220
Tabela 5.53 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 02.....	221
Tabela 5.54 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 02.....	223
Tabela 5.55 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 03.....	229
Tabela 5.56 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 03.....	230
Tabela 5.57 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 03.....	232
Tabela 5.58 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 03.....	233
Tabela 5.59 – Características e desempenhos de filtros percoladores em sistemas de tratamento de esgotos domésticos.....	234
Tabela 5.60 - Resumo estatístico NTK – Fase 01.....	237
Tabela 5.61 - Resumo estatístico NTK – Fase 02.....	238
Tabela 5.62 - Resumo estatístico NTK – Fase 03.....	239
Tabela 5.63 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato – Fase 01.....	242
Tabela 5.64 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato – Fase 02.....	244
Tabela 5.65 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato – Fase 03.....	247
Tabela 5.66 - Concentração de nitritantes e nitratantes – Fase 03.....	260
Tabela 5.67 - Teste de hipótese para as taxas de aplicação hidráulica.....	262
Tabela 5.68 - Teste de hipótese para as eficiências.....	265

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CONAMA – Conselho Nacional do Meio Ambiente

CS – Carga Superficial

CV – Carga Volumétrica

DBO – Demanda Bioquímica de Oxigênio Total

DQO – Demanda Química de Oxigênio

ETE – Estação de Tratamento de Esgoto

ESALQ – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”

FA – Concentração de NH_3

FNA – Concentração de ácido nitroso

Fp – Filtro com enchimento de pedra (brita)

FpL – Filtro percolador com enchimento de anéis plásticos

NMP – Número mais Provável

NTK – Nitrogênio Total Kjeldahl

OD – Oxigênio Dissolvido

pH – Potencial Hidrogeniônico

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo

SST – Sólidos Suspensos Totais

SSV – Sólidos Suspensos Voláteis

ST – Sólidos Totais

STV – Sólidos Totais Voláteis

TAH – Taxa de Aplicação Hidráulica

TAS – Taxa de Aplicação Superficial

TAV – Taxa de Aplicação Volumétrica

TES – Taxa de Escoamento Superficial

TDH – Tempo de Detenção Hidráulica

Unilins – Centro Universitário de Lins

USP – Universidade de São Paulo

UV – Ultra Violeta

LISTA DE SÍMBOLOS

$^{\circ}\text{C}$ – graus Celsius

DBO_T – DBO total

DBO_F – DBO filtrada

DQO_T – DQO total

DQO_F – DQO filtrada

N_2 – Gás Nitrogênio

NH_3 – Amônia

NH_4 – Íon Amônio

NO_2^- - Nitrito

NO_3^- - Nitrato

O_2 – Gás Oxigênio

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	23
2 OBJETIVO.....	26
2.1 Objetivo geral.....	26
2.2 Objetivos específicos.....	26
3 REVISÃO DE LITERATURA.....	28
3.1 Estado da arte: Problema relativo à presença de nutrientes.....	28
3.2 Lagoas de estabilização– Princípios básicos.....	32
3.2.1 Lagoas facultativas.....	33
3.2.2 Dinâmica do nitrogênio em lagoas facultativas.....	34
3.2.3 Modelos propostos para remoção de nitrogênio em lagoas.....	39
3.2.3.1 Modelo proposto por Pano e Middlebrooks.....	39
3.2.3.2 Modelo proposto por Yánes Cossío.....	42
3.2.3.3 Modelo proposto por Senzia.....	45
3.2.3.4 Modelo dinâmico proposto por Reed, Beran e Kargi: Uma breve discussão	48
3.2.4 Comportamento hidrodinâmico.....	50
3.2.4.1 Aspectos gerais em hidrodinâmica de lagoas.....	50
3.2.4.2 Distribuição do tempo de residência.....	52
3.3 Reatores com biomassa aderida.....	56
3.3.1 Biofilme: Conceituação.....	57
3.3.2. Filtros percoladores.....	60
3.3.2.1 Pós-tratamento com filtros percoladores.....	65
3.3.2.2 Nitrificação em filtros percoladores - Aspectos gerais.....	68
3.3.2.2.1 Inibição da nitratação - Aspectos gerais.....	71
4 MATERIAS E MÉTODOS.....	78
4.1 Descrição geral da pesquisa.....	78
4.2 Descrição da bancada experimental.....	79
4.2.1 Descrição das lagoas em escala real.....	79
4.2.2 Descrição das lagoas piloto.....	81
4.2.2.1 Etapas de operação e condições operacionais.....	85
4.2.2.2 Coletas de amostras.....	88
4.2.2.3 Ensaio hidrodinâmico.....	89
4.2.2.3.1 Escolha do tipo de traçador	89
4.2.2.3.2 Cálculo do volume de traçador a ser utilizado e tratamento das amostras.....	90
4.2.2.3.3 Rotina do ensaio hidrodinâmico.....	91
4.2.3 Descrição dos filtros percoladores.....	92
4.2.3.1 Decantadores.....	96
4.2.3.2 Etapas de operação e condições operacionais.....	97
4.2.3.3. Coletas de amostras.....	99
4.3 Técnicas analíticas.....	100
4.3.1 Parâmetros físico-químicos e biológicos.....	100
4.4 Tratamento estatístico dos dados.....	103
5. RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	106
5.1 Resultados experimentais – lagoas piloto.....	106
5.1.1 Estudo de caracterização do escoamento das lagoas em escala piloto	107
5.1.1.1 Ensaio hidrodinâmico – Determinação das curvas de distribuição dos dos tempos de residência.....	107

5.1.1.2 Perfis de oxigênio, pH e temperatura – Lagoa Piloto (h=1,00m).....	109
5.1.1.3 Perfis de oxigênio, pH e temperatura – Lagoa Piloto (h=0,50m).....	112
5.1.2 Resultados do monitoramento – Fase 01.....	114
5.1.2.1 Parâmetros de controle - Fase 01.....	114
5.1.2.2 Condições ambientais nas lagoas – Fase 01.....	115
5.1.2.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 01....	118
5.1.2.4 Coliformes – Fase 01.....	126
5.1.3 Resultados do monitoramento – Fase 02.....	129
5.1.3.1 Parâmetros de controle – Fase 02.....	129
5.1.3.2 Condições ambientais nas lagoas – Fase 02.....	130
5.1.3.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 02....	133
5.1.3.4 Coliformes – Fase 02.....	140
5.1.4. Resultados do monitoramento – Fase 03.....	142
5.1.4.1 Parâmetros de controle – Fase 03.....	143
5.1.4.2 Condições Ambientais nas lagoas – Fase 03.....	144
5.1.4.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 03....	148
5.1.4.4 Coliformes – Fase 03.....	157
5.1.5 Resultados do monitoramento – Fase 04.....	160
5.1.5.1 Parâmetros de controle – Fase 04.....	160
5.1.5.2 Condições ambientais nas lagoas – Fase 04.....	161
5.1.5.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 04....	164
5.1.5.4 Coliformes – Fase 04.....	172
5.1.6 Resultados do monitoramento das formas nitrogenadas – Fases 01, 02, 03 e 04.....	175
5.1.6.1 Taxas de aplicação de NTK.....	175
5.1.6.2 Monitoramento do Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) - Fases 01, 02, 03 e 04.....	177
5.1.6.3 Monitoramento do Nitrogênio Amoniacal - Fases 01, 02, 03 e 04...183	
5.1.6.4 Efeito da temperatura, pH e OD sobre a concentração de nitrogênio amoniacal efluente - Fases 01, 02, 03.....	189
5.1.6.5 Perfil de concentração de nitrogênio Amoniacal ao longo do comprimento da lagoa - Fases 01, 02 e 04.....	194
5.1.6.6 Relação entre a razão de nitrogênio amoniacal efluente e afluente com a taxa de aplicação superficial de NTK.....	197
5.1.6.7 Discussões Adicionais: Balanço de massa de nitrogênio amoniacal	199
5.2 Resultados experimentais – Filtro Percolador.....	203
5.2.1 Resultados do monitoramento – Fase 01.....	203
5.2.1.1 Parâmetros de controle – Fase 01.....	203
5.2.1.2 Condições ambientais no filtro percolador – Fase 01.....	205
5.2.1.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO e Sólidos – Fase 01.....	208
5.2.2 Resultados do monitoramento – Fase 02.....	214
5.2.2.1 Parâmetros de controle – Fase 02.....	214
5.2.2.2 Condições ambientais no filtro percolador – Fase 02.....	216
5.2.2.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO e Sólidos – Fase 02.....	218
5.2.3 Resultados do monitoramento – Fase 03.....	224
5.2.3.1 Parâmetros de controle – Fase 03.....	224
5.2.3.2 Condições ambientais nos filtros percoladores – Fase 03.....	226
5.2.3.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO e Sólidos – Fase 03.....	228

5.2.4. Resultados do monitoramento das formas nitrogenadas – Fases 01,02 e 03.....	235
5.2.4.1. Taxas de aplicação de NTK.....	235
5.2.4.2 Monitoramento do Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) - Fases 01, 02, 03 e 04.....	237
5.2.4.3 Monitoramento do nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato - Fases 01, 02, 03.....	241
5.2.4.4. Monitoramento do NTK, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato - Fase 04.....	249
5.2.4.5 Distribuição das formas nitrogenadas (Nitrogênio Amoniacal, Nitrito e Nitrato) ao longo da altura do filtro- Fase 02 e 03.....	253
5.2.4.6 Condições de operação e zonas de acúmulo de nitrito.....	255
5.2.5 Efeito do tipo de meio suporte sobre a transformação do nitrogênio amoniacal no filtro percolador.....	261
5.2.5.1. Teste de comparação de duas médias para as taxas de aplicação hidráulica considerando amostras retiradas na fase 01,02 e 03.....	262
5.2.5.2 Comparação das eficiências no desaparecimento do nitrogênio amoniacal.....	263
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	267
7 CONCLUSÕES.....	272
8 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	274
9 REFERÊNCIAS.....	275
APÊNDICE A	281
APÊNDICE B	328
APÊNDICE C	363
APÊNDICE D	364

1 INTRODUÇÃO

O uso de lagoas de estabilização para tratamento de esgoto municipal, frequentemente, é citado na literatura como sendo uma alternativa viável para o tratamento dos efluentes em cidades de pequeno e médio porte.

São caracterizados como sistemas naturais, não necessitando, portanto, de uma mecanização sofisticada e os cuidados existentes, que são inerentes a qualquer sistema, ficam centrados apenas nas operações de monitoramento da qualidade do efluente e manutenção.

Se por um lado, a simplicidade é a palavra-chave quando o foco principal é o custo envolvido, a questão de falta disponibilidade de áreas nos grandes centros vem tornando o uso de lagoas como uma alternativa inviável, preferindo-se sistemas compactos.

Outro aspecto é a qualidade esperada do efluente. A literatura traz poucas informações sobre o desempenho de lagoas no tocante às remoções de nitrogênio. Embora esses sistemas sejam indicados com relação à remoção de patógenos (helmintos e coliformes), na maioria das vezes, seus efluentes não apresentam concentrações aceitáveis para lançamento, quando o foco principal é a remoção de nutrientes como nitrogênio e fósforo. Além disso, esbarra-se no problema relativo à presença de algas no efluente.

Considerando que a capacidade de diluição dos rios e lagos, localizados no interior do estado de São Paulo, seja baixa, verifica-se a problemática dos efluentes de lagoas para atingirem valores de concentração de clorofila-a, nitrogênio e fósforo dentro dos limites impostos pela legislação. Mas deve-se levar em consideração que, normalmente, é necessária a associação de processos para o atendimento de todos os quesitos de qualidade.

Atualmente, existem registros de cerca de 300 lagoas operando no estado de São Paulo e outras centenas operando em todo território nacional. Em 2006, com a perspectiva de adoção da Resolução CONAMA 357/2005, que limitava a concentração de amônia em 20mgN/L para lançamento nos corpos receptores, esses sistemas apresentaram dificuldades para atender a esse padrão, havendo

então, necessidade de estudar alternativas técnicas e economicamente viáveis para a complementação do tratamento.

Uma mudança no Artigo 34, por meio da Resolução N° 397/2005 estabeleceu a suspensão temporária do padrão de lançamento do nitrogênio amoniacal nos efluentes das estações de tratamento de esgoto, valendo as concentrações limites dos corpos receptores estabelecidas na Resolução CONAMA 357/2005. Entretanto, a tendência global é tornar os padrões cada vez mais restritivos. Isto posto, o refinamento na qualidade dos efluentes é algo que deve ser perseguido com propostas de novas pesquisas que contemplem essa tendência.

Dentro desse contexto, o presente trabalho tem como proposta estudar a viabilidade de tratamento complementar de efluente de lagoas facultativas, adotando sistemas que contemplem eficiência, facilidade operacional e baixo custo. O trabalho segue, paralelamente, com as pesquisas sobre o uso de efluente de lagoas na irrigação de culturas vegetais.

Os efluentes provenientes de lagoas são ricos em nitrogênio e fósforo, constituindo essa característica, às vezes, um obstáculo para lançamento em corpos receptores de natureza lânticos, mas sendo de grande valor na cadeia nutricional das plantas.

A união das duas operações, tratamento e uso como insumo agrícola, é bastante motivadora, em termos de custos, e coloca a questão do saneamento dentro de uma visão mais atual e sistêmica. Entretanto a prática de irrigação é dependente das condições climáticas. Além disso, existe a possibilidade de salinização do solo, ocasionando a diminuição da porosidade e a sua própria contaminação por patógenos e metais pesados. Sendo assim, essa prática não pode ser utilizada continuamente, sendo necessário o tratamento desses efluentes na ocasião de interrupção da irrigação.

Para estudar a viabilidade de remoção de nitrogênio em lagoas facultativas, em unidades complementares, foram adotados dois tipos de sistemas. O primeiro sistema constitui-se de lagoas rasas em escala piloto onde, espera-se, com as devidas taxas de aplicação, altas temperaturas e alta produção algal, elevar o pH até o limite onde o equilíbrio da amônia seja deslocado para a forma NH_3 gasosa e, a partir dessa situação, com as altas concentrações de oxigênio do meio líquido, arrastar parte do nitrogênio amoniacal para atmosfera produzindo um

efluente com baixas concentrações desse constituinte. Num primeiro momento, a adoção de lagoas complementares não parece ser uma alternativa promissora, principalmente, frente às discussões sobre a clorofila-a. Entretanto, uma frente de pesquisadores da USP, que tinham como objetivo adequar os efluentes aos padrões aceitáveis de lançamento nos corpos receptores, principalmente no que se refere à remoção de organismos patogênicos e clorofila-a, desenvolveram, em 2001, estudos de caracterização dos efluentes, de pós-tratamento por processo físico-químico, visando à remoção de algas e de fósforo, bem como a desinfecção final por cloração e aplicação de radiação ultravioleta.

A cloração demonstrou-se eficiente na redução da densidade bacteriana do efluente a um custo relativamente baixo. O emprego de coagulantes químicos como o sulfato de alumínio e o cloreto férrico demonstrou-se eficiente para a remoção de fósforo e de clorofila-a do efluente da facultativa, tanto com separação de sólidos por decantação acelerada, como e, principalmente por flotação com ar dissolvido. Remoção de fósforo e clorofila-a acima de 90% pôde ser obtida.

Outra via de remoção a ser verificada é o caminho biológico, impondo situações que favoreçam o processo de nitrificação. O segundo sistema proposto foi o tratamento complementar utilizando Filtros Biológicos Percoladores. As concentrações significativas de oxigênio nos efluente de lagoas e as baixas concentrações de matéria orgânica solúvel são condições que favorecem a remoção biológica da amônia, mesmo com taxas de aplicação relativamente mais altas, acreditando-se que seja possível a manutenção de taxas de aplicação relativamente altas, resultando em filtros com volumes não muito grandes, tornando-os relativamente viáveis.

Desta forma, o trabalho procura verificar a viabilidade de tratamento complementar, através de lagoas de polimento rasas e filtros percoladores, mantendo-se na proposta de sistemas de fácil operação e baixo custo, associando-se as remoções com taxas de aplicação e outros parâmetros de controle.

2 OBJETIVO

2.1 OBJETIVO GERAL

Estudar a remoção de nitrogênio amoniacal de efluente de lagoas facultativas, através de tratamento complementar, visando enquadrar os efluentes dentro dos limites impostos pela legislação para lançamento em corpos receptores.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Associar as taxas superficiais de aplicação com as concentrações efluentes de nitrogênio amoniacal nas lagoas complementares.
- Avaliar a influência da profundidade das lagoas complementares sobre a remoção de nitrogênio amoniacal.
- Avaliar a influência das condições operacionais e ambientais sobre o desempenho das lagoas complementares na remoção de nitrogênio amoniacal.
- Avaliar o desempenho das lagoas complementares na remoção de matéria orgânica, sólidos, coliformes totais e E.coli, objetivando o atendimento de múltiplas qualidades do efluente das lagoas.
- Avaliar o efeito das condições hidrodinâmicas sobre a remoção do nitrogênio amoniacal, coliformes totais e E.coli.
- Determinar o número de dispersão das lagoas e avaliar o modelo de fluxo;
- Avaliar a eficiência no filtro percolador e comparar o desempenho de dois diferentes meios suportes sobre a remoção de nitrogênio amoniacal.
- Avaliar o desempenho do filtro percolador na remoção de matéria orgânica.

- Avaliar a influência das taxas de aplicação superficial e volumétrica sobre o processo de nitrificação.
- Avaliar a influência do pH, temperatura e concentrações de amônia livre no processo de nitrificação do filtro percolador.
- Avaliar a taxa de aplicação máxima no filtro sem que ocorra prejuízo da nitrificação.

3 REVISÃO DE LITERATURA

3.1 ESTADO DA ARTE: PROBLEMA RELATIVO À PRESENÇA DE NUTRIENTES

A eutrofização pode ser entendida como um processo de enriquecimento do meio aquático por nutrientes. Os principais nutrientes envolvidos nesse processo são o nitrogênio e fósforo.

Do ponto de vista ambiental, o processo de eutrofização deve ser considerado como um problema sério, pois causa a degradação química das águas e dos ecossistemas. Pode-se citar problemas de ordem estética, recreacionais e de navegabilidade devido ao crescimento de macrófitas. Além disso, o crescimento excessivo de algas pode exercer um efeito de toxicidade nos meios aquáticos, acarretando problemas com o abastecimento humano e industrial. A presença de nitrogênio amoniacal em pH elevados pode provocar a mortandade de peixes, devido à toxicidade desse elemento, mesmo em reduzidas concentrações, para uma grande maioria de espécies.

A eutrofização das águas é caracterizada pelo crescimento excessivo de algas e plantas aquáticas, podendo ocorrer em corpos d'águas naturais ou reservatórios artificiais. Algumas condições específicas sobre os escoamentos devem ser atendidos para que o processo ocorra. Na maioria dos casos, onde o processo se desenvolve, os escoamentos são caracterizados como sendo de natureza lântica, ou seja, baixas velocidades. Entretanto, ocorrências de eutrofização em rios com velocidades elevadas foram observadas, podendo ser citado o caso do rio Tapajós (von SPERLING et al., 2009a).

As atividades antropogênicas, que aumentam os níveis de fósforo e outros nutrientes nos recursos hídricos e o lançamento de águas não tratadas ou parcialmente tratadas, podem ser apontadas, segundo Haper (1992, apud ZANOTELLI, 2002), como um dos principais agentes causadores do processo eutrofização.

Para Oliveira (2005), o impacto causado pelo lançamento de efluentes das estações de tratamento nos corpos receptores tornou-se um motivo de grande preocupação para maioria dos países. Desta maneira, as legislações e as políticas públicas ambientais devem procurar levar em consideração, nas suas decisões, questões como a seleção dos locais de descarga e o nível de tratamento a ser alcançado para garantir que os impactos ambientais, provocados pela disposição dos efluentes tratados, sejam aceitáveis.

No Brasil, a Resolução CONAMA 357/05, que fornece as diretrizes para o lançamento de esgoto e a proteção dos corpos superficiais de água, estipulou como padrão de lançamento de nitrogênio amoniacal uma concentração de 20mg/L, não havendo padrões de lançamento para nitrito, nitrato e fósforo. Entretanto, a Resolução 397/2008 suspendeu temporariamente este padrão.

A Tabela 3.1 apresenta dados coletados em 166 ETEs distribuídas no estado de São Paulo e Minas Gerais.

Tabela 3.1 - Concentração e eficiências médias de remoção dos diversos constituintes

Constituinte		Unid.	FS+FA	LF	LAN+LF	LA	UASB	UASB +POS
DBO	Afluente	(mg/L)	665	553	510	315	371	362
	Efluente	(mg/L)	292	136	89	35	98	42
	Eficiência remoção	%	59	75	82	85	72	88
DQO	Afluente	(mg/L)	1398	1187	1095	575	715	713
	Efluente	(mg/L)	730	525	309	92	251	141
	Eficiência remoção	%	51	55	71	81	59	77
SST	Afluente	(mg/L)	479	430	411	252	289	334
	Efluente	(mg/L)	165	216	153	57	85	51
	Eficiência remoção	%	66	48	62	76	67	82
NTK	Afluente	(mg/L)	78	69	78	47	43	
	Efluente	(mg/L)	61	38	45	22	48	
	Eficiência remoção	%	24	44	39	50		24
PT	Afluente	(mg/L)	9	9	11	3	7	7
	Efluente	(mg/L)	7	4	7	1	6	5
	Eficiência remoção	%	30	46	36	46		23
CF	Afluente	NMP	$2,6 \times 10^7$	$5,3 \times 10^7$	$2,0 \times 10^8$	$3,7 \times 10^7$	$1,2 \times 10^8$	$1,8 \times 10^8$
	Efluente	NMP	$5,3 \times 10^6$	$1,2 \times 10^6$	$4,3 \times 10^5$	$1,3 \times 10^5$	$3,4 \times 10^7$	$9,7 \times 10^6$
	Eficiência remoção	log	0,9	1,6	2,2	2	0,6	2,8

Fonte: (OLIVEIRA, 2005)

FS+FA= fossa séptica + filtro anaeróbio; LAN+LF = lagoa anaeróbia + lagoa facultativa; UASB+POS= reator UASB + pós-tratamento.

(*) Para coliformes, os valores referem-se à média geométrica das concentrações.

Considerando que 70% do valor do NTK seja creditado à concentração de nitrogênio amoniacal, observa-se que, a grande maioria dos sistemas apresentam concentrações efluentes superiores a 20 mg/L de nitrogênio amoniacal, necessitando de tratamento complementar.

Segundo Zimmo et al. (2004), as atuais tecnologias para o tratamento de águas residuárias, como processo de lodos ativados visando a remoção de nutrientes, apresentam custos elevados para regiões em desenvolvimento que sofrem com o crescente problema de tratamento de suas águas residuárias. O autor comenta no mesmo artigo, que lagoas de estabilização são sistemas de custos operacionais baixos e reconhecidos pela sua capacidade de alcançar remoções significativas de poluentes orgânicos e patógenos. Entretanto, a remoção de nitrogênio ainda não foi estudada com grandes detalhes.

Senzia et al. (2002), durante seus estudos sobre a transformação e remoção do nitrogênio em lagoas facultativas primárias, comentam que as lagoas são projetadas para remover matéria orgânica e bactéria fecal. O resultado desse procedimento é a existência de pouca informação sobre as rotas de transformação e remoção do nitrogênio em lagoas. Diversos autores como Pano e Middlebrooks (1982), Ferrara e Avci (1982), Lai e Lam (1997), Muttamara e Puetpaiboon (1996), Soares et al. (1996) e Maynard et al. (1999), também publicaram trabalhos, anteriores aos apresentados por Senzia et al. (2002) e Zimmo et al. (2004), chamando a atenção para o fato das maiores das lagoas serem projetadas tendo como objetivo principal a remoção de matéria orgânica e patógenos, gerando pouca informação sobre a remoção de nitrogênio neste processo.

Para Abis e Mara (2003 apud VALERO, MARA, 2007), as lagoas de estabilização não são ainda consideradas como alternativa técnica para a remoção de nitrogênio, entretanto, estudos recentes mostram que o nitrogênio pode ser removido a níveis de concentração abaixo de 5mg/L, tanto no inverno quanto no verão. Contudo, os critérios de projeto para a efetiva remoção de nitrogênio amoniacal não estão bem estabelecidos. Dentro das argumentações impostas anteriormente, nota-se o grande potencial apresentado pelas lagoas como alternativa viável para o pós- tratamento de lagoas existentes que não atendem aos critérios de lançamento.

Outro caminho a ser perseguido é a remoção da amônia pela via biológica. Os filtros percoladores, assim como as lagoas de estabilização, também apresentam baixos custos operacionais. Entretanto, ainda são escassos na literatura, trabalhos que explorem o uso de filtros como pós-tratamento de lagoas facultativas.

Existem trabalhos que relatam a experiência de filtros operando como pós-tratamento de processos anaeróbios. Silva (2005) conduziu estudos sobre a viabilidade de pós-tratamento de efluentes de UASB utilizando filtros percoladores com ausência da etapa de clarificação, concluindo que os filtros produziram efluentes com boa qualidade, apresentando concentrações médias de DQO menores que 90 mg/L.

Fonseca (2009) realizou um estudo semelhante, utilizando filtro percolador como pós tratamento de UASB, tendo como objetivo principal a remoção

de nitrogênio amoniacal.

Pressinotti e Krampe (2002) avaliaram o desempenho de filtros percoladores aplicados a esgoto decantado, tendo obtido a nitrificação do esgoto a partir de taxas de aplicação de $0,1 \text{ kgNKT.m}^{-3}.\text{d}^{-1}$.

Outras concepções de tratamento que incorporam filtros percoladores podem ser encontradas na literatura. Pode-se citar o processo PETRO (*Pond Enhanced Treatment and Operation*) no qual é considerado, segundo Shiping et al. (1999), como um sistema híbrido que incorpora uma lagoa facultativa ou anaeróbia primária, uma lagoa secundária e um filtro percolador em um projeto integrado. O objetivo principal dessa concepção é a remoção de algas dos efluentes finais.

De acordo com Meiring et al. (1995), a aplicação deste processo, que objetiva principalmente a remoção de algas do efluente da lagoa, resultou em 98% de remoção de nitrogênio amoniacal em um sistema implantado na África do Sul.

3.2 LAGOAS DE ESTABILIZAÇÃO– PRINCÍPIOS BÁSICOS

As lagoas de estabilização são caracterizadas como sistemas que empregam processos biológicos. A estabilização da matéria orgânica é realizada pela ação de microrganismos, via oxidação aeróbia ou fermentação anaeróbia.

Dependendo das atividades microbiológicas e as reações prevaletentes para a estabilização da matéria orgânica, as lagoas de estabilização podem ser classificadas como: anaeróbias, facultativas e de maturação.

Em uma planta de tratamento de águas residuárias, diversas configurações podem ser admitidas com a finalidade de alcançar uma qualidade de efluente compatível com a capacidade do corpo receptor e enquadrar seus efluentes dentro dos limites impostos pela legislação de cada país ou estado.

Para Kellner e Pires (1998), quando as lagoas de estabilização começaram a ser utilizadas como sistemas de tratamento, muitos pesquisadores procuraram descrever relações ou modelos matemáticos para seu dimensionamento. Alguns modelos são construídos a partir de observações entre suas eficiências e taxas de aplicação sob condições específicas locais. Esse tipo de

abordagem, classificada como relações empíricas, tem grande aplicabilidade nos projetos de engenharia, embora distanciam-se um pouco de uma abordagem mais geral.

Outra forma de entender o comportamento de lagoas de estabilização é empregando modelos mais racionais. Esses modelos se baseiam na identificação das variáveis internas e externas envolvidas no processo de tratamento e suas relações, permitindo a predição do comportamento dessas lagoas sob as mais diversas condições de operação. Embora esses modelos proponham uma abordagem mais geral, eles envolvem expressões matemáticas geralmente complexas para descreverem os fenômenos que ocorrem nas lagoas. Segundo Kellner (1998), os modelos racionais não descrevem completamente a realidade, mas fornece aproximações bastante úteis aos projetistas

3.2.1 Lagoas facultativas

As lagoas facultativas podem ser consideradas como a modalidade mais simples entre as lagoas de estabilização. Nessas lagoas ocorre a retenção dos efluentes por um período de tempo, até que se desenvolvam os processos de estabilização da matéria orgânica (VON SPERLING, 1996).

A classificação como facultativa ocorre pela presença de uma zona facultativa localizada entre a zona aeróbia e anaeróbia. Sua operação está baseada nas relações simbióticas existentes entre bactérias e algas.

A atividade fotossintética desenvolvida pela biomassa algal fornece o oxigênio necessário para a respiração de outros microrganismos (bactérias) durante o processo de oxidação da matéria orgânica. Em contrapartida, as bactérias fornecem o carbono inorgânico necessário para a construção de material celular das algas. Além do carbono, as algas necessitam de nitrogênio e fósforo para se desenvolverem.

O consumo de CO_2 ocasiona a elevação do pH, podendo, dependendo da atividade fotossintética, atingir valores superiores a 9,0, contribuindo para formação

de NH_3 .

Se as condições forem favoráveis, dois processos poderão contribuir para a queda de alcalinidade, exercida pela presença de amônia, na lagoa. O primeiro é o processo de retirada de amônia para atmosfera via volatilização e o segundo pela incorporação da amônia pela biomassa algal.

O desempenho dessas lagoas está intimamente ligado às condições climáticas e de temperatura local. Seus critérios de dimensionamentos podem ser baseados em modelos racionais, entretanto, comumente, os projetistas tomam como base modelos que levam em conta o desempenho pretendido, com suas taxas de aplicação superficial e tempo de retenção dos afluentes.

Yáñez (2001), chama atenção sobre a questão da toxicidade exercida pela amônia na biomassa algal quando as lagoas operam em conjunto com lagoas anaeróbias. O autor comenta ainda que o limite entre lagoas facultativas e lagoas predominantemente anaeróbias está determinado pela máxima carga facultativa.

3.2.2 Dinâmica do nitrogênio em lagoas facultativas

O nitrogênio encontra-se inserido nos meios aquáticos na forma de sólidos em suspensão e dissolvido. Sua origem está associada a compostos orgânicos, sendo um elemento necessário na síntese de proteínas nos diversos organismos vivos, desde organismos simples, como bactérias, algas, até animais superiores. Sua inserção também pode ocorrer devido às atividades antropogênicas, como despejos industriais, domésticos e uso de fertilizantes na agricultura.

Segundo Assunção (2009), os compostos nitrogenados podem ser transformados em diversas espécies com diferentes níveis de oxidação. Essas transformações estão relacionadas com as atividades bioquímicas desempenhadas por uma gama de organismos vivendo em diferentes ambientes como: aeróbio, anaeróbio e anóxico. Além disso, alguns processos químicos podem mudar a espécie nitrogenada. A amônia pode existir na sua forma livre (NH_3) ou iônica (NH_4^+), dependendo do pH da solução (METCALF & EDDY INC. 2004), como pode ser

verificado através da eq.(3.1) do equilíbrio químico.

Como a distribuição de cada espécie depende do valor do pH no meio aquoso, a porcentagem de amônia livre e na forma iônica pode ser determinada em termos percentuais, segundo Metcalf & Eddy Inc (2004), através da eq. (3.2).

$$NH_3 = \frac{100}{1 + [H^+]/K_a} \quad (3.2)$$

O gráfico da Figura 3.1 mostra a curva de distribuição das espécies de amônia em função do pH baseadas na solução da eq. (3.2).

Figura 3.1 - Distribuição das espécies de amônia em função do pH.
Adaptado: Metcalf & Eddy Inc, 2004

As formas nitrogenadas mais comumente encontradas nos meios aquáticos, incluindo as lagoas fotossintéticas, são o nitrogênio orgânico, amônia

(NH_3 e NH_4^+), nitrito (NO_2^-), nitrato (NO_3^-) e nitrogênio molecular (N_2) (gás).

Nos sistemas naturais aquáticos, as principais transformações do nitrogênio são influenciadas pelas condições climáticas e pelas interações entre os diversos microrganismos que, por sua vez, são influenciados pelas condições locais onde estão inseridos.

A Figura 3.2 apresenta um esquema que descreve as transformações ocorridas nos sistemas aquáticos, ressaltando que a ocorrência de certas transformações está diretamente ligada aos fatores ambientais locais que favoreçam o desenvolvimento de certas comunidades de microrganismos específicas para cada transformação ou mesmo de condições físicas e químicas (pH e temperatura).

Figura 3.2 - Formas de nitrogênio em sistemas aquáticos.
Adaptado: Patrick et al. (1997)

Pelo modelo apresentado na figura 3.2, observa-se que o aporte de nitrogênio, nos ecossistemas aquáticos, encontra-se na forma de nitrogênio orgânico e amoniacal. Parte do nitrogênio orgânico irá sedimentar-se e a parcela restante será hidrolisada (amonificação), tendo como resultante desse processo a formação de nitrogênio amoniacal.

O nitrogênio amoniacal poderá sofrer três processos distintos, podendo ocorrer simultaneamente. Pelo modelo adaptado de Patrick et al. (1997), nota-se que uma parcela do nitrogênio amoniacal irá sofrer oxidação biológica, em um processo conhecido como nitrificação, com a formação de nitrato. As bactérias nitrossomonas irão converter o nitrogênio amoniacal a nitrito e, posteriormente, as nitrobacter irão oxidar o nitrito a nitrato. As eqs. (3.3) e (3.4) apresentam as relações estequiométricas envolvidas na nitrificação.

As bactérias nitrificantes devem competir com as heterotróficas pelo oxigênio dissolvido no meio líquido, uma vez que, pelas relações estequiométricas, 4,57 g O₂ devem ser consumidos para cada grama de nitrogênio amoniacal oxidado. Da mesma forma, algas e nitrificantes deverão competir pelo carbono inorgânico, pois ambas usam o mesmo carbono como fonte de material celular.

Outro aspecto que pode ser observado é o consumo de alcalinidade envolvida no processo. Entretanto, esse parâmetro não deve ser considerado sozinho como indicativo de que a nitrificação tenha ocorrido. A presença de nitrogênio amoniacal irá contribuir com a alcalinidade do meio e, no processo de volatilização, poder-se-ia observar alteração da alcalinidade, levando a um julgamento errado sobre a ocorrência de nitrificação em ecossistemas aquáticos.

As algas existentes nas lagoas fotossintéticas irão assimilar parte do nitrogênio amoniacal e outra parcela, devido à atividade fotossintética, tendo como resultado a elevação do pH a valores acima de 9,0, irá sofrer dessorção para a atmosfera (volatilização da amônia). A volatilização e a desnitrificação, caso haja condições favoráveis para a ocorrência dos dois processos, constituirão as vias de remoção de nitrogênio.

Segundo Senzia et al. (2003) a taxa de volatilização (**rv**) de N-NH_{3(g)} depende da concentração de amônia livre no líquido, da profundidade das lagoas fotossintéticas e do coeficiente de transferência de massa, referenciado pelo autor como sendo K_L. A taxa de volatilização é dada pela eq. (3.5).

$$rv = \frac{NH_3 - N_{(g)} \times K_L}{d} \quad (3.5)$$

sendo: rv = taxa de volatilização (mg/L.d)
 $NH_3 - N_{(g)}$ = Concentração de amônia livre (mg/L);
 d = profundidade da lagoa (m).

O coeficiente de transferência de massa (K_L) como proposto por Stratton (1968, 1969), apud Senzia et al. (2003), pode ser calculado pela eq. (3.6).

$$K_L = 0,0566 \times e^{0,13(T-20)} \quad (3.6)$$

Zimmo et al. (2004), partindo da suposição que a concentração de amônia na atmosfera é próxima de zero, estima a taxa de volatilização da amônia também conforme a eq. (3.5).

A remoção de nitrogênio em lagoas facultativas pode ocorrer segundo Pano e Middlebrooks (1982) através de três processos:

- Volatilização da amônia;
- Assimilação na biomassa algal;
- Nitrificação biológica.

Segundo Pano e Middlebrooks (1982), devido a baixa concentração de nitrito e nitrato encontrada no efluente das lagoas, a nitrificação nesse tipo de sistema terá uma contribuição insignificante. Entretanto, nos trabalhos publicados por Sensia et al. (2003) e Zimmo (2004), o processo de sedimentação do nitrogênio associado a biomassa, a nitrificação e a desnitrificação, aparecem como sendo a principal via de remoção de nitrogênio em lagoas fotossintéticas.

Mara e Pearson (1986) concluíram no seu trabalho que a nitrificação e a desnitrificação não foram as principais vias de remoção do nitrogênio em lagoas de estabilização, devido à falta de área disponível para o crescimento aderido das bactérias envolvidas no processo de nitrificação e desnitrificação.

Ferrara e Avci (1982) argumentaram que a sedimentação do nitrogênio orgânico é o mecanismo predominante na remoção do nitrogênio em lagoas facultativas, corroborando as conclusões obtidas por Sensia et al (2003).

Vários estudos mostraram o processo de volatilização como sendo a principal via de remoção do nitrogênio. Pode-se citar os trabalhos publicados por Silva et al. (1995) e Soares et al. (1996). Para Maynard et al. (1999) existe um desacordo sobre os mecanismos envolvidos na remoção do nitrogênio. Os aspectos contraditórios que norteiam o tema também podem ser verificados no trabalho publicado por Reed (1985), demonstrando, levando-se em conta a ordem cronológica das citações, que o problema ainda constitui um campo aberto na pesquisa científica.

Zimmo et al. (2004) relata que, quantificar e conhecer as rotas de transformação do nitrogênio é importante no dimensionamento de lagoas e na produção de efluentes que permitam a sua disposição e utilização na irrigação de culturas de maneira segura. O entendimento sobre a dinâmica do nitrogênio em lagoas fotossintéticas servirá como ferramenta de validação de modelos matemáticos, que, baseados em considerações mais racionais, poderão ser utilizados no gerenciamento de estações.

Além disso, as relações entre os fluxos e taxas de aplicação associadas ao nitrogênio permitirão o desenvolvimento de modelos empíricos mais consistentes, que contemplem a simplicidade no dimensionamento e gerenciamento de lagoas, aliados aos modelos racionais.

3.2.3 Modelos propostos para remoção de nitrogênio em lagoas.

3.2.3.1 Modelo proposto por Pano e Middlebrooks

Pano e Middlebrooks (1982) propõem um modelo baseado em um simples balanço de massa considerando apenas a fração de nitrogênio que entra no

sistema, a fração perdida para atmosfera pelo processo de volatilização e a parcela que deixa o sistema.

A construção do modelo parte do pressuposto que, em baixas temperaturas, quando a atividade biológica sofre uma redução, e considerando todo conteúdo da lagoa bem misturado pela própria ação do vento, o processo de volatilização da amônia será a principal via de remoção do nitrogênio amoniacal em lagoas facultativas. Para os autores, a taxa de volatilização pode ser modelada considerando uma reação de primeira ordem. O balanço de massa sobre uma lagoa completamente misturada pode ser representado pela eq. (3.7)

$$V \frac{dC}{dt} = Q(C_0 - C_e) - \underbrace{kA(NH_3)}_{\text{parcela volatilizada}} \quad (3.7)$$

sendo: Q = vazão (m^3/d)

C_0 = Concentração afluente de amônia [$NH_4^+ + NH_3$] (mg_N/L);

C_e = Concentração efluente de amônia [$NH_4^+ + NH_3$] (mg_N/L);

C = Concentração média de amônia na lagoa [$NH_4^+ + NH_3$] (mg_N/L);

V = volume da lagoa (m^3);

k = coeficiente de transferência de massa (m/d);

A = área superficial da lagoa (m^2);

t = tempo (dias);

Ao considerar que a taxa de volatilização pode ser representada por uma reação de primeira ordem, o autor considera que esta taxa é diretamente proporcional à concentração de amônia no interior da lagoa. Levando em consideração a equação de equilíbrio para a dissociação da amônia, a representação da concentração de amônia livre, segundo Pano e Middlebrooks (1982), pode ser expressa pela eq. (3.8).

$$NH_3 = \frac{C}{1 + 10^{pkw - pkb - pH}} \quad (3.8)$$

sendo

- kb = constante de dissociação da amônia;
- kw = constante de dissociação da molécula de (definido como produto iônico da água);
- pkb = -log kb;
- pkw = -log kw;
- C = $NH_4^+ + NH_3$ (mg_N/L).

Supondo que as lagoas estejam em regime permanente e sob condições de mistura completa, resultando $C_e = C$, e substituindo a equação (3.8) em (3.7) obtém-se a equação (3.9) que associa a concentração de nitrogênio amoniacal efluente com a concentração afluente em função da taxa de aplicação hidráulica, pH e temperatura. O efeito da temperatura está implícito nos termos de pkw e pkb.

$$\frac{C_e}{C_0} = \frac{1}{1 + \frac{A}{Q} k \left[\frac{1}{1 + 10^{pkw - pkb - pH}} \right]} \quad (3.9)$$

A equação (3.9) é fortemente dependente das condições climáticas e locais, já que nos pressupostos da construção do modelo foi considerado o efeito do vento sobre a condição de mistura da lagoa, submetendo-se assim a sua validade em locais ou estações do ano com vento intenso.

Além disso, quando a atividade biológica se tornar um fator significativo, deverá ser considerado no balanço o aporte de amônia proveniente do lodo bentônico devido à atividade anaeróbia no fundo das lagoas e a incorporação de nitrogênio amoniacal pela biomassa algal.

O modelo apresentou boa correlação com os dados experimentais obtidos nas lagoas de Corine, Eudora e Peterboroug localizadas nos Estados Unidos. Bastos (2006) adaptou este modelo para lagoas em série instaladas em Viçosa/MG, tendo obtido a eq. (3.10):

$$C_e = \frac{C_o}{1 + \left[4,7 \cdot 10^{-2} \cdot (A/Q) \cdot e^{(0,7269 \cdot (pH-7))} \right]} \quad (3.10)$$

3.2.3.2 Modelo proposto por Yánes Cossío

Yánes (1993) propõe um modelo mais racional para estudar as rotas de transformação do nitrogênio no interior das lagoas facultativas realizando um balanço de massa sobre o nitrogênio orgânico, amoniacal e nitratos. O balanço de massa sobre a fração orgânica do nitrogênio, segundo o autor, pode ser representada pela eq. (3.11).

$$V \frac{dN_o}{dt} = Q_a \times N_{oa} - Q_e \times N_{oe} + V \times R_{no1} - V \times R_{no2} \quad (3.11)$$

sendo:

- N_o = concentração de nitrogênio orgânico (mg/L)
- R_{no1} = taxa de produção de nitrogênio orgânico devido algas e bactérias (mg/L.d);
- R_{no2} = taxa de transformação de nitrogênio orgânico para amoniacal (mg/L.d);
- V = volume da lagoa;
- Q_a ; Q_e = Vazão afluyente e efluente;
- N_{oa} ; N_{oe} = Concentração de nitrogênio orgânico afluyente e efluente (mg/L).

O balanço de massa sobre o nitrogênio amoniacal é descrito pela eq. (3.12)

$$V \frac{dNH_4}{dt} = Q_a \times NH_{4a} - Q_e \times NH_{4e} + V \times R_{no2} - V \times p \times R_{am2} - V \times R_{am3} + V \times R_{am4} \quad (3.12)$$

Sendo: NH_4 = concentração de nitrogênio amoniacal (mg/L)
 NH_{4a} ; NH_{4e} = concentração de nitrogênio amoniacal afluente e efluente (mg/L);
 R_{am2} = taxa de amônia incorporada a biomassa (algas e bactérias) (mg/L.d);
 R_{am3} = taxa oxidação da amônia para nitratos (mg/L.d);
 R_{am4} = taxa de geração de nitrogênio amoniacal a partir do lodo bentônico (mg/L.d);
 p = fator que representa a utilização preferencial do nitrogênio amoniacal.

O balanço de massa sobre o nitrato é descrito pela eq. (3.13)

$$V \frac{dNO_3}{dt} = Q_a \times NO_{3a} - Q_e \times NO_{3e} - V \times p_2 \times R_{ni2} \quad (3.13)$$

Sendo: NO_3 = concentração de nitrato (mg/L);
 NO_{3a} ; NO_{3e} = concentração de nitrato afluente e efluente (mg/L);
 R_{ni2} = taxa de utilização de nitratos para o crescimento de lagas e bactérias (mg/L.d);
 p_2 = fator que representa a utilização preferencial do nitrato.

No modelo apresentado por Yánes (1993), pode ser observado que nenhum termo, representando o efeito da volatilização da amônia, foi creditado no balanço global de nitrogênio.

Yánes (2001), realizando um estudo sobre a carga máxima de aplicação em lagoas facultativas, precedidas de lagoas anaeróbias, obteve um modelo que associa a taxa de aplicação superficial de DBO com a fração de nitrogênio amoniacal efluente e afluente (NH_{3e}/NH_{3a}) da lagoa facultativa. Esta investigação foi realizada nas lagoas localizadas em San Juan e Lima no Peru, através de 40

observações e com um coeficiente de correlação $R^2 = 0,9729$. O gráfico da Figura 3.3 mostra a curva obtida a partir dos resultados das lagoas investigadas.

Figura 3.3 - Gráfico obtido por Yánes (2001) a partir de suas investigações em lagoas facultativas precedidas de lagoa anaeróbia

Segundo Yánes (2001), a equação que descreve o comportamento da curva ajustada aos pontos amostrais, onde CS é a carga superficial de DBO aplicada, serve para determinar a produção de nitrogênio amoniacal em uma lagoa anaeróbia. Além disso, segundo o autor, a equação também serve para determinar a carga orgânica requerida, quando conhecidos os níveis de nitrogênio amoniacal limitante no processo, que, no caso, se refere a lagoas facultativas.

A concentração limitante de nitrogênio amoniacal será o máximo valor que não exercerá um efeito de toxicidade na biomassa algal, permitindo seu desenvolvimento, sendo essa concentração conhecida como limite de toxicidade (Yánes, 2001).

3.2.3.3 Modelo proposto por Senzia

Senzia et al (2002) propuseram um modelo mais racional baseado no balanço de massa sobre três variáveis que representam as transformações do nitrogênio no interior de uma lagoa facultativa primária. Uma representação gráfica desse modelo pode ser verificada na Figura 3.4.

Figura 3.4 - Transformação e remoção do nitrogênio em lagoas de estabilização facultativas. (Fonte: SENZIA et al. 2003)

O modelo descrito na Figura 3.4 pode ser representado pelo conjunto de três equações diferenciais (3.14, 3.15 e 3.16) obtidas sob a suposição de mistura completa e pelo balanço de massa realizado em torno das três principais variáveis do modelo que são: amônia livre, nitrogênio orgânico e nitrato.

$$V \frac{d(N-Org)}{dt} = Q_e(N-Org)_e - Q_s(N-Org)_s - r_m - r_s + r_1 + r_2 \quad (3.14)$$

$$V \frac{d(N-NH_3)}{dt} = Q_e(N-NH_3)_e - Q_s(N-NH_3)_s - r_1 - r_m - r_v - r_n \quad (3.15)$$

$$V \frac{d(N-NO_3)}{dt} = Q_e(N-NO_3)_e - Q_s(N-NO_3)_s + r_n - r_2 - r_d \quad (3.16)$$

sendo: $(N-Org)_e$ = concentração de nitrogênio orgânico na entrada (mg_N/L)
 $(N-Org)_s$ = concentração de nitrogênio orgânico na saída (mg_N/L)
 $(N-NH_3)_e$ = concentração de nitrogênio amoniacal na entrada (mg_N/L)
 $(N-NH_3)_s$ = concentração de nitrogênio amoniacal na saída (mg_N/L)
 $(N-NO_3)_e$ = concentração de nitrato na entrada (mg_N/L)
 $(N-NO_3)_s$ = concentração de nitrato na saída (mg_N/L)
 r_d ; r_m ; r_s ; r_v ; r_1 ; r_2 = fluxo de massa que envolvem as taxas de transformação e remoção devido: desnitrificação, mineralização, perdas, volatilização, incorporação a biomassa, respectivamente (mg_N/d)

O modelo matemático preditivo para a transformação e remoção do nitrogênio foi aplicado em uma lagoa facultativa primária (F1) tratando uma água residuária tipicamente doméstica. O sistema de lagoas é, segundo Senzia et al. (2002), constituído de uma lagoa facultativa primária (F1) que alimenta dois módulos em paralelo constituídos por três lagoas de estabilização. Cada módulo possui uma lagoa facultativa secundária (F2) que alimenta uma lagoa terciária (F3) e que por sua vez é seguida por uma de maturação (M). Na Figura 3.5 encontra-se um diagrama do sistema de lagoas utilizado.

Figura 3.5 - Desenho esquemático do sistema de lagoas utilizado no estudo conduzido por Senzia et al. (2002)

O sistema está localizado na Universidade de Dar es Salaam – Tanzania e algumas de suas características geométricas e de operação podem ser observadas na Tabela 3.2.

Tabela 3.2 - Características operacionais do sistema de lagoas utilizado no estudo de remoção de nitrogênio conduzido por Senzia et al. (2002)

Parâmetro	F1 (primária)	F2 (secundária)	F3 (terciária)	F1 (maturação)
vazão (m³/d)	528,23	252,41	245,61	241,41
volume (m³)	6080	3070	3070	1824
TDH (d)	11,5	12,2	12,5	7,6
profund. (m)	1,33	1,51	1,51	1,22
área (m²)	4065	2100	2100	1425

Segundo Senzia et al. (2002) o modelo preditivo das rotas de transformação e remoção de nitrogênio apresentou boa correlação com os dados obtidos experimentalmente. O gráfico da Figura 3.6 apresenta os resultados obtidos a partir do modelo.

Figura 3.6 - Resultados obtidos a partir do modelo proposto por Senzia et al. (2002).

O modelo apresentado por Senzia assemelha-se ao modelo proposto por Pano e Middlebrooks (1982) quando ambos realizam seus balanços sobre o nitrogênio orgânico, amoniacal e nitratos. Entretanto, o modelo de Senzia incorpora como rota de remoção e transformação, os processos de sedimentação, volatilização e desnitrificação.

3.2.3.4 Modelo dinâmico proposto por Reed, Beran e Kargi: Uma breve discussão

Beran e Kargi (2005) desenvolveram um modelo matemático para predição da qualidade do efluente em lagoas facultativas. Segundo o autor uma grande quantidade de modelos ecológicos foi baseada nos princípios de conservação de massa, reações estequiométricas e leis da termodinâmica. Entretanto, todos esses modelos, possuem fraco embasamento com relação às perspectivas hidrológicas e bioquímicas.

Neste sentido, os autores empregam um modelo hidráulico bidimensional, que leva em consideração o escoamento disperso e a difusão nas direções verticais e horizontais. Como resultado dessa complexidade, surge um sistema de equações diferenciais parciais, necessitando, para a solução desse conjunto de equações, o

emprego de ferramentas numéricas, como o método de elementos finitos e técnicas de manipulação matricial.

As variações nas concentrações de DQO, Amônia, fósforo, oxigênio dissolvido, biomassa bacteriana e algal, em função do tempo e as dimensões da lagoa, foram estimadas através do modelo dinâmico (BERAN, KARGI, 2005).

A estrutura complexa proposta pelo modelo permitiu simular uma grande faixa de parâmetros de poluentes, com o ajuste de algumas constantes cinéticas. Segundo Beran e Kargi (2005), excluindo o oxigênio dissolvido e o nitrato ($R^2 = 0,89$ e $0,88$, respectivamente), os coeficientes de correlação para os demais parâmetros do modelo foram acima de $0,9$.

Reed (1985) desenvolveu um modelo preditivo para o nitrogênio total em lagoas facultativas. O modelo de fluxo considerado no modelo foi o pistonado e a taxa de remoção do nitrogênio total segue uma cinética de primeira ordem. O nitrogênio total foi o parâmetro de maior interesse pelo autor no seu modelo, em vez de qualquer outra forma de nitrogênio, devido à transformação que o nitrogênio total pode sofrer durante longos tempos de residência hidráulica. O autor relata que, em uma análise feita apenas sobre o nitrogênio amoniacal, uma entrada adicional de amônia, devido às reações de oxidação-redução do nitrogênio orgânico, poderia não ser computada. A equação proposta por Reed tem a forma geral apresentada na eq. (3.17).

$$\frac{N_e}{N_o} = e^{kf(T, pH, t)} \quad (3.17)$$

sendo: N_e = nitrogênio total no efluente da lagoa (mg/L);
 N_o = nitrogênio total na afluente da lagoa (mg/L);
 k = constante cinética de primeira ordem, uma função da Temperatura, do pH e do tempo de detenção hidráulica.

O modelo de Reed foi aplicado sobre quatro sistemas de lagoas, na qual, cada sistema, é composto por três lagoas ligadas em série. As lagoas estão localizadas nos Estados Unidos nas cidades de Peterborough, Kilmichael, Eudora e Corine.

Reed (1985) conclui que há remoção de nitrogênio em sistemas de lagoas de estabilização e, além disso, o processo de remoção pode ser modelado por uma cinética de primeira ordem, sob a consideração de que as lagoas operam como reatores de fluxo em pistão.

A nitrificação em lagoas facultativas é mínima e a volatilização poderá ser o processo dominante na remoção de nitrogênio em regiões de temperaturas elevadas, segundo Reed (1985). Entretanto, segundo o mesmo autor, nos períodos de baixa temperatura a remoção de nitrogênio associada à biomassa pelo processo de sedimentação, poderá tornar-se o processo mais efetivo na eliminação do nitrogênio nas lagoas.

3.2.4 Comportamento hidrodinâmico

3.2.4.1 Aspectos gerais em hidrodinâmica de lagoas

Embora existam diversos modelos preditivos para o comportamento das lagoas de estabilização, a maioria desses modelos, centra sua aplicabilidade em comportamentos classificados como ideais. Entretanto, essas lagoas, na prática, operam numa faixa entre o comportamento de reatores operando em regime de mistura completa e pistonados.

Alguns modelos levam em consideração a situação de escoamento não ideal, introduzindo o fenômeno de escoamento disperso em suas equações. Dentre vários modelos que incorporam o grau de dispersão do escoamento, pode-se citar o modelo para reatores com baixa dispersão, apresentado por Levenspiel (1972), sendo bastante difundido nos projetos de lagoas de estabilização.

Segundo Evangelista et al. (2002), no projeto de lagoas, como por exemplo, lagoas projetadas para remoção de coliformes, além dos critérios usuais, como taxa de aplicação superficial e tempo de detenção hidráulica, é importante avaliar as taxas de remoção, o regime hidráulico a se adotar e o coeficiente de

decaimento bacteriano. Para os mesmos autores, a remoção de organismos patógenos pode ser modelada segundo os regimes hidráulicos de mistura completa, fluxo em pistão ou fluxo disperso.

No regime hidráulico de mistura completa, todos os elementos que entram no reator são imediatamente misturados e a concentração de todos os elementos é a mesma em todos os pontos do reator. No fluxo em pistão, cada elemento que deixa o reator sai na mesma ordem em que entrou, desta forma, cada elemento fica exposto ao mesmo tempo de tratamento. No fluxo disperso, cada elemento do fluxo permanece no interior do reator em tempos distintos. Neste caso, o fluxo é arbitrário e este padrão de fluxo fica localizado entre os dois regimes de fluxo anteriores (mistura completa e fluxo em pistão). Segundo Arceivala (1981 apud EVANGELISTA et al., 2002), o modelo matemático inicial neste caso incluiria a segunda lei de Fick de difusão.

Supondo que as taxas de remoção de substrato e coliformes se ajustam a uma cinética de primeira ordem, e considerando os balanços de massa em um regime estacionário, a Tabela 3.3 apresenta os modelos para remoção de matéria orgânica ou coliforme para cada regime hidráulico.

Tabela 3.3 – Modelos para remoção de matéria orgânica e coliformes em função do regime hidráulico em reatores

Regime Hidráulico	Modelo
Mistura completa	$C = \frac{C_0}{1+kt}$
Fluxo em pistão	$\frac{C}{C_0} = e^{-kt}$
Fluxo disperso	$\frac{C}{C_0} = \frac{4ae^{\frac{1}{2d}}}{(1+a)^2 e^{\frac{a}{2d}} - (1-a)^2 e^{\frac{-a}{2d}}}$

Sendo: C= concentração para um instante t
 C_0 = concentração afluente
t = tempo (d)
k = constante cinética de reação (d^{-1})
d = número adimensional de dispersão
 $a = \sqrt{1+4ktd}$

Segundo Torres et al. (1999), a origem natural do fenômeno que causa o tratamento em lagoas de estabilização não torna esses sistemas fáceis de estudar e entender, especialmente quando estão sendo aplicados na prática. Neste caso, pode-se entender, que os autores chamam a atenção para o fato do distanciamento existente entre os modelos propostos e o comportamento dos sistemas em escala real de operação. Dentro desses fenômenos complexos, encontra-se o comportamento hidrodinâmico interno das lagoas (TORRES, et al., 1999).

O comportamento hidrodinâmico é influenciado pela forma e profundidade da lagoa, pelo posicionamento da entrada do afluente e saída do efluente, pelos fatores climáticos e a pela direção do vento dominante na região onde estão situadas (KENNETH; GARY, 1972; MARECOS DO MONTE; MARA, 1987; MORENO, 1990; AGUNWAMBA et al., 1992; TORRES, 1995; FREDERICK; LLOYD, 1996; DOREGO; LEDUC, 1996; TORRES et al., 1997, apud TORRES et al., 1999).

Segundo Torres et al.(1999), o comportamento do fluxo interno das lagoas pode ser estudado experimentalmente por técnicas de estímulo-resposta, utilizando traçadores para identificar o tipo de mistura e estimar o tempo médio real de residência. Além disso, permite verificar possíveis anomalias no fluxo interno, como zonas mortas e curto circuitos.

3.2.4.2 Distribuição do tempo de residência

O comportamento hidráulico em lagoas de estabilização poderia ser entendido a partir de um estudo detalhado dos seus campos de velocidades. Entretanto, nem sempre o mapeamento completo desses campos será uma alternativa viável, podendo-se entender o escoamento a partir do conhecimento sobre o tempo que cada elemento do fluido permanece dentro de cada lagoa.

Segundo Levenspiel (1972) os elementos do fluido percorrem diferentes caminhos podendo gastar tempos diferentes para passarem através dos reatores. A distribuição dos tempos dos elementos que deixam o reator é chamada de Distribuição do Tempo de Residência (DTR) ou curva ***E***.

Considerando que o elemento do fluido seja o traçador, a informação que ele carrega sobre seu tempo de permanência dentro reator (curva **E**, considerando a totalidade dos elementos pertencentes ao escoamento), pode ser usada diretamente, ou em conjunto com modelos de escoamento para prever o comportamento hidráulico.

Considerando que o lançamento do traçador na corrente fluida seja instantâneo, ou seja, na forma de um pulso, a curva **E**, ou resposta normalizada pode ser obtida, segundo Levenspiel (1972), pela equação 3.18.

$$E = \frac{C(t)}{Q} \quad (3.18)$$

Sendo: $C(t)$ = Concentração medida no instante t
 Q = área sobre a curva concentração-tempo

O cálculo de Q pode ser efetuado para pontos discretos através da equação 3.19.

$$Q = \sum_{i=1}^n C_i(t) \Delta t_i \quad (3.19)$$

O tempo médio de permanência ($\bar{t}_m$) do traçador para o caso de dados discretos pode ser calculado, segundo Levenspiel (1972), pela equação 3.20.

$$\bar{t}_m = \frac{\sum_{i=1}^n t_i C_i(t) \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i(t) \Delta t_i} \quad (3.20)$$

O tempo teórico (t_R) pode ser calculado, considerando escoamento permanente, pela equação 3.21.

$$t_R = \frac{V_t}{Q} \quad (3.21)$$

sendo: t_R = tempo real de permanência de um elemento no reator

Para Fogler (2002) pode-se comparar as DTRs usando o tempo médio de residência, que constitui o primeiro momento, e a variância que se caracteriza como segundo momento em torno da média, em vez de tentar comparar as distribuições em sua totalidade. A variância (σ^2) pode ser avaliada, em termos de pontos discretos, pela equação 3.22.

$$\sigma^2 = \frac{\sum_{i=1}^n t_i^2 C_i(t) \Delta t_i}{\sum_{i=1}^n C_i(t) \Delta t_i} - \bar{t}^2 \quad (3.22)$$

É possível com as informações obtidas através das curvas de distribuição dos tempos de residência, tais como o tempo médio e variância, juntamente com modelos de escoamento, fazer uma análise quantitativa do escoamento. Desde modo, para análise do comportamento hidrodinâmico das lagoas será considerado o modelo de escoamento tubular disperso. O efeito de difusividade molecular na direção axial do escoamento pode ser representado pela lei de Fick cuja forma diferencial é dada pela equação 3.23.

$$\frac{\partial C}{\partial t} = D \frac{\partial^2 C}{\partial x^2} \quad (3.23)$$

onde D é o coeficiente axial de dispersão.

Nem sempre as equações diferenciais parciais podem apresentar soluções analíticas, entretanto o caráter da lei de Fick sugere que a família de

soluções tenha a forma de curvas gaussianas normais. Considerando que problema representado pela equação 3.23 seja um recipiente fechado¹, a família de soluções, segundo Levenspiel (1972) possui variação representada pela equação 3.24.

$$\sigma^2_{\theta} = \frac{\hat{\sigma}^2}{t_m^2} = 2 \frac{D}{uL} - 2 \left(\frac{D}{uL} \right)^2 \times (1 - e^{-uL/D}) \quad (3.24)$$

A partir do termo D/uL , podemos caracterizar a tendência do tipo de escoamento nas lagoas. A Figura 3.7 apresenta uma família de soluções obtidas numericamente, onde é possível, da mesma forma, caracterizar o escoamento qualitativamente.

Figura 3.7 - Família de soluções - Curvas C (Fonte: Levenspiel, 1972)

A ocorrência de volume morto pode ser avaliada a partir do conhecimento do volume ativo das lagoas. Fogler (2002) sugere que o volume ativo seja estimado pela equação 3.25.

¹ Levenspiel considera que um recipiente é fechado quando existe variação do tipo de fluxo no contorno do recipiente.

$$V_a = Q \times \bar{t}_m \quad (3.25)$$

Sendo: V_a = volume ativo (m^3)

Q = vazão (m^3/d)

$\bar{t}_m$ = tempo médio de residência obtido pelas curvas de DTRs (d)

Desta forma o volume morto será avaliado pela equação 3.26.

$$V_{\text{morto}} = V_{\text{teórico}} - V_a \quad (3.26)$$

3.3 REATORES COM BIOMASSA ADERIDA

Os microrganismos que constituem a biomassa nos principais sistemas de tratamentos biológicos se agregam em estruturas conhecidas como flocos ou biofilmes. Nos sistemas que empregam o crescimento suspenso, os microrganismos responsáveis pela estabilização da matéria orgânica são mantidos em suspensão no meio líquido. No crescimento aderido, os microrganismos desenvolvem-se sobre um meio suporte fixo ou em suspensão.

Os primeiros sistemas de tratamento que empregaram o conceito de crescimento aderido começaram a ser desenvolvidos no início da década de 70. Segundo Silva (2005), por várias décadas, os sistemas que empregam biomassa aderida (filtros biológicos percoladores, filtros intermitentes e tanques de contato), dominaram a tecnologia de tratamento de esgoto sanitário. O mesmo autor comenta que, com o surgimento de processos que empregam biomassa suspensa, como lodos ativados, o interesse na aplicação dos reatores com crescimento aderido sofreu uma redução significativa. Entretanto, a vantagem existente na aplicação de dispositivos, que utilizam o crescimento aderido, motivou o ressurgimento no interesse pelo estudo desses processos. No campo da biotecnologia ambiental o motivo pelo interesse do uso do biofilme é descrito na Tabela 3.4.

Tabela 3.4 - Razões do interesse pelo uso de biofilmes

Vantagens de sistemas com biomassa aderida
1 - capacidade de tratar grandes volumes
2 - existência de uma diversidade grande de microrganismos no biofilme
3 - os reatores podem operar com grande concentração de biomassa, sem a necessidade de sedimentar a biomassa aderida, sendo apenas necessário uma unidade de clarificação posterior para reter parte da biomassa desprendida.

Nicolella et al.(2000), apresentam uma série de reatores com aplicação em águas residuárias. Os principais tipos de reatores aplicados são os BUS (*Biofilm Upflow Sludge*), BFB (*Fluidized Bed*), EGSB (*Expanded Granular Sludge Blanket*), BAS (*Biofilm Airlift Suspension*) e IC (*Internal Circulation*). Dentro desse conceito de reatores de leito móvel encontram-se os biodiscos, onde a biomassa cresce aderida a discos rotativos.

Giseke et al. (2002), chamam a atenção sobre o grande potencial apresentado pelos reatores que utilizam biomassa aderida em remover simultaneamente matéria orgânica e nutrientes como nitrogênio.

3.3.1 Biofilme: Conceituação

Para Nicolella et al (2000), o biofilme pode ser definido como uma estrutura complexa de microrganismos e produtos extracelulares, como polímeros, no qual formam-se espontaneamente grânulos densos ou crescem aderidos a uma superfície sólida fixa ou em suspensão. Segundo Metcalf & Eddy Inc.(2004), uma fração de material particulado fará parte da constituição final do biofilme.

No crescimento aderido tanto a matéria carbonácea como nutrientes são consumidos através dos processos metabólicos no interior do biofilme.

O transporte de massa, por processos difusivos nos flocos e biofilmes é resultado da existência de um gradiente de concentração nas suas proximidades. A profundidade da penetração do substrato depende da porosidade, concentração do substrato, da taxa de transferência de massa na interface líquido-biofilme e líquido-flocos e da taxa de reação dos microrganismos (NICOLELLA et al.,2000). A Figura

3.8 mostra um corte esquemático de um biofilme com sua estruturação básica.

Van Loosdrecht et al (1995), durante um estudo sobre a distribuição de microrganismos em biofilmes aeróbios, sobre pequenas partículas suspensas, argumentam que a estrutura do biofilme será influenciada pelas forças cisalhantes, externas, pelos perfis de difusão internos e pela competição entre as diversas comunidades de microrganismos existentes. As forças de cisalhamento irão controlar a espessura do biofilme e sua estrutura superficial.

Como a distribuição dessas forças sobre o biofilme não é uniforme, a tendência é a formação de biofilme com estruturas complexas e não uniformes. Dentro do contexto de filtros percoladores, Metcalf & Eddy Inc. (2004) relatam que esses dispositivos são sistemas complexos em termos de características de crescimento aderido e comportamento hidrodinâmico interno e esta complexidade tem um efeito direto sobre os critérios de projeto, sendo que a maioria baseia-se em relações empíricas derivadas de dados de filtros operando em escala piloto ou real.

Figura 3.8 - Corte esquemático de um biofilme.

Alguns modelos computacionais, que descrevem o desenvolvimento dos diferentes microrganismos em biofilmes, vêm sendo desenvolvidos (WANNER et al., 1986; apud VAN LOOSDRECHT et al., 1995). Estes modelos demonstraram que

organismos de crescimento lento (como as bactérias nitrificadoras) estarão localizados nas regiões mais profundas do biofilme em comparação aos organismos heterotróficos.

Van Loosdrecht et al. (1995) conduziram estudos sobre a distribuição dos microrganismos através da interpretação dos perfis e fluxos de oxigênio no interior de biofilmes geometricamente planos ou esféricos, em reatores alimentados com acetato e com amônia apenas.

A partir dos resultados experimentais, e baseados em modelos de simulação, Van Loosdrecht et al. (1995) concluíram que os organismos de crescimento lento tenderão a permanecer nas regiões mais profundas e, além disso, estes organismos irão ser diluídos nas camadas mais externas pelos organismos heterotróficos de crescimento mais acelerado e localizados nas regiões mais superficiais do biofilme.

Os organismos nitrificadores poderão, dentro dessa concepção estrutural de distribuição, ser fortemente afetados por problemas de difusividade do oxigênio nas camadas mais internas do que as bactérias heterotróficas. Desta forma, a conversão da amônia para sua forma mais oxidada poderá ser influenciada negativamente pelas taxas de aplicação orgânica, sendo que as taxas que permitem boa nitrificação em filtros percoladores e reatores convencionais, segundo Daigger et al. (1993 apud VAN LOOSDRECHET et al., 1995), deverão estar na faixa de 0,6 kgDQO/m³.d.

Para Gebara (2006), ainda que não existam trabalhos conclusivos sobre a distribuição dos microrganismos no interior do biofilme, os trabalhos apresentados na literatura propõem que os organismos heterotróficos devem estar presentes na camada mais externa, ou seja, na linha aeróbia do biofilme e os organismos autotróficos, de crescimento mais lento, deverão aparecer nas camadas mais internas. Além disso, dependendo da espessura do biofilme, uma camada anaeróbia ou anóxica poderá se desenvolver próximo a superfície do meio suporte.

A existência simultânea de uma região anaeróbia e aeróbia é conveniente para a remoção biológica de nitrogênio (IWAI e KITAO, 1994). O sucesso no processo de nitrificação e desnitrificação estará intimamente ligado à concentração de oxigênio no meio líquido e na profundidade de penetração deste oxigênio no interior do biofilme. Dentro deste contexto, deverá existir uma concentração ótima de

oxigênio no meio líquido para assegurar que a máxima remoção de nitrogênio aconteça. Essa argumentação corrobora com a afirmação feita sobre o mesmo tema por IWAI e KITAO (1994). A Figura 3.9 mostra um perfil da concentração de nitrogênio através do biofilme.

Figura 3.9 - Perfil de nitrogênio no interior do biofilme.
Adaptado de Iwai e Kitao,(1994)

A presença de substrato no meio líquido ocasiona a competição pelo oxigênio dissolvido e espaço no biofilme entre as bactérias nitrificantes e heterotróficas. Para Giseke et al. (2002), esta competição entre as duas comunidades de microrganismos pode diminuir ou interromper o processo de nitrificação e desnitrificação.

3.3.2. Filtros percoladores

Os filtros percoladores são reatores de leito fixo, não submerso, onde a biomassa desenvolve-se aderida em um meio suporte. Durante as primeiras décadas de operação, o meio suporte utilizado para o desenvolvimento dos microrganismos era constituído de rocha (brita, cascalhos, pedregulhos), entretanto,

em meados de 1950, leitos constituídos de material plástico começaram a substituir os antigos leitos de rocha. Essa mudança permitiu que os filtros fossem submetidos à taxas de aplicação maiores em decorrência da maior área superficial oferecida para a constituição da biomassa.

Usualmente a área superficial média da brita 4 encontra-se situada na faixa entre 50 a 80 m²/m³. Em contrapartida, o meio suporte constituído de material plástico, como *cross flow* e anéis plásticos, possui uma área superficial média entre 100 a 250 m²/m³. O reduzido peso específico desses materiais e o alto índice de vazios (90 a 97%) permitiram a construção de filtros com grande altura, reduzindo, significativamente, a área necessária para a implantação dos filtros. Segundo Silva (2005), essas torres passaram a exigir ventilação forçada para assegurar o suprimento de oxigênio necessário para as atividades biológicas de organismos estritamente aeróbios, ligados, principalmente, aos processos oxidativos da matérias carbonácea e nitrogenada. A Tabela 3.5 apresenta as propriedades físicas de alguns materiais empregados como meio suporte nos filtros percoladores.

Tabela 3.5 - Propriedades físicas dos materiais suporte empregados em filtros percoladores.
Fonte: Metcalf & Eddy Inc., (2004)

Material suporte	Tamanho nominal (cm)	Massa específica (kg/m ³)	Área específica superficial (m ² /m ³)	Volume de vazios (%)	Aplicação
Cascalho pequeno	2,5-7,5	1250-1450	60	50	N
Cascalho grande	10-13	800-1000	45	60	C, CN, N
Plástico convencional	61x61x122	30-80	90	> 95	C, CN, N
Plástico - grande área superficial	61x61x122	65-95	140	> 94	N
Plástico aleatório	vários	30-60	98	80	C, CN, N
Plástico aleatório - grande área superficial	vários	50-80	150	70	N

C= Remoção matéria carbonácea; N= Nitrificação terciária; CN= Combinada remoção matéria carbonácea e nitrificação.

Para Harrison e Daigger (1987), embora existissem estudos comparativos sobre o desempenho de diversos meios suportes, poucos trabalhos incluíam todos os tipos de materiais disponíveis. Além disso, os autores comentam que a maioria

dos estudos foi focada no desempenho dos materiais e negligenciou fatores operacionais, tais como, características de molhamento e colmatção.

Harrison e Daigger (1987) fizeram uma comparação entre 6 tipos de meio suporte em uma planta piloto, formada por 6 filtros operando em paralelo. A Tabela 3.6 apresenta as principais características dos meios suportes estudados e a Tabela 3.7 mostra as principais condições de operação nos filtros.

Tabela 3.6 - Características dos meios suportes utilizados por Harrison e Daigger (1987)

Tipo de meio suporte	Área superficial específica (m ² /m ²)	Razão de vazios (%)	Peso seco (kg/m ³)
Horizontal (HO)	46	94	160
Vertical (VE)	88	97	30
Crossflow 60° (60)	98	95	30
Crossflow 45° (45)	98	95	30
Anel Plástico (RA)	105	92	50
Pedra (RO)	50	35	1280

Tabela 3.7 - Condições operacionais dos filtros no estudo realizado por Harrison e Daigger (1987)

Teste	Teste Fase		
	Baixa	Médio	Alta
Duração do teste (dias)	37	36	36
Afluente			
DBO total (mg/L)	102	221	200
DBO solúvel (mg/L)	47	140	119
Temperatura (°C)	12	20	18
Carga Orgânica (kg/m ³ .d)			
DBO total	0,59	2,64	5,95
DBO solúvel	0,25	1,68	3,54
Taxa Hidráulica (m ³ /m ² .d)			
Sem recirculação	0,56	1,15	2,88
Com recirculação	2,08	2,86	3,54
Razão de recirculação	2,7	1,5	0

A Tabela 3.8, mostra as médias efluentes de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato nos filtros percoladores, sob baixa carga, para os diversos materiais de

enchimento.

Tabela 3.8 - Concentração média de nitrogênio durante a taxa baixa de operação dos filtros – Fonte: Harrison e Daigger (1987)

Meio suporte	NH ₃ (mg-N/L)	NO ₂ ⁻ + NO ₃ ⁻ (mg-N/L)
60	4,7	3,3
VE	5,8	2,4
45	6,5	2,1
RA	7,3	1,5
RO	8,1	1,1
HO	7,9	0,8

Obs.: concentração média de nitrogênio amoniacal afluyente = 9,5 mg-N/L

Harrison e Daigger (1987) concluíram que, para todas as condições de carga, o desempenho dos blocos horizontais (HO) foi baixo em relação aos outros materiais testados. O desempenho com meio suporte de pedra (RO) e anel plástico (RA) foi menor em comparação aos blocos verticais (VE), quando os filtros foram submetidos a cargas médias e altas. Para as cargas baixas, os filtros preenchidos com anel plástico apresentaram um ganho substancial na eficiência.

No trabalho realizado por Parker e Richards (1986), os leitos constituídos de anéis plásticos apresentaram menores desempenhos em comparação aos leitos constituídos de pedra.

Estas diferenças podem estar relacionadas com a rugosidade do material adotado. Para Heijnen et al. (1992), a rugosidade e o diâmetro do material suporte são características importantes no desenvolvimento do biofilme. Para o autor, inicialmente, o biofilme é formado nas cavidades das superfícies dos materiais suportes e, quando estas cavidades não estão presentes, as colônias de micro-organismos ficam sujeitos ao efeito de corrente (cisalhamento), podendo ocorrer o desprendimento dessas colônias.

Almeida (2007) estudou o efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de filtros biológicos percoladores, aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, com ênfase na nitrificação. Os materiais de enchimentos empregados no estudo foram: escória de alto forno, anéis plásticos aleatórios, aparas de conduíte corrugado e sistema Dowlow Hanging Sponge

(DHS). Segundo o autor, para uma taxa de aplicação volumétrica de $0,43\text{kgDBO/m}^3\cdot\text{d}$ e uma taxa de aplicação hidráulica de $20\text{m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, não houve diferenças estatisticamente significativas entre os materiais de enchimento testados. Para taxas de aplicação volumétrica de $0,24\text{ kgDBO/m}^3\cdot\text{d}$ e taxa de aplicação hidráulica de $10\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$, foram detectadas diferenças nas concentrações efluentes de nitrogênio amoniacal, para os diferentes materiais de enchimento empregados.

Franchin e Povinelli (2006) estudaram a remoção de matéria orgânica e nitrogênio em filtros percoladores com diferentes materiais suportes, neste caso, brita e serragem de couro. Cada filtro foi alimentado com o efluente de um reator anaeróbio compartimentado, sendo mantidos sob a mesma taxa de aplicação hidráulica de $1,9\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{d}$. Os filtros empregados na pesquisa foram confeccionados em PVC, possuindo uma altura útil de 1,00 m, diâmetro de 0,20 m e volume de 31,4 L. Os autores concluíram que, para todos os parâmetros analisados, os filtro preenchido com serragem de couro apresentou melhores resultados, sendo observadas remoções de 73%, 79% e 66% para NTK, nitrogênio amoniacal e DQO, respectivamente.

Comercialmente, os filtros percoladores são classificados como de baixa taxa, intermediária, alta taxa, super alta taxa, e filtros grosseiros. Essa classificação leva em consideração a taxa de aplicação orgânica superficial, hidráulica e o tipo de recirculação. A Tabela 3.9 apresenta informações típicas para projetos de filtros percoladores.

A jusante desses reatores deve ser prevista uma unidade de clarificação final para remover sólidos que deixam o sistema com seus efluentes. A origem desses sólidos, indesejáveis, está relacionada ao fenômeno de desprendimento de parte da biomassa aderida ao meio suporte.

Várias configurações com filtros podem ser admitidas para alcançar o nível de tratamento desejado. A concepção conhecida como simples estágio é constituída por um decantador primário, seguido de um filtro percolador e um decantador secundário. Quando dois filtros estão ligados em série, podendo, entre eles, estar locadas unidades de clarificação, a concepção é usualmente conhecida como de duplo estágio. Ambas as concepções podem, dependendo das características do afluente, nível de tratamento e taxas de aplicações pretendidas, admitirem a recirculação do efluente desses filtros.

Tabela 3.9 - Informações típicas de projetos de filtros percoladores. Fonte: Metcalf & Eddy Inc., (2004)

Características de projeto	taxa baixa	taxa intermediária	taxa alta	taxa alta	super alta taxa
Tipo de material suporte	Pedra	Pedra	Pedra	Plástico	Pedra/Plástico
Taxa de aplicação hidráulica ($\text{m}^2/\text{m}^3.\text{d}$)	1-4	4-10	10-40	10-75	40-200
Taxa de aplicação orgânica ($\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$)	0,07-0,22	0,24-0,48	0,4-2,4	0,6-3,2	> 1,5
razão de recirculação	0	0-1	1-2	1-2	0-2
vetores (insetos)	muitos	vários	pouco	pouco	pouco
Profundidade (m)	1,8-2,4	1,8-2,4	1,8-2,4	3,0-12,2	0,9-6
Eficiência na remoção de DBO (%)	80-90	50-80	50-90	60-90	40-70
Qualidade do efluente	Bem nitrificado	Alguma nitrificação	sem nitrificação	sem nitrificação	sem nitrificação
Potência ($\text{kW}/10^3 \text{ m}^3$)	2-4	2-8	6-10	6-10	10-20

3.3.2.1 Pós-tratamento com filtros percoladores

Existem diversos trabalhos publicados na literatura relatando o uso de filtros como uma alternativa viável para pós-tratamento de efluentes provenientes de outros sistemas. Diversos filtros percoladores estão sendo aplicados, principalmente, como pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios.

Na década de 80, uma estação piloto, dentro dessa concepção, foi construída na Pontifícia Universidade Católica do Paraná, tratando águas residuárias tipicamente doméstica de uma população de 500 habitantes.

Em escala real, existem registros, no estado do Paraná, de estações operando nessa combinação de reator anaeróbio e filtro percolador.

Boller e Gujer (1986a) realizaram um estudo sobre nitrificação em dois filtros terciários em escala piloto, alimentados com o efluente não nitrificado de um sistema de lodo ativado. O sistema composto pelos filtros possui uma vazão total de

150 m³/d e em cada filtro e as vazões ficaram situadas na faixa de 28 a 90 m³/d. Os filtros foram operados em paralelo, possuindo 0,9 m de diâmetro e 6,75 metros de altura. O leito foi preenchido com material plástico, possuindo uma área superficial específica de 230 m²/m³. Os autores concluíram que, nesta configuração, os filtros foram especialmente adequados para nitrificação em estações de grande porte, onde as variações nas concentrações não são tão acentuadas.

Boller e Gujer (1986b) realizaram, a partir dos seus dados experimentais, um estudo teórico sobre nitrificação em filtros percoladores terciários, objetivando estabelecer critérios mais racionais para projeto. Entretanto, o mesmo autor estabelece que seus critérios devam ser considerados como uma ferramenta primária para entender os mecanismos envolvidos na nitrificação em filtros. Além disso, seu estudo foi conduzido em uma planta onde um sistema de lodos ativados estava inserido. Dentro do contexto do estudo feito por Boller e Gujer (1986a, 1986b), algumas ressalvas devem ser feitas, principalmente, quando os filtros vierem precedidos de lagoas facultativas, pois alguns desses critérios podem perder sua validade em função das características distintas entre efluentes de lagoas facultativas, lodos ativados e reatores anaeróbios, incluindo UASB.

Dentre as diversas concepções existentes, que englobam filtro percolador como unidade de pós-tratamento, pode-se citar novamente o sistema PETRO. Este sistema tem como objetivo reduzir as concentrações de algas nos efluentes finais das lagoas facultativas. A biomassa algal é adsorvida pelo biofilme que se desenvolve sobre o meio suporte do filtro. Segundo o trabalho publicado por Meiring et al. (1995), o processo PETRO além de remover a biomassa algal pode fornecer um efluente nitrificado. A Tabela 3.10 mostra as concentrações de nitrogênio amoniacal, NTK e nitrato, obtidas em um sistema PETRO, composto por dois filtros percoladores funcionando em paralelo.

Tabela 3.10 - Concentrações de NTK, nitrogênio amoniacal e nitrato em um sistema PETRO.
Fonte: Meiring et al. (1995)

Parâmetros	Efluente Lagoa	Efluente filtro 1	Efluente filtro 2
NTK (mg-N/L)	28	5,6	5,6
NH ₃ (mg-N/L)	24	4	3,8
NO ₃ ⁻ (mg-N/L)	0,3	26	31

Outra experiência com filtros percoladores, sendo utilizados como pós-tratamento de reator UASB, pode ser verificado no trabalho conduzido por Almeida (2007). Neste trabalho, o autor operou um filtro biológico percolador compartimentado, onde cada compartimento possuía materiais de enchimento de características distintas. O filtro foi construído em aço-carbono e a Tabela 3.11 apresenta as principais características do filtro.

Tabela 3.11 – Principais características do filtro biológico percolador

Características	Filtro biológico percolador		
	Compartimento reacional total	Compartimento individualizado	Decantadores secundários
Diâmetro	2,10	-	1,0
Área útil	3,46	0,87	0,79
Altura útil	2,5	2,5	1,82
Volume útil	8,65	2,16	1,44

Fonte: Almeida (2007)

Para uma taxa de aplicação volumétrica de $0,24\text{kgDBO}/\text{m}^3.\text{d}$ e taxa de aplicação hidráulica de $10\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$, as concentrações efluentes no filtro ficaram abaixo de $20\text{mgNH}_4^+-\text{N}/\text{L}$, sendo portanto atendida a concentração de lançamento estabelecida pela Resolução CONAMA 357/2005.

Dentro do contexto de filtros biológicos, operando como pós-tratamento de efluente de lagoas facultativas, pode-se citar o trabalho desenvolvido por Oliveira e Gonçalves (1999). Neste caso, os autores utilizaram filtro aerado submerso como pós-tratamento de efluentes de lagoas facultativas. A taxa de aplicação hidráulica aplicada foi de $45,6\text{m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. Para essa taxa, foram observadas taxas volumétricas de nitrificação de $0,47\text{KgNH}_4^+-\text{N}/\text{m}^3.\text{d}$ e redução na concentração de nitrogênio amoniacal de $20\text{mgNH}_4^+-\text{N}/\text{L}$ (afluente do filtro) para $5\text{mgNH}_4^+-\text{N}/\text{L}$ (efluente do filtro).

Com relação ao pós-tratamento de efluentes de lagoas com filtros biológicos percoladores, não estão disponíveis modelos seguros capazes de definir as condições necessárias para a obtenção de determinadas concentrações de amônia no efluente final.

3.3.2.2 Nitrificação em filtros percoladores - Aspectos gerais.

O sucesso no processo de nitrificação em filtros percoladores é diretamente dependente da taxa de aplicação de amônia, do oxigênio disponível, das condições climáticas e da natureza dos elementos que compõem o meio suporte do leito.

No que diz respeito às condições ambientais, aparentemente, os filtros irão apresentar maiores taxas de nitrificação em temperaturas mais elevadas, desenvolvidas durante o período de verão. No período de inverno nas regiões temperadas, onde as baixas temperaturas são frequentes, observa-se uma queda nas taxas de nitrificação. Alguns autores têm observado efeitos mínimos das temperaturas sobre a nitrificação em filtros percoladores operando como unidades terciárias, atribuindo essas mudanças mínimas às taxas observadas, ao efeito do oxigênio dissolvido e à condições hidráulicas (OKEY e ALBERTSON, 1989, apud METCALF & EDDY INC., 2004). O gráfico da Figura 3.10 mostra as curvas que representam as taxas de nitrificação em função da temperatura em filtros percoladores terciários, obtidas em estações localizadas em quatro regiões distintas.

Figura 3.10 - Efeito da temperatura sobre as taxas de nitrificação em filtros percoladores. Adaptado de Parker et al., (1990)

Nas regiões localizadas na parte superior dos filtros, as taxas de nitrificação devem ser limitadas pela disponibilidade e pelos processos difusivos do oxigênio. Geralmente, nas regiões superiores, as concentrações de nitrogênio amoniacal são elevadas, tornando o oxigênio como o fator limitante no processo de nitrificação.

Segundo Metcalf & Eddy Inc. (2004), dentro dessas condições, as reações podem assumir uma cinética de ordem zero, no que diz respeito ao nitrogênio. Nas regiões próximas à base, a concentração de nitrogênio amoniacal irá reduzir-se a um nível suficiente para que o nitrogênio torne-se o fator limitante no processo. Durante a operação de filtros, pode-se observar um acréscimo na taxa de nitrificação com o aumento na taxa de aplicação hidráulica em decorrência da eficiência de molhamento.

Segundo Metcalf & Eddy Inc. (2004), os maiores valores observados, nas taxas de nitrificação na estação de Central Valley, devem ser creditadas à natureza do leito (*cross flow*). As reduzidas taxas obtidas na estação de Zurich, segundo o mesmo autor, foram atribuídas à baixa eficiência na distribuição do afluente sobre o leito. Desta forma, observa-se que, em filtros percoladores, além das condições climáticas, taxas e natureza do leito, existe o efeito da distribuição do afluente sobre as taxas de nitrificação. Este efeito da distribuição do afluente sobre o leito nos filtros percoladores é conhecido como eficiência de molhamento

Boller e Gujer (1986a) apresentam os resultados obtidos em dois filtros percoladores terciários operando em diferentes condições. Os filtros foram alimentados com o efluente de um sistema de lodos ativados. O sistema de lodos ativados foi operado com uma idade do lodo de 1 dia para evitar a ocorrência de nitrificação. Nos filtros, com uma altura de 6,75 m de enchimento e 0,90 m de diâmetro, foram impostas vazões entre 28 m³/d e 90 m³/d. Na fase 2, os filtros operaram com uma taxa média de nitrogênio amoniacal e foram criadas condições favoráveis para o desenvolvimento de uma densa população de bactérias nitrificantes. Pela Figura 3.11, pode-se observar elevadas taxas de nitrificação na parte superior de ambos os filtros A e B e taxas mais reduzidas nas regiões próximas à base. As baixas concentrações de nitrogênio amoniacal tornaram o nitrogênio um fator limitante nas regiões inferiores dos filtros.

Fase 2
 Filtro A: Carga hidráulica = 3m/h - Recirculação=1:2
 Filtro B: Carga hidráulica = 3m/h - Recirculação=1:2

Figura 3.11 - Taxas de nitrificação em função da altura.

Fonte: Boller e Gujer (1986a)

Na fase 4, ambos os filtros operaram em condições favoráveis ao desenvolvimento de bactérias heterotróficas. Pode-se observar pela Figura 3.12, que as maiores taxas de nitrificação ocorreram nas regiões mais próximas à base, em ambos os filtros. As condições impostas nesta fase resultaram no desenvolvimento de uma comunidade de heterotróficas na região do topo. Desta maneira os gradientes de concentração de amônia foram maiores nas regiões mais próximas da base, resultando em taxas maiores de nitrificação nessas regiões.

Fase 4
 Filtro A: Carga Hidráulica= 3m/h - Recirculação=0
 Filtro B: Carga Hidráulica = 3m/h - Recirculação =0+10% Efluente Primário

Figura 3.12 - Taxas de nitrificação em função da altura. Fonte: Boller e Gujer (1986a)

Biesterfeld et al. (2003) conduzindo um trabalho sobre o potencial de desnitrificação em filtros percoladores, concluíram que a ocorrência do processo se deve as atividades microbiológicas no interior do biofilme. O autor chama atenção, ainda, para o fato do processo de desnitrificação persistir em situações onde a concentração de oxigênio, no meio líquido, era superior a 5mg/L, sugerindo que, mesmo em elevadas concentrações de oxigênio, uma região anóxica no interior do biofilme deverá ser mantida.

3.3.2.2.1 Inibição da nitratação - Aspectos gerais.

Nijhof e Klapwijk (1995) estudaram a influência da concentração de nitritos sobre a nitrificação em filtros percoladores. O acúmulo de nitrito em ambientes aquáticos e seu efeito inibidor sobre grupos de bactérias vêm sendo

publicados durante décadas.

A Resolução CONAMA 357/2005, não estabelece limites de lançamento nos corpos receptores para o nitrito e o nitrato, entretanto, estes dois elementos, constituem-se como parâmetros de qualidade de rios e lagos. Para rios e lagos de classe 1 a legislação impõem um limite máximo de 10 mg/L para o nitrato e 1 mg/L para o nitrito, sendo imposto os mesmos limites para rios e lagos de classe 2 e 3. Nota-se que a legislação é mais restritiva com relação às concentrações de nitrito, desta maneira, sistemas de tratamento, com concentrações significativas de nitrito, poderiam apresentar dificuldades em assegurar esses limites, principalmente no interior do estado de São Paulo, onde uma grande parte dos corpos receptores apresentam baixos fatores de diluição.

Anthonisen et al. (1976) apresentaram uma discussão sobre a inibição da nitrificação pela amônia e ácido nitroso. Alguns anos após a publicação de Anthonisen, Philips et al. (2002) retoma o tema, com a publicação de seu trabalho focando a discussão sobre a origem, causas e efeitos do aumento nas concentrações de nitrito em ambientes aquáticos.

Embora numerosos fatores tenham sido comentados na literatura, o mecanismo de acúmulo de nitrito ainda não é totalmente claro (PHILIPS et al. 2002).

Para Anthonisen et al. (1976) a nitrificação incompleta, com acúmulo de nitrito, vem sendo observada em muitas situações, sendo considerada um transiente em vários sistemas e ambientes. A Figura 3.13 mostra o comportamento típico de um sistema em batelada sem inibição (a) e com inibição (b)

Figura 3.13 - Esquema da transformação do nitrogênio - (a) sem inibição da nitrificação (b) com inibição, em um reator em batelada.
Adaptado: Anthonisen et al. (1976)

Dependendo das condições operacionais e das taxas de aplicação, variações na concentração de nitrito irão persistir sem a subsequente oxidação para nitrato, especialmente, em soluções ou águas residuárias com alta concentração de nitrogênio amoniacal ou orgânico (ANTONISEN et al., 1976).

Segundo Philips et al. (2002) o íon amônio (NH_4^+) pode causar o acúmulo de nitrito, mas o efeito da amônia livre (NH_3) parece ser mais pronunciado.

Para Anthonisen et al. (1976), certas concentrações de NH_3 (FA) serão completamente inibidoras para o grupo de bactérias nitrossomonas e nitrobacter e que, em baixas concentrações, o NH_3 terá um efeito inibidor menor para as nitrossomonas do que para as nitrobacters, tendo como resultado o acúmulo de nitrito ao longo do tempo.

Com o decréscimo no valor do pH, o nitrito formado estará em equilíbrio como ácido nitroso (FNA) e sua concentração continuará aumentando com o decaimento do valor do pH. Entretanto, o decréscimo no pH mudará o equilíbrio da amônia e a concentração da amônia livre (FA) irá reduzir. Adicionalmente a esse efeito, ocorrerá oxidação da amônia total para nitrato e a consequência direta disso será a redução do efeito inibidor sobre as nitrobacter devido a FA.

Existem, entretanto, situações nas quais o nitrito não é oxidado para nitrato, mesmo que condições favoráveis para a nitrificação estejam presentes, ou seja, com baixas concentrações de amônia e adequada aeração.

A presença de nitrito em ambientes com ausência de nitrogênio amoniacal (FA) foi postulada como sendo um resultado do efeito inibidor do ácido nitroso (FNA) e que, em certas concentrações, o FNA poderá inibir tanto as bactérias nitrossomonas como também as nitrobacters (ANTHONISEN et al., 1976).

Estas condições podem ser representadas por um diagrama esquemático que indica os fatores e situações que podem inibir a nitrificação. A Figura 3.14 mostra um esquema adaptado desse diagrama, baseados nas informações apresentadas por Anthonisen. O diagrama estrutura-se na existência de quatro zonas específicas. A Tabela 3.12 agrupa algumas características específicas de cada zona.

Tabela 3.12 - Características das quatro regiões principais do diagrama proposto por Anthonisen et al. (1976)

Região	Características
Zona 1	<ul style="list-style-type: none"> • representa a condição quando a concentração de amônia livre (FA) é alta o suficiente para inibir nitrossomonas e nitrobacters; • não ocorrerá nitrificação e haverá acúmulo de nitrogênio amoniacal.
Zona 2	<ul style="list-style-type: none"> • baixas concentrações de amônia livre (FA); • inibição apenas das nitrobacters; • acúmulo de nitrito.
Zona 3	<ul style="list-style-type: none"> • baixas concentrações de FA; • Não haverá inibição das nitrobacters e nitrossomonas; • completa nitrificação.
Zona 4	<ul style="list-style-type: none"> • Nitrificação inibida devido a presença de ácido nitroso (FA).

Figura 3.14 - Relações entre amônia livre, ácido nitroso e nitrificadoras.
Adaptado: Anthonisen et al. (1976)

A Tabela 3.13 apresenta uma série de valores divulgados na literatura sobre o efeito da concentração da amônia livre na oxidação do nitrito.

Tabela 3.13 - Comparação dos valores relatados na literatura sobre a inibição da oxidação do nitrito pela amônia livre. Fonte: Philips et al. (2002)

Efeito da concentração de nitrito em plantas aquáticas (1992)										
NH ₄ (mgNL ⁻¹)		NH ₃ (mgNL ⁻¹)		pH	T (°C)	Efeito observado		observação	Referência	
13		0,002		<7,2	20	Th.c. nitrito	inibição	oxidação	Fuxo contínuo	Praksam e Loehr (1972)
		0,008 - 0,82								Anthonnsisen et al. (1976)
		0,120		<7,2	20	>90% nitrito	inibição	oxidação	Fuxo contínuo	Praksam e Loehr (1972)
		0,500		7	18	Th.c. nitrito	inibição	oxidação		Muller et al. (1995)
13		0,600		7,8-8,1		>95% nitrito	inibição	oxidação	Reator batelada sequencial	Alleman e Irvine (1980)
acima de 1060	0,7-40			6,5-8,0		Nenhum efeito		Cultura enriquecida		Wong-Cjong e Loehr (1978)
	1-3				20	Acumulação de nitrito	temporária 50%	Biomassa não aclimatada		Turk e Mavinic (1989)
16	1,060			8,1	25	55% nitrito	inibição	oxidação	2,5mgO ₂ L ⁻¹	Balmelle et al. (1992)
40	2,950			8,1	25	90% nitrito	inibição	oxidação	2,5mgO ₂ L ⁻¹	Balmelle et al. (1992)
	5,000					continuada de nitrito	acumulação	Contato intermitente de NH ₃		Turk e Mavinic (1986)
	5-20				20	continuada de nitrito	acumulação	Biomassa não aclimatada		Turk e Mavinic (1989)
100	6,64			8,1	25	100% nitrito	inibição	oxidação	2,5mgO ₂ L ⁻¹	Balmelle et al. (1992)
35	8,9			7	15	50% nitrito	acumulação	de		Mauret et al. (1996)
490	13			7,8		100% nitrito	inibição	oxidação		Vestraete et al. (1977)
acima de 840	14-32			8		acumulação de nitrito		culturas		Wong-Chong e Loehr (1978)
40	15,5			9,2		acumulação de nitrito	transiente de		Reator batelada sequencial	Sauter e Alleman (1980)
500	20			8,2		>90% nitrito	inibição	oxidação	Valas de oxidação	Murray et al. (1975)
500	0,07-0,4			8		acumulação de nitrito acima de 300mgNI ⁻¹		Lodo ativado convencional		Surmacz-Gorska et al. (1997)
100	1,5			7,5-8,5	20-25	80-90% nitrito	acumulação de		Filtro submerso	Villaverde et al. (1997)

A Tabela 3.13 mostra uma faixa muito ampla para as concentrações de NH_3 e que estas faixas são significativamente influenciadas pelas condições operacionais como pH e temperatura.

Segundo Philips et al. (2002), existem várias publicações revelando a influência de diversos parâmetros sobre o acúmulo de nitrito, individualmente ou em combinação com outros fatores.

Surmacz-Gorska et al., (1997) apud Philips et al., (2002), relatam que, em seus experimentos, o pH das águas residuárias foi o parâmetro decisivo na inibição das bactérias oxidadoras de nitrato.

Para Tonkovic, (1998) apud Philips et al., (2002), o fenômeno de acúmulo de nitrito é independente do pH, mas deve-se antes às concentrações baixas de oxigênio dissolvido.

Glass e Silverstein, (1998) apud Philips et al., (2002), observaram um aumento significativo nas concentrações de nitrito quando o pH do licor misto foi aumentado de 7,5 a 9,0, em reatores tipo batelada, durante a nitrificação.

Além do pH, ácido nitroso e da concentração de NH_3 no meio líquido relatados por Anthonisen et al. (1976), Philips et al. (2002) atribuem à outros fatores abióticos o processo de acúmulo de nitrito, tais como: temperatura, hidroxilamina (NH_2OH), nitratos, oxigênio dissolvido, ácidos graxos voláteis, matéria orgânica, fosfatos e compostos inibitórios.

Na literatura, segundo Philips et al. (2002), são relatados inúmeros exemplos da influência dos parâmetros operacionais sobre o processo de acúmulo de nitrito. Os parâmetros mencionados foram: tempo de detenção hidráulica, idade do lodo, partida do sistema e os modos de operação.

4 MATERIAS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO GERAL DA PESQUISA

Os trabalhos de pesquisa na estação de tratamento de esgoto da SABESP, localizada em Lins-SP, iniciaram em meados de 2001 com a intenção de estudar as potencialidades de uso de efluentes de lagoas na prática de fertirrigação.

Paralelamente a isso, um grupo de pesquisadores da Escola Politécnica da USP desenvolveu pesquisas com o intuito de enquadrar os efluentes de lagoas dentro de padrões aceitáveis de lançamento nos corpos receptores, como mais tarde estabeleceria a Resolução CONAMA 357/05.

O estabelecimento em 2005 da nova Resolução, a necessidade de avaliar em longo prazo os efeitos da prática da irrigação com efluentes de lagoas sobre o solo e a possibilidade de manter as instalações existentes e reaproveitá-las em novas pesquisas, serviram como elemento de impulso a novas pesquisas sobre o reuso dos efluentes e o seu tratamento complementar.

No que diz respeito ao lançamento dos efluentes, fez-se a opção por sistemas mais simples para o pós-tratamento. Desta maneira, nessa nova etapa da pesquisa, foram adotadas lagoas complementares rasas e filtros biológicos percoladores. A adoção de lagoas rasas, para o tratamento complementar do efluente da lagoa facultativa, permitiu o aproveitamento de um antigo tanque de criação de peixes como estrutura básica para uma das lagoas em escala piloto, de uma pequena estrutura de recalque e a própria instalação elétrica para o uso no filtro biológico percolador.

4.2 DESCRIÇÃO DA BANCADA EXPERIMENTAL

4.2.1 Descrição das lagoas em escala real

Visando o tratamento complementar de lagoas facultativas através de processos mais simples, levando em consideração a operação e baixo custo do sistema, foi proposta a construção de duas lagoas rasas e um filtro percolador, sendo ambos em escala piloto.

Todo sistema foi alimentado com o efluente da lagoa facultativa da SABESP - Lins. A Tabela 4.1 apresenta algumas características de operação da estação com as dimensões das lagoas anaeróbia e facultativa e as vazões de operação. A Figura 4.1 mostra um esquema geral da estação de tratamento e a localização da unidade experimental dentro da estação.

Figura 4.1 - Esquema geral da estação de tratamento de esgoto da SABESP/Lins e unidade experimental

Tabela 4.1 - Dados de projeto do sistema de lagoas de estabilização de Lins/SP

Dados de Projeto	Lagoas	Lagoas
	Anaeróbias	Facultativas
População atendida (habitantes)	67.000	67.000
Vazão média de esgoto (m ³ /dia)	12.000	12.000
Carga de DBO (kg/dia)	3.012	1.506
Comprimento (m)	106,25	404,75
Largura (m)	64,25	77,75
Área superficial por lagoa (m ²)	6.826,6	31.469,3
Área superficial total (m ²)	20.479,68	94.407,9
Taxa de aplicação superficial de DBO (kg/ha.d)	1.470,7	159,5 (*)
Profundidade útil (m)	4,1	1,9
Inclinação dos taludes (V:H)	1:1	1:1
Volume útil por lagoa (m ³)	23.227,0	55.528,87
Volume útil total (m ³)	69.681,1	166.586,6
Tempo de retenção hidráulica (dias)	5,8	13,9
Taxa de aplicação volumétrica de DBO (kg/m ³ .d)	0,043	0,009(*)

Fonte: SABESP (1997)

(*) Considerada a eficiência de 50% na remoção de DBO pelas lagoas anaeróbias.

Na Figura 4.2 encontra-se uma foto aérea da estação de tratamento. Pode-se observar pela foto, que a estação conta com três lagoas anaeróbias operando em paralelo, seguidas por três lagoas facultativas.

Figura 4.2 - Vista aérea da ETE-SABESP/Lins

4.2.2 Descrição das lagoas piloto

Para avaliar a remoção de nitrogênio de efluente de lagoas facultativas através de tratamento complementar, foram construídas duas lagoas em alvenaria revestida com massa impermeabilizante.

O fundo da lagoa piloto foi executado em concreto armado sendo que, em toda a superfície do fundo, foi aplicada uma pintura impermeabilizante. A profundidade máxima das lagoas piloto foi de 1,10 m, tendo deixado apenas 0,10 m de borda livre. A Tabela 4.2 apresenta as principais informações sobre a geometria das lagoas piloto.

Tabela 4.2: Aspectos geométricos das lagoas pilotos

Piloto	Comprimento (m)	Largura (m)	Largura Chicana (m)	Relação Largura/Comprimento	Profundidade (m)			
					Fase 1	Fase 2	Fase 3	Fase 4
L1	8,00	2,00	1,00	1/16	1,00	1,00	1,00	0,70
L2	8,00	2,00	1,00	1/16	0,50	0,50	0,50	0,70

A Figura 4.3 mostra uma planta das lagoas piloto com seu respectivo corte e suas principais dimensões.

Figura 4.3 - Planta e corte esquemático das lagoas em escala piloto

Na Figura 4.4 encontram-se as fotos das lagoas em escala piloto L1 e L2 em operação.

Figura 4.4 - Lagoa Piloto L1 $h=1,0\text{m}$ (a) e Lagoa Piloto L2 $h=0,5\text{m}$ (b)

Conforme citado anteriormente, as lagoas piloto são alimentadas com o efluente de umas das lagoas facultativas da ETE-Lins. Duas linhas de tubulação foram construídas para levar o efluente dessa facultativa para o sistema de irrigação de uma cultura de cana. A partir de uma dessas linhas parte a derivação que leva parte desse efluente ao sistema de controle de vazão das lagoas piloto.

O sistema de controle proposto comporta-se hidraulicamente como um sistema de orifício, onde uma mangueira de plástico liga-se a um tubo de PVC. A altura da saída do tubo pode ser alterada através de um dispositivo semelhante a uma rosca sem fim.

Dessa maneira, a energia potencial disponível para o escoamento pode ser alterada, possibilitando regular a vazão até o valor desejado no experimento. Ressalta-se que a outra extremidade da mangueira está conectada a uma caixa de nível constante, para evitar flutuações na vazão de alimentação. A foto da Figura 4.5 mostra um detalhe do dispositivo de controle.

Figura 4.5 - Sistema de controle da vazão das lagoas em escala piloto

Na saída das lagoas existe um dispositivo móvel que permite a variação da profundidade da lagoa. Essa proposta permite verificar o efeito da profundidade sobre a remoção da amônia e em função das taxas de aplicação superficial. Na Figura 4.6 encontra-se uma foto onde é possível ver este dispositivo de saída. A Figura 4.7 mostra um esquema do dispositivo de controle da profundidade das lagoas piloto.

Figura 4.6 - Dispositivo de saída e controle da profundidade

Figura 4.7 - Esquema do dispositivo de controle da profundidade das lagoas piloto.

4.2.2.1 Etapas de operação e condições operacionais

O período operacional com as lagoas ficou dividido em 4 etapas com duração média de 6 meses para cada etapa. Este tempo foi estabelecido levando-se

em conta o tempo necessário para que o sistema entrasse em regime e o tempo para obter o número de dados necessários para gerar uma análise estatística consistente.

Antes do início da fase 01, foi realizado um ensaio de estratificação térmica onde foi possível avaliar o perfil de temperatura ao longo da profundidade e comprimento das lagoas piloto. As amostras para este ensaio foram obtidas através de um amostrador de colunas. Este amostrador foi construído de maneira a permitir a coleta de amostras pontuais. A Figura 4.8 do item 4.2.2.2 mostra detalhes do amostrador utilizado. Os valores de pH e temperatura das amostras coletadas foram mensuradas em um aparelho medidor de pH e temperatura. Os valores de OD foram mensurados com o medidor de OD da YSI modelo 5100.

O período de operação das lagoas piloto, na fase 01, foi de junho de 2007 até o final de janeiro de 2008. Durante essa fase, o sistema operou com um tempo de detenção hidráulica de 5 dias, sendo este tempo adotado para a lagoa L1 ($h=1,0$ m) e L2 ($h=0,5$ m). A taxa de aplicação de NTK (considerando uma concentração média na lagoa facultativa de 50 mgN/L), nessa fase para L1 e L2, foi em torno de 100 kgN/ha.d e 50kgN/ha.d, respectivamente.

Na fase 02, optou-se em manter a proposta anterior, ou seja, as duas lagoas piloto operando com o mesmo tempo de detenção hidráulica (TDH). Neste caso, ambas foram ajustadas com TDH de 10 dias. As taxas de aplicação superficial de NTK ficaram em torno de 50 kgN/ha.d e 25 kgN/ha.d, respectivamente. A Tabela 4.3 apresenta informações sobre as condições de operação das lagoas em cada fase de operação. O intervalo de tempo da fase 02 foi de fevereiro de 2008 até o final de julho de 2008.

Tabela 4.3 - Condições operacionais inicialmente previstas

Variável	Fase 1		Fase 2		Fase 3		Fase 4	
	$t_d = 5 \text{ d}$		$t_d = 10 \text{ d}$		$t_d = 15 \text{ d}$	$t_d = 7,5 \text{ d}$	$t_d = 5 \text{ d}$	$t_d = 10 \text{ d}$
	h=1,0	h=0,5	h=1,0	h=0,5	h=1,0	h=0,5	h=0,7	h=0,7
Área Superficial (m ²)	16	16	16	16	16	16	16	16
Volume Útil (m ³)	16	8	16	8	16	8	11,2	11,2
Vazão (m ³ /d)	3,2	1,6	1,6	0,8	1,06	1,06	2,12	1,06
Carga N-AMON (kgN/d)	0,096	0,048	0,048	0,024	0,03	0,03	0,06	0,03
TAS N-AMON (kgN/ha.d)	60	30	30	15	20	20	54	27
TAV N-AMON (kgN/m ³ .d)	0,006	0,006	0,003	0,003	0,02	0,04	0,006	0,003
Carga DQO (kg/.d)	0,64	0,32	0,32	0,16	0,21	0,21	0,42	0,21
TAS DQO (kg/ha.d)	400	200	200	100	132	132	262	131
TAV DQO (Kg/m ³ .d)	0,04	0,04	0,02	0,02	0,01	0,01	0,04	0,02
Carga DBO (kg/d)	0,224	0,112	0,112	0,056	0,07	0,07	0,15	0,08
TAS DBO (kg/ha.d)	140	70	70	35	46,38	46,38	94	47
TAV DBO (kg/m ³ .d)	0,014	0,014	0,007	0,01	0,004	0,008	0,014	0,007

A alteração na taxa de aplicação hidráulica das lagoas, durante a fase 03, resultou em dois tempos distintos de detenção hidráulica. Para a lagoa L1, o TDH ficou em torno de 15 dias e na L2, a alteração resultou em 7 dias de detenção. O período de operação da fase 03 foi de agosto de 2008 até o final de dezembro de 2008, totalizando um intervalo de tempo de 5 meses.

Para verificar o efeito da profundidade sobre a remoção de nitrogênio, durante a fase 4 optou-se alterar a profundidade para 0,70 m. Entretanto, como as duas lagoas possuem a mesma área superficial e mesma relação de comprimento e largura, decidiu-se colocar em operação apenas a lagoa L1. Desta forma, a fase 04 foi dividida em duas etapas, sendo que, na primeira etapa, L1 foi operada com um

TDH de 5 dias e na segunda etapa com 10 dias. A fase de operação das lagoas piloto na fase 04 foi de março de 2009 até dezembro de 2009.

4.2.2.2 Coletas de amostras

Foram estabelecidos dois métodos para retirada de amostras das lagoas. O primeiro método foi a retirada de amostras simples nos efluentes de toda linha de tratamento, que compreende a lagoa anaeróbia, facultativa e as duas lagoas piloto.

Ao longo do comprimento das lagoas pilotos foram estabelecidos, preliminarmente, setes pontos para retirada de amostras, sendo eles, uniformemente distribuídos. Nesse procedimento, ficou estabelecido empregar o segundo método que é caracterizado pela retirada de amostras através de uma coluna. Rivas (2002) recomenda o uso do método de coluna para retirada de amostras de efluentes de lagoas de estabilização devido a sua alta confiabilidade e redução dos custos de amostragem. Além disso, segundo o mesmo autor, esse tipo de procedimento apresenta confiabilidade similar ao de amostras compostas. As duas formas de retirada das amostras foram realizadas no período entre 12h e 14h. Este período é caracterizado pela grande atividade fotossintética.

O amostrador de coluna empregado na retirada de amostras foi confeccionado em PVC, com um diâmetro de 2" e comprimento total de 1 m. Na Figura 4.8, encontra-se duas fotos do amostrador de coluna, onde é possível ver algum detalhe.

Figura 4.8 - Amostrador de coluna empregado na retirada de amostras dos pontos intermediários.

Essa geometria foi escolhida para minimizar efeitos de turbulência na introdução da coluna no seio da massa líquida, e por apresentar menor dispersão estatística, conforme as recomendações extraídas das conclusões finais do trabalho publicado por Rivas (2002).

4.2.2.3 Ensaio hidrodinâmico

Para a elaboração da curva de distribuição dos tempos de residência, será considerada a teoria apresentada na revisão sobre hidrodinâmica de lagoas. O ensaio hidrodinâmico ocorreu após a fase 04 de operação das lagoas piloto, tendo ocorrido em meados de agosto de 2010.

4.2.2.3.1 Escolha do tipo de traçador

Para realização do ensaio nas lagoas, priorizou-se escolher um traçador que permitisse sua detecção em baixas concentrações e que não alterasse o modelo de fluxo devido a gradientes de concentrações.

Como, optou-se em conduzir o estudo com as lagoas em operação, o traçador deveria ter como característica importante, o comportamento de não afetar a atividade biológica dentro das lagoas e não ser adsorvidos ou absorvidos em qualquer componente existente.

Dentro do contexto citado, os traçadores fluorescentes apresentam as características mais adequadas. Dentre os diversos traçadores existentes no mercado, fez-se a opção pelo uso da rodamina WT como agente traçador, apresentando alta solubilidade na água, baixa taxa de decaimento em águas naturais e pode ser facilmente detectável em uma região espectral não comum aos demais materiais que podem ser encontrados nas águas naturais.

4.2.2.3.2 Cálculo do volume de traçador a ser utilizado e tratamento das amostras

O volume e o tempo de introdução do traçador são fatores que podem afetar a curva estímulo-resposta. A quantidade de rodamina WT necessária para a realização do ensaio pode ser estimada segundo Polisel (2005) pela equação 4.1

$$W = \frac{C_{\min} \times K \times V_t}{1000 \times P} \quad (4.1)$$

sendo: W = volume da solução de rodamina WT a ser injetada em ml

$C_{\min}$ = concentração mínima do traçador ao final do ensaio = 2µg/L

K = relação $C_0/C_{\min}$ = 8 para rodamina WT em lagoas de estabilização (COSSIO, 1993, apud POLISEL, 2005)

P = % de rodamina WT na solução, usualmente 0,2 (POLISEL, 2005)

V_t = volume da lagoa em m³

A concentração mínima de detecção da rodamina WT, em aparelhos fluorômetros mais simples e comumente utilizados nos ensaios com este tipo de

traçador, encontra-se na ordem de $2\mu\text{g/L}$ (WILSON, 1996; DOREGO e LEDUC, 1996, apud POLISEL, 2005).

Para o cálculo do volume da solução de traçador ser injetada, utilizou-se uma solução de rodamina WT a 0,05%. O volume obtido foi de aproximadamente 600 mL.

4.2.2.3.3 Rotina do ensaio hidrodinâmico

A rotina de retirada de amostras do efluente foi iniciada após uma hora do lançamento do traçador na corrente líquida. No início do período de amostragem, os intervalos foram de 2h. A princípio, ficou estabelecido executar o ensaio com intervalos de 4h, após transcorridos o tempo teórico de detenção, entretanto, para obter uma curva mais consistente, esse período foi reduzido para intervalos de 2h, seguindo este intervalo até o final do ensaio.

O período de ensaio foi em torno de 2,5 dias, sendo adotado um TDH de um dia. Segundo Dorego e Leduc (1996, apud POLISEL, 2005) as amostras deverão ser coletadas em intervalos de tempos iguais e o período mínimo de coleta deverá ser 2 vezes o tempo de detenção teórico.

Simi e Mitchell (1999, apud POLISEL, 2005), em um estudo sobre lagoas aplicadas no tratamento de refinaria de petróleo, consideraram um período equivalente a 3 vezes o tempo de detenção teórico.

As amostras de traçador retiradas dos efluentes das lagoas pilotos foram centrifugadas para evitar problemas de interferências nas leituras devido à presença de sólidos suspensos, constituídos principalmente por algas, conforme recomendado por Cossio (1993, apud KELLNER et al., 2009).

Para quantificar a concentração de rodamina WT das amostras, foi utilizado o fluorômetro modelo FM 109525 da marca TURNER QUANTECH. Os padrões utilizados na calibração do aparelho foram preparados com água deionizada.

4.2.3 Descrição dos filtros percoladores

O estudo sobre tratamento complementar de lagoas facultativas através de uso de sistemas mais simples, como lagoas, contemplou, focando a remoção de nitrogênio como objeto principal, a caracterização de filtros percoladores como uma das possíveis alternativas para atingir índices que sejam compatíveis com os limites restritivos que vem sendo impostos pela legislação.

O filtro percolador foi construído em escala piloto, possuindo altura e diâmetro útil de 4 m e 1,2 m respectivamente. O corpo principal do filtro foi confeccionado em polipropileno, com uma espessura de 1 cm.

Para avaliar o efeito do material suporte sobre a remoção de nitrogênio, o filtro foi dividido em duas partes iguais por meio de uma chapa também em polipropileno de 1 cm de espessura formando, desta maneira, dois filtros preenchidos com dois materiais distintos para meio suporte.

A primeira metade do filtro (Filtro de Pedra) utilizou brita variando de 4 a 8 cm como material suporte para o desenvolvimento dos microrganismos. De acordo com a literatura, a área superficial específica média para esse tipo de material é de $70 \text{ m}^2/\text{m}^3$. A segunda metade utilizou anéis plásticos com diâmetro efetivo de 84 mm fornecidos pela empresa Mizumo. Segundo o fabricante, a área superficial específica é de $100 \text{ m}^2/\text{m}^3$. Na Figura 4.9 está uma foto em planta do filtro percolador

Figura 4.9 - Vista superior do filtro percolador

Pela Figura 4.10 pode ser observada uma planta esquemática contendo alguns detalhes do filtro piloto e uma foto reduzida dos dois materiais utilizados como meio suporte.

Figura 4.10 - Vista Esquemática superior do filtro percolador

O filtro é alimentado com o efluente da lagoa facultativa da estação de tratamento. Como se planejou iniciar a operação dos filtros com taxas de aplicação

hidráulicas baixas, foi adotado um pequeno sistema de recalque para alimentação, reduzindo, desta forma, a possibilidade das vazões no período da noite se tornarem muito pequenas, trazendo problemas com a distribuição do efluente.

O efluente da lagoa facultativa chega a um tanque de equalização, de onde parte uma ramificação que liga o sistema de recalque ao tanque. Na linha de recalque instalou-se um rotômetro de alma cônica. Nas extremidades dos rotômetros foram instalados registros de agulhas, possibilitando o controle da vazão. O sistema de controle da vazão conta ainda com um sistema by-pass que possibilita a operação de manutenção e o escorvo da bomba quando sua operação é interrompida. Na Figura 4.11 encontra-se uma foto do sistema de controle de vazão.

Figura 4.11 - Sistema de controle de vazão do filtro percolador

O sistema de distribuição do efluente está localizado no topo do filtro. Na Figura 4.12 encontra-se uma ilustração do dispositivo. Como as vazões de início de operação são baixas, optou-se em ligar o sistema de distribuição a um motor elétrico.

Figura 4.12 - Esquema do distribuidor do filtro percolador

O sistema é formado por um distribuidor ligado a um redutor de velocidade. A conexão entre o redutor e o motor elétrico é feita por meio de duas roldanas conectadas por uma correia tipo A1.

O distribuidor é formado por uma caixa de PVC e uma haste perfurada de 40 mm de diâmetro. Nessa caixa de PVC há um anel metálico que liga o conjunto ao redutor. A rotação do sistema é controlada através de um inversor de frequência. A estimativa da velocidade (η) de rotação foi feita através da equação 4.2 proposta por Metcalf & Eddy Inc., (2004)

$$\eta = \frac{(1+R) \times (q) \times (10^3 \text{ mm/m})}{(A) \times (DR) \times (60 \text{ min/h})} \quad (4.2)$$

sendo:

- η = velocidade de rotação, rpm
- q = taxa de aplicação hidráulica, $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{h}$
- R = Razão de reciclo
- A = número de braços do distribuidor
- DR = taxa de dosagem, mm/pass

Pela equação 4.2, obteve-se uma velocidade de rotação de 1 rpm

O filtro foi apoiado em uma base de concreto, onde foram previstas aberturas para adequada ventilação do filtro, garantindo uma concentração de

oxigênio compatível para que o processo de nitrificação não fosse inibido.

4.2.3.1 Decantadores

A maioria dos sistemas que utilizam biomassa aderida a um meio suporte possuem uma parcela de biomassa desprendida que sai com o efluente final. Para melhorar as características dos efluentes de cada filtro previu-se dois decantadores que operam em paralelo.

Os decantadores foram dimensionados baseando-se em uma taxa de escoamento superficial máxima de $30 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ e vazão máxima de $23,6 \text{ m}^3/\text{d}$. Com essas duas considerações, foi possível a construção dos decantadores utilizando aduelas de concreto com 1 m de diâmetro.

A profundidade útil ficou estabelecida em 2,5 m e o fundo foi executado em forma cônica com 0,80 m de profundidade. Uma foto dos decantadores pode ser observada na Figura 4.13.

Figura 4.13 - Decantadores do filtro percolador

4.2.3.2 Etapas de operação e condições operacionais

A etapa de operação dos filtros em escala piloto ficou dividida em 4 fases de acordo com as taxas de aplicação. Para obter um estudo completo das taxas de aplicação sobre o processo de nitrificação, os filtros foram projetados para trabalharem com uma taxa de aplicação variando entre taxa baixa (0,07-0,22 kgDBO/m³.d), intermediária (0,24-0,48kgDBO/m³.d) e alta taxa (0,6-3,2kgDBO/m³.d).

Optou-se iniciar a operação com taxa baixa fazendo-se a alteração de forma crescente até que fosse estabelecida a operação em alta taxa. O critério de parada foi exatamente a taxa na qual o processo de nitrificação encerrasse.

Cada fase teve uma duração de 150 a 180 dias. O estabelecimento deste período levou em conta o número de dados necessários para uma análise estatística consistente. Entretanto, na última fase, as taxas foram alteradas semanalmente até que o critério de parada fosse atendido.

A Tabela 4.4 apresenta as condições de operação impostas em cada fase de operação dos filtros percoladores.

Tabela 4.4: Condições operacionais nos filtros percoladores em escala piloto.

Variável	1ª Fase		2ª Fase		3ª Fase		4ª Fase	
Material do leito	Pedra	Plástico	Pedra	Plástico	Pedra	Plástico	Pedra	Plástico
TES(m ³ /m ² .d)	4,2	4,2	6,4	6,4	8,5	8,5	10-18	10-18
Vazão (m ³ /d)	2,4	2,4	3,6	3,6	4,8	4,8	6-10	6-10
Carga de NKT (kgN/d)	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,2	0,3-0,5	0,3-0,5
TAV NKT (kgN/m ³ .dia)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1	0,1-0,2	0,1-0,2
TAS NTK (KgN/m ² .d)*	0,0006	0,0004	0,001	0,0009	0,001	0,0009	0,002-0,003	0,001-0,002
Carga de DQO (kg/d)	0,6	0,6	0,5	0,5	1,1	1,1	1,5-2,5	1,5-2,5
TAV DQO (kg/m ³ .dia)	0,2	0,2	0,2	0,28	0,5	0,5	0,7-1,1	0,7-1,1
TAS DQO (KgDQO/m ² .d)	1,0	1,0	0,6	0,7	2,0	2,5	2,6-3,0	2,6-3,0
Carga de DBO (kg/d)	0,1	0,1	0,2	0,2	0,4	0,4	0,2-1,7	0,2-1,7
TAV DBO (kg/m ³ .dia)	0,1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1-0,3	0,1-0,3
TAS DBO (KgDBO/m ² .d)*	0,0006	0,0004	0,0006	0,0004	0,001	0,0009	0,001-0,01	0,001-0,007
Tempo	6/2007–4/2008		4/2008-8/2008		8/2008-9/2009		10/2009-12/2009	

* TAS = taxa de aplicação superficial baseada na área total do meio suporte

A Tabela 4.4 foi elaborada considerando uma concentração média de NTK no efluente da lagoa facultativa de 50 mgN/L. Os valores das taxas de aplicação superficial foram baseadas na área superficial do filtro.

4.2.3.3. Coletas de amostras

Foram coletadas amostras de toda a linha de tratamento que compõem o sistema piloto. Isso inclui, além do efluente do filtro piloto, o afluente da estação, o efluente da lagoa anaeróbia e facultativa. Não foram realizadas coletas após os decantadores do filtro, pois não era objetivo verificar a eficiência com relação à remoção de sólidos, focando o trabalho no que diz respeito às concentrações de nitrogênio.

As amostras foram coletadas no período entre as 12h e 14h, sendo rapidamente conduzidas ao laboratório. A técnica utilizada para coleta das amostras foi amostragem simples. Foram também coletadas amostras simples de pontos intermediários localizados ao longo da altura dos filtros.

Em cada filtro foram previstos sete pontos de amostragem, sendo eles espaçados uniformemente em toda a altura. Para esses pontos, apenas foram realizadas análises para determinar as concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato. Na Figura 4.14 encontra-se um corte esquemático do filtro, onde é possível observar os pontos intermediários e na Figura 4.15 existe uma foto de perfil do filtro.

Figura 4.14 - Vista esquemática do filtro percolador

Figura 4.15 - Foto de perfil do filtro percolador

4.3 TÉCNICAS ANALÍTICAS

4.3.1 Parâmetros físico-químicos e biológicos

Os métodos analíticos empregados para obtenção dos parâmetros físico-químicos e biológicos foram realizados de acordo com o *Standard Methods* (APHA; AWWA; WEF, 2005), sendo realizados nas dependências do laboratório de saneamento da Escola Politécnica da Universidade de São Paulo e no laboratório de química da Unilins-SP.

As análises de controle, tais como: Oxigênio Dissolvido (OD), temperatura, alcalinidade, pH, Amônia, Nitrogênio Total Kjeldhal, nitrito e nitrato foram realizadas no laboratório de química – Unilins, com a intenção de manter a integridade das amostras.

As demais análises, tais como: sólidos, DBO (total e filtrada) e DQO (total e filtrada) foram realizadas na Escola Politécnica. A Tabela 4.5 apresenta a rotina das análises propostas para o sistema piloto constituído pelas lagoas rasas.

Tabela 4.5 - Rotina dos ensaios analíticos propostos: Lagoas rasas em escala piloto.

Variável	Frequência
Temperatura	Duas vezes por semana
pH	Duas vezes por semana
Oxigênio Dissolvido	Duas vezes por semana
Nitrogênio Total Kjeldahl	Duas vezes por semana
Nitrogênio Amoniacal	Duas vezes por semana
Fósforo Solúvel	Uma vez por semana
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Uma vez por semana
Demanda Química de Oxigênio	Uma vez por semana
Alcalinidade Total	Uma vez por semana
Série de Sólidos	Uma vez por semana
Clorofila <i>a</i>	Uma vez por semana
Coliformes Totais e <i>E. coli</i>	Uma vez a cada quinze dias
Ovos Viáveis de Helmintos	pelo menos uma das fases

A Tabela 4.6 apresenta a rotina de análises referentes ao sistema piloto composto pelo filtro percolador.

Tabela 4.6 - Rotina dos ensaios analíticos propostos - Filtro percolador em escala piloto.

Variável	Frequência
Temperatura	Duas vezes por semana
pH	Duas vezes por semana
Oxigênio Dissolvido	Duas vezes por semana
Nitrogênio Total Kjeldahl	Duas vezes por semana
Nitrogênio Amoniacal	Duas vezes por semana
Nitrito	Duas vezes por semana
Nitrato	Duas vezes por semana
Fósforo Solúvel	Uma vez por semana
Demanda Bioquímica de Oxigênio	Uma vez por semana
Demanda Química de Oxigênio	Uma vez por semana
Alcalinidade Total	Uma vez por semana
Série de Sólidos	Uma vez por semana
Clorofila <i>a</i>	pelo menos em uma das fases
Nitritantes	pelo menos em uma das fases
Nitratantes	pelo menos em uma das fases

Na Tabela 4.7 encontra-se um resumo dos ensaios propostos para os pontos intermediários nas lagoas rasas e no filtro percolador. Como comentado anteriormente, ao longo do comprimento das lagoas piloto foram estabelecidos sete pontos de amostragem uniformemente distribuídos. Nos filtros percoladores também foram estabelecidos sete pontos amostrais distribuídos uniformemente ao longo da altura.

Tabela 4.7 - Rotina dos ensaios analíticos propostos: Lagoas piloto e filtro percolador.

Pontos Intermediários	Tipo de amostra	Análises	Frequência
Filtro percolador.	simples	- Nitrito - Nitrato - Nitrogênio Amoniacal	pelo menos uma vez em cada etapa
Lagoa rasa	coluna	Nitrogênio Amoniacal pH* OD* Temperatura*	pelo menos uma vez em cada etapa

* apenas no ensaio de estratificação

Na Tabela 4.8 encontra-se um resumo dos parâmetros físico-químicos e biológicos com as informações sobre o método empregado para suas determinações.

Tabela 4.8 - Parâmetros e métodos aplicados na investigação experimental

Parâmetros	Método	Descrição
DBO	5200 B	DBO de 5 dias a 20°C.
DQO	5220 B	Refluxo aberto
Sólidos Totais	2540 B e 2540 C	Gravimétrico
Sólidos em Suspensão	2540 D e 2540 E	Gravimétrico
Nitrogênio Amoniacal	4500 N-NH ₃	Destilação seguida de titulação potenciométrica com ácido sulfúrico 0,02 N
Nitrogênio Total	4500 -N _{org}	Método Macro-Kjeldhal
Nitrito*	4500 NO ₂ ⁻	Espectrofotométrico com leitura em comprimento de onda igual a 543 nm
Nitrato*	4500 NO ₃ ⁻ I	Redução automatizada em equipamento tipo FIA (<i>Flow injection analysis</i>)
Alcalinidade	2320 B	Titulação potenciométrica
Bactérias Nitrificantes	9245-B	Tubos múltiplos
Helminotos	10550 B	Análise do sedimento da amostra
Clorofila a	10200 H	Espectrofotométrico
Fósforo Solúvel	4500-P E	Espectrofotométrico com leitura em comprimento de onda igual a 880 nm
OD	4500 O G	Eletrodo membrana seletiva
pH	4500-H ⁺ B	Eletrométrico
Coliformes	9223 B	Colilert para tubos múltiplos

* Imediatamente após a coleta, sendo as amostras filtradas em membrana de diâmetro de poro = 0,45 µm;

4.4 TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

O tratamento estatístico para a pesquisa ficou estabelecida sobre dois núcleos. O primeiro núcleo trata-se da estatística descritiva dos dados, onde é possível através de gráficos Box- Whiskers observar as medianas e a variâncias dos dados obtidos durante a operação dos sistemas pilotos. O segundo tratamento a ser trabalhado, constituindo assim o segundo núcleo de aplicação das estatísticas, tratará das possíveis inferências, tais como: comparar o efeito do tipo de meio

suporte sobre a transformação do nitrogênio amoniacal. O teste adotado para isso foi da comparação das médias com variâncias desconhecidas e diferentes entre si.

A aplicação deste teste requer que as amostras sigam uma distribuição normal. Para testar a normalidade sobre o grupo de parâmetros de interesse, foi utilizado o método de Kolmogorov-Smirnov. Caso o grupo de interesse não siga uma distribuição normal, o teste, que deverá ser adotado, será não paramétrico, sendo adotado o teste de Wilcoxon para amostras pareadas. Entretanto, para o grupo de parâmetros como, taxa de aplicação hidráulica e eficiências na redução da concentração de nitrogênio amoniacal, o método de Kolmogorov-Smirnov revelou possível normalidade das amostras. Desta forma, será utilizado este dois grupos de parâmetros para comparação do efeito do meio suporte sobre a transformação do nitrogênio amoniacal.

Segundo Magalhães e Lima (2008), para formalizar a situação apresentada, supõem-se que os dois grupos são representados por variáveis aleatórias e independentes. Chamando os dois grupos por X e Y, assume-se que:

- $X_i \sim N(\mu_x, \sigma^2_x), i = 1, \dots, n_1;$
- $Y_j \sim N(\mu_y, \sigma^2_y), j = 1, \dots, n_2.$

sendo: n_1 e n_2 o número de elementos do grupo X e Y, respectivamente.

O teste das médias pode ser escrito na forma:

- $H_0: \mu_x = \mu_y$ (hipótese de nulo);
- $H_a: \mu_x \neq \mu_y$ (hipótese alternativa).

Definindo o estimador de $\bar{D}$ como a diferença entre $\bar{X} - \bar{Y}$, pode-se escrever então a equação 4.3 como:

$$E(\bar{D}) = \mu_x - \mu_y \quad (4.3)$$

A estimativa para a variância pode ser escrita como:

$$\delta^2(\bar{D}) = \frac{S^2x}{n_1} + \frac{S^2y}{n_2} \quad (4.4)$$

A quantidade (T) que deverá ser utilizada no teste, trabalhando com a distribuição t-Student, poderá ser escrita como:

$$T = \frac{\bar{D} - (\mu_x - \mu_y)}{\sqrt{\frac{S^2x}{n_1} + \frac{S^2y}{n_2}}} \sim t_{\text{obs}} \quad (4.5)$$

Para prosseguir no teste é necessário determinar a região crítica de rejeição de H_0 . Para isso foi adotado $\alpha = 0,05$ (5% de significância) sob a hipótese de

$$\alpha = P(\text{rejeitar } H_0 | H_0 \text{ verdadeira}) \quad (4.6)$$

Escrevendo novamente a hipótese dada pela equação 4.6 temos:

$$\alpha = P(T < -t_c \text{ ou } T > t_c \mid H_0) \quad (4.7)$$

A quantidade crítica t_c é obtida usando as tabelas t-Student, com ν graus de liberdade. Para o caso de variâncias desconhecidas e diferentes, os graus de liberdade devem ser estimados pela equação 4.8.

$$\nu = \frac{\left(\frac{S^2x}{n_1} + \frac{S^2y}{n_2}\right)^2}{\frac{(S^2x/n_1)^2}{n_1 - 1} + \frac{(S^2y/n_2)^2}{n_2 - 1}} \quad (4.8)$$

5. RESULTADOS E DISCUSSÕES

São apresentados os resultados e as discussões pertinentes ao monitoramento da bancada experimental. Para isso, o capítulo 5 foi dividido em duas seções principais. A primeira seção trata da apresentação dos resultados referentes às lagoas em escala piloto (item 5.1) e a segunda (item 5.2) faz referência aos resultados e discussões do filtro percolador.

5.1 RESULTADOS EXPERIMENTAIS – LAGOAS PILOTO

Inicialmente são apresentados os resultados referentes ao estudo hidrodinâmico realizado na lagoa piloto, analisando-se as consequências sobre os perfis de concentração de oxigênio dissolvido, pH e temperatura ao longo do comprimento e profundidade das duas lagoas piloto.

Em seguida são apresentados os resultados obtidos nas 4 fases experimentais. Dentro de cada fase, os resultados foram divididos em grupos de parâmetros mensurados, com exceção da série nitrogenada que foi analisada à parte, por constituir o objeto principal da pesquisa.

5.1.1 Estudo de caracterização do escoamento das lagoas em escala piloto

5.1.1.1 Ensaio hidrodinâmico – Determinação das curvas de distribuição dos tempos de residência

A Figura 5.1 mostra os gráficos contendo as curvas de concentração de rodamina WT em função do tempo, as curvas $E(t)$, $F(t)$, $E(\Theta)$. Pode-se observar no gráfico de concentração de rodamina em função do tempo um comportamento fora do padrão nas primeiras horas de ensaio, com o pico de concentração ocorrendo poucas horas após o lançamento.

Esse tipo de comportamento pode ser creditado à existência de curto circuito, principalmente pelo efeito do vento sobre a superfície das lagoas. Posteriormente, pode-se observar uma melhor condição de mistura do traçador e um comportamento mais regular. Visualmente, foi possível observar uma pluma de traçador se dirigindo para saída numa velocidade mais elevada durante o início do ensaio.

Figura 5.1 - Curvas relativas ao ensaio hidrodinâmico: (a) concentração de rodamina WT (a); (b) Curva E(t); (c) Curva F(t) e (d) Curva E(Θ)

A partir do tratamento dos dados foi possível obter um tempo médio de detenção de 11 h. O tempo de detenção hidráulica teórico adotado no ensaio foi de 24 h. A dispersão (D/uL) obtida foi de 2 e considerando a curva resposta C proposta por Levenspiel (1972), números de dispersão acima 0,2 podem ser considerados grandes, indicando uma tendência da lagoa operar como um reator de mistura completa.

A quantidade de reatores equivalentes obtidos a partir dos resultados do ensaio foi de 1,21 reatores, confirmando a tendência para um reator de mistura completa. Esses resultados, quando confrontados com os de estratificação térmica, assumem um comportamento paradoxal, uma vez que reatores misturados não deveriam apresentar nenhuma estratificação. Entretanto, Arceivala (1983, apud KELLNER et al., 2009), observou que algumas lagoas de estabilização, principalmente, aquelas localizadas em regiões de temperatura elevada, embora tenham número de dispersão alto, o meio líquido pode não estar completamente

misturado, estando as lagoas estratificadas termicamente.

Torres et al. (2000 apud KELLNER et al., 2009), verificaram, em experimentos conduzidos em lagoas facultativas, que embora o TDH real tenha sido 1/5 do TDH teórico, o volume ativo comportou-se hidraulicamente como um reator de mistura completa. Existe também a possibilidade dessa estratificação não seja duradoura e que ocorra a homogeneização durante o período noturno, com forte mistura entre as camadas.

Embora o tempo de detenção hidráulica adotado no ensaio hidrodinâmico tenha sido menor do que os valores de tempos praticados em todas as fases experimentais (5 a 15 dias), o número de dispersão, definido como D/uL , sugere que, para maiores velocidades médias de escoamento, seu valor deverá ser menor, considerando o coeficiente de dispersão e a geometria do reator constante. Sendo assim, é bem provável que, para os tempos praticados durante as fases experimentais, as lagoas tenham mantido a característica de um reator tendendo a mistura completa. Os perfis de amônia, no item 5.1.6.5, mostram uma distribuição homogênea da concentração ao longo do comprimento da lagoa. Este fato sugere que, possivelmente, as lagoas apresentaram um grau de mistura grande durante todas as fases experimentais.

5.1.1.2 Perfis de oxigênio, pH e temperatura – Lagoa Piloto ($h=1,00m$)

A Figura 5.2 mostra o gráfico dos perfis de pH ao longo da profundidade e comprimento da lagoa piloto com 1 m de profundidade.

Figura 5.2 - Perfil de pH ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L1

Pode-se observar que os maiores valores de pH ocorreram próximo à superfície indicando uma atividade fotossintética maior na região do epilânio. O perfil ao longo da lagoa revela pouca variação deste parâmetro no sentido do escoamento. Os valores de pH obtidos durante o ensaio ficaram na faixa de 8,2 e 8,4. Comparando os valores obtidos a 0,20m da superfície e 0,80m, observa uma redução nos valores de pH de 0,5 em relação à média apresentada na superfície.

A diferença nos valores de pH diminuíram à medida que se distancia da superfície, esse padrão pode ser observado entre os valores de pH de 0,4m e 0,8m de profundidade.

O gráfico na Figura 5.3 apresenta os perfis de temperatura da lagoa e sua variação ao longo do comprimento.

Figura 5.3 - Perfil de temperatura ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L1

Pode-se observar um gradiente vertical de temperatura praticamente constante ao longo do comprimento da lagoa de 1 m de profundidade. O gradiente médio observado foi de aproximadamente $3^{\circ}\text{C}/\text{m}$.

Kellner et al. (2009) estudando a influência da estratificação térmica no volume útil e no comportamento hidrodinâmico de lagoas de estabilização conclui que, em lagoas localizadas em regiões de clima tropical com temperaturas superiores a 25°C , pode ocorrer estratificação térmica com gradiente térmico característico de $0,6^{\circ}\text{C}/\text{m}$. Essa estratificação pode contribuir de sobremaneira na diminuição do volume útil da lagoa e consequentemente influenciar no tempo de detenção hidráulica.

Na Figura 5.3 pode-se observar temperaturas ligeiramente superiores próximo à entrada das lagoas. Esse comportamento pode ter ocorrido devido à temperatura associada ao afluente da lagoa facultativa, que pode ser um pouco mais elevada.

Na Figura 5.4 encontra-se o gráfico dos perfis de oxigênio dissolvido ao longo da profundidade e comprimento das lagoas. Observam-se concentrações maiores próximo a superfície da lagoa, seguindo um padrão conhecido nas lagoas facultativas e de maturação.

Figura 5.4 - Perfil de OD ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L1

As maiores concentrações próximas à superfície devem-se à intensa atividade fotossintética das algas que se localizam nessa região. Nas regiões próximas ao fundo da lagoa, as concentrações foram menores, atingindo valores

perto de 1 mg/L. O decréscimo observado, considerando as concentrações de OD nas profundidades de 0,20 m e 0,80 m, foi em torno de 3 mgO₂/L.

5.1.1.3 Perfis de oxigênio, pH e temperatura – Lagoa Piloto (h=0,50m)

A Figura 5.5 mostra o gráfico que contém os valores de pH ao longo do comprimento e profundidade da lagoa de 0,5 m de profundidade. Pode-se observar um padrão semelhante ao que foi apresentado na lagoa L1, embora exista um indicativo de que os valores de pH na lagoa de 0,5 m são ligeiramente maiores que na lagoa de 1,0 m. Esta evidência, será confirmada após transcorrido um tempo maior de operação, devendo-se lembrar que este ensaio foi realizado nas primeiras semanas de operação do sistema piloto.

Figura 5.5 - Perfil de pH ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L2

O gráfico da Figura 5.6 mostra o perfil de temperatura. Na lagoa de 0,5 m o gradiente vertical de temperatura foi na ordem de 5°C/m, sendo este valor indicativo de estratificação térmica.

Figura 5.6 - Perfil de temperatura ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L2

A Figura 5.7 mostra o gráfico do perfil de OD. Verifica-se o mesmo padrão de comportamento apresentado na lagoa de 1,0 m. Entretanto, os valores de OD na lagoa de 0,5 m foram maiores comparativamente à lagoa de 1,0 m, indicando uma atividade fotossintética maior nessa lagoa. Para a elaboração dos perfis, as amostras, em ambas as lagoas, foram coletadas no mesmo período de tempo. Este intervalo ficou situado entre as 12h e 15h.

Figura 5.7 - Perfil de OD ao longo da profundidade e comprimento - Lagoa L2

As concentrações de oxigênio próxima ao fundo ficaram em torno de 2,0 mgO₂/L, indicando que as condições aeróbicas foram preponderantes nessa lagoa.

5.1.2 Resultados do monitoramento – Fase 01

São apresentados os resultados de DBO, DQO, sólidos, coliformes totais e fecais, fósforo e nitrogênio oriundo do monitoramento das lagoas piloto durante a fase 01. Os percentis que estão representados nos gráficos Box-Whiskers referem-se ao percentil de 25% e 75%.

5.1.2.1 Parâmetros de controle - Fase 01

O gráfico da Figura 5.8 mostra as médias, percentis e valores máximos e mínimos das principais condições operacionais das lagoas durante a fase 01.

Figura 5.8 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 01)

Durante essa fase as lagoas operaram com o mesmo tempo de detenção hidráulica próximo de 5 dias, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.8 (a), e com taxas de aplicação superficial de DBO diferentes. O valor médio aplicado na lagoa de 1,0 m (L1) foi de 0,01 kgDBO/m².d e 0,005 kgDBO/m².d na lagoa de 0,5 m, conforme pode ser visto na Figura 5.8 (c). A variância observada em torno da média

deve-se às flutuações nos valores de DBO do afluente e na vazão de alimentação das pilotos.

Pelo gráfico (d) da Figura 5.8 verifica-se que a taxa média de aplicação volumétrica de DBO, nas duas lagoas piloto, foi de 0,01 kgDBO/m³.d. A Tabela 5.1 apresenta os principais critérios e parâmetros de projeto utilizados no dimensionamento de um sistema australiano seguido de uma lagoa de maturação.

Tabela 5.1 - Principais critérios e parâmetros de projeto em um sistema australiano seguido de uma lagoa de maturação

Parâmetros	Lagoa anaeróbia	Lagoa facultativa	Lagoa de maturação
Carga Volumétrica (kgDBO/m ³ .d)	0,1 a 0,35	-	-
Profundidade (m)	4,0 a 5,0	1,5 a 3,0	0,8 a 1,5
Taxa de Aplicação Superficial ((kgDBO/ha.d)	1000 a 3000	150 a 300	75% da LF
TDH (dias)	3 a 6	15 a 45	3 a 4

Fonte: adaptado de von Sperling (2002)

As lagoas, nesta fase, operaram com taxas de aplicação superficial inferior ao valor mínimo apresentado na Tabela 5.1. O tempo de detenção hidráulica foi superior ao valor mínimo recomendado na literatura, conforme a Tabela 5.1.

5.1.2.2 Condições ambientais nas lagoas – Fase 01

As Figuras 5.9 e 5.10 mostram os gráficos Box-Whiskers relativos aos valores de temperatura e pH, respectivamente. A Figura 5.9 mostra o gráfico contendo a estatística básica sobre os valores de temperatura do efluente da lagoa facultativa e das duas lagoas piloto. Durante a fase 01 a média de temperatura do ar foi de 28°C.

A temperatura média registrada no sistema piloto e na lagoa facultativa que o alimentou foi de 24°C, sendo observados valores máximos próximos de 32 °C. A fase 01 iniciou-se próximo à metade do inverno; desta maneira, é possível

observar valores abaixo dos 20°C.

Figura 5.9 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Durante essa fase operacional foram observados valores médios de pH na lagoa L1 de 8,2, ocorrendo valores máximos de 9,0 e mínimo 7,6. Por outro lado, na lagoa L2, de 0,5 metro de profundidade, os valores de pH foram ligeiramente maiores sendo observado um valor médio de 8,7, com valores máximos de 9,5 e mínimos de 7,9.

Para as taxas de aplicação hidráulica empregadas e TDH médio de 5 dias, pode-se inferir que a lagoa L2 apresentou uma atividade fotossintética melhor que a lagoa mais profunda, ou seja, de 1 m de profundidade. Este fato é evidenciado quando os valores de pH são confrontados com os valores de OD do gráfico da figura 5.11 deste item.

Figura 5.10 – Box-Whiskers: pH – Efluente lagoa facultativa e pilotos (Fase01)

A Figura 5.11 mostra o gráfico Box-whiskers resultantes do monitoramento do oxigênio dissolvido.

Figura 5.11 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Pode-se observar altos níveis de concentração de oxigênio nas duas lagoas piloto L1 e L2. Os valores médios observados foram 3 mgO₂/L, 7 mgO₂/L e 16 mgO₂/L para a lagoa facultativa, L1 e L2, respectivamente. Pelo gráfico, é possível verificar valores máximos acima de 20 mgO₂/L e 30 mgO₂/L para as pilotos L1 e L2. Os valores de supersaturação de oxigênio indicam uma atividade fotossintética intensa, principalmente, na lagoa piloto de menor profundidade (L2). Estes valores de supersaturação ocorreram na faixa de horário compreendida entre 12 h e 14 h, sendo que as coletas de amostras ocorreram neste intervalo de tempo.

A Figura 5.12 mostra o gráfico contendo os resultados obtidos sobre o monitoramento da alcalinidade no afluente e efluente das lagoas piloto.

Figura 5.12 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Observa-se um certo consumo de alcalinidade nas lagoas L1 e L2. Os valores médios observados foram 400 mgCaCO₃/L, 350 mgCaCO₃/L e 300 mg/LCaCO₃/L para lagoa facultativa, L1 e L2, respectivamente.

As reduções nos valores de alcalinidade foram, levando em consideração os valores médios, de 50 mgCaCO₃/L e 100 mgCaCO₃/L, respectivamente nas lagoas L1 e L2. Este consumo de alcalinidade pode ser creditado à eliminação da amônia por volatilização em pH elevados. Este comportamento será confrontado com os resultados obtidos na monitoração do nitrogênio amoniacal.

5.1.2.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 01

Na Tabela 5.2, encontra-se o resumo estatístico básico para a DBO total e filtrada. A partir desses dados e dos cálculos dos percentis foram gerados os gráficos Box-Whiskers para esses dois parâmetros.

Tabela 5.2 - Resumo estatístico da DBO Total e Filtrada – Fase 01

Estatística	DBO Total (mg/L)			DBO Filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	9	9	9	7	8	8
Mínimo	37	30	35	11	5	4
Máximo	65	84	151	28	25	24
Coef. Var	0,18	0,36	0,58	0,35	0,71	0,50
Média	53	46	62	19	11	12
Mediana	50	41	49	17	8	12
Desvio padrão	9	17	36	7	8	6
Méd - 1 desvpad	44	29	26	12	3	6
Méd + 1 desvpad	63	62	97	26	19	19

As Figuras 5.13 e 5.14 mostram os gráficos dos resultados da DBO total e filtrada, respectivamente para a lagoa facultativa, L1 e L2.

Figura 5.13: Gráfico Box-Whiskers: DBO total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Levando em consideração os valores médios observados para DBO total, pode-se verificar uma pequena redução na concentração da DBO, na L1, sendo que na lagoa L2, de 0,5 m de profundidade, a DBO total média, resultou maior que da facultativa. Os valores médios observados foram de 53 mgDBO_T/L na facultativa, 46 mgDBO_T/L e 62 mgDBO_T/L para L1 e L2 respectivamente.

O valor médio observado em L2 deve ser visto com uma certa cautela, já que a média pode estar sendo influenciada pelos valores extremos, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.13. Os valores extremos podem ocorrer por erros durante o procedimento experimental. Além disso, o gráfico da Figura 5.17 mostra que a concentração de clorofila-a na lagoa L2 foi superior aos valores encontrados na facultativa e L1, podendo contribuir dessa forma no acréscimo de DBO total no efluente da lagoa L2. Este fato pode ter ocorrido da mesma forma com o efluente da lagoa L1 que, da mesma forma, apresentou valores de clorofila-a superiores aos encontrados no efluente da lagoa facultativa.

Figura 5.14 - Gráfico Box-Whiskers: DBO filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Pelo gráfico da Figura 5.14 verifica-se a ocorrência de remoção da DBO filtrada em ambas as lagoas piloto. As concentrações médias foram de 19 mgDBO_F/L, 11 mgDBO_F/L e 12 mgDBO_F/L para a lagoa facultativa, L1 e L2 respectivamente. As reduções em termos da DBO filtrada não foram significativas nas lagoas L1 e L2, sendo esse um comportamento esperado em lagoas em série. Como ocorreu remoção em relação a DBO filtrada pode-se inferir que, o aumento do valor da DBO total na lagoa L2 pode estar relacionado com o aumento da fração particulada de matéria orgânica. As concentrações de clorofila-a e SST no efluente da lagoa L2 foram maiores do que no efluente da lagoa facultativa que alimenta o sistema, como pode ser verificado nos gráficos das Figuras 5.17 e 5.20

A Tabela 5.3 mostra os valores da estatística básica da DQO bruta e filtrada da fase 01.

Tabela 5.3 - Resumo estatístico da DQO Total e Filtrada – Fase 01

Estatística	DQO Total (mg/L)			DQO Filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	16	16	16	3	3	3
Mínimo	133	146	112	45	19	47
Máximo	299	1189	399	79	73	85
Coef. Var	0,2	0,8	0,3	0,3	0,6	0,3
Média	240	314	240	61	54	64
Mediana	262	225	243	58	71	60
Desvio padrão	46	256	66	17	30	19
Méd - 1 desvpad	193	58	173	44	24	44
Méd + 1 desvpad	286	570	306	77	85	83

As Figuras 5.15 e 5.16 mostram os gráficos contendo as estatísticas referentes a DQO total e filtrada.

Figura 5.15 - Gráfico Box-Whiskers: DQO total – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Figura 5.16 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Pelo gráfico da Figura 5.15 verifica-se que, em termos de valores médios da DQO bruta, não houve remoção para essa variável. Novamente, observa-se a influência dos valores extremos sobre a média, sendo este comportamento mais significativo na lagoa L1, devendo ser visto com certa cautela o valor da média. As médias foram 240 mgDQO_T/L, 314mgDQO_T/L e 240mgDQO_T/L para facultativa, L1 e L2.

Na série histórica dos dados de DQO, como pode ser visto na Tabela A.1.4, do apêndice A.1.2, é possível verificar que as reduções na concentração da DQO ocorreram, principalmente, no início de operação. É provável que esse acréscimo no valor da concentração da DQO seja reflexo do aumento da fração particulada, devido o desenvolvimento da biomassa algal. Com relação a DQO filtrada as concentrações médias foram 61 mgDQO_F/L, 54 mgDQO_F/L e 64 mgDQO_F/L para facultativa, L1 e L2 respectivamente. O valor da concentração da DQO filtrada na L2 pode ter sido influenciada por uma pequena fração de material particulada, devido ao processo de filtração, que não conseguiu reter totalmente a

biomassa algal.

A Figura 5.17, a seguir, apresenta o gráfico dos resultados da clorofila-a. Nesta fase foram realizadas apenas duas determinações de clorofila-a, não sendo portanto, conveniente a representação na forma Box-Whiskers.

As concentrações de clorofila-a estão compatíveis ao que é apresentado na literatura. No início da fase 01, observa-se uma concentração maior na lagoa L1. Esse comportamento muda no decorrer das outras fases e são observados valores maiores na lagoa L2 de 0,5 m. A concentração de clorofila-a na facultativa também se enquadra dentro dos valores apresentados na literatura. Moreno et al. (1988) realizando um estudo sobre um modelo matemático para prever a eficiência de lagoas facultativas profundas, encontrou concentrações de clorofila-a na ordem de 700 $\mu\text{g/L}$. Pearson et al. (1987) pesquisando a influência dos parâmetros físico-químicos (pH, temperatura) na sobrevivência da bactéria fecal em lagoas de estabilização, encontrou concentrações de clorofila-a em lagoas de maturação na ordem de 1600 $\mu\text{g/L}$.

Figura 5.17 - Gráfico Box-Whiskers: Clorofila-a – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

As concentrações elevadas de clorofila na lagoa L2 parecem ter uma relação com os altos valores de pH observados na lagoa L2. Isso pode evidenciar que a atividade fotossintética, foi maior na lagoa de menor profundidade. Além disso, o gráfico mostra que nas duas amostragens, as concentrações de clorofila-a no efluente da facultativa foram menores do que nas lagoas em escala piloto. Isto pode explicar o problema da fração particulada na DBO e DQO total no efluente das lagoas piloto.

Na Tabela 5.4 encontra-se a estatística básica dos sólidos totais e totais voláteis e as Figuras 5.18 e 5.19, a seguir, mostram os gráficos Box-Whiskers envolvendo as estatísticas para esses dois parâmetros.

Tabela 5.4 - Resumo estatístico de ST e STV – Fase 01

Estatística	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	10	10	9	10	10	9
Mínimo	625	625	600	225	238	238
Máximo	725	878	815	338	415	345
Coef. Var	0,05	0,11	0,10	0,15	0,17	0,12
Média	666	706	688	274	299	292
Mediana	656	688	700	263	291	300
Desvio padrão	33	77	67	41	51	36
Méd - 1 desvpad	634	628	621	233	247	256
Méd + 1 desvpad	699	783	755	316	350	328

Figura 5.18 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Observa-se um aumento na concentração de sólidos totais nos efluentes das lagoas L1 e L2. Esse aumento pode ser creditado ao SST no efluente das mesmas. As concentrações médias observadas foram em torno de 700 mgST/L para as lagoas L1 e L2. As concentrações médias de sólidos totais voláteis foram próximas de 300 mgSTV/L em ambas lagoas pilotos.

Figura 5.19 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

A Tabela 5.5 mostra os valores estatísticos básicos para os sólidos suspensos totais e voláteis.

Tabela 5.5 - Resumo estatístico de SST e SSV – Fase 01

Estatística	SST (mg/L)			SSV (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	10	10	10	10	10	10
Mínimo	94	116	102	78	84	90
Máximo	184	280	182	162	244	148
Coef. Var	0,2	0,4	0,2	0,3	0,4	0,2
Média	140	152	137	120	129	118
Mediana	129	123	132	110	106	116
Desvio padrão	34	55	27	34	51	22
Méd - 1 desvpad	107	97	110	86	78	95
Méd + 1 desvpad	174	207	164	154	180	140

Pode-se observar, pelo gráfico da Figura 5.20, que a concentração média de sólidos suspensos totais na lagoa L1 foi um pouco superior ao valor médio de sólidos do efluente da lagoa facultativa. Na lagoa L2 a concentração média foi semelhante ao valor médio encontrado na facultativa. Os valores médios foram de 140 mgSST/L na facultativa e 152 mgSST/L e 137 mgSST/L para L1 e L2 respectivamente. No caso dos sólidos suspensos voláteis, o comportamento foi semelhante ao SST. As concentrações médias de SSV foram de 120 mgSSV/L na lagoa facultativa, 129 mgSSV/L e 118 mgSSV/L nas lagoas L1 e L2, respectivamente.

Figura 5.20 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Figura 5.21 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

As variações observadas no comportamento dos sólidos nas lagoas piloto estão mais ligadas às possíveis variações ocorridas na biomassa algal representada pela clorofila-a. O aumento nas concentrações de sólidos no efluente das lagoas em relação ao efluente da facultativa acompanha, da mesma forma, o acréscimo no valor da clorofila-a na lagoa L1 e L2; desta maneira, significando a influência da biomassa algal nas frações de sólidos. Nesta fase a relação SSV/SST apresentou um valor médio de 0,86. Desta forma, grande parte dos sólidos suspensos é representado pela fração orgânica e em lagoas facultativas e de maturação, a maior parte dos sólidos é representada pela biomassa algal. Portanto, a biomassa algal pode ter influenciado as concentrações de sólidos, DBO e DQO, nos efluentes das lagoas piloto.

5.1.2.4 Coliformes – Fase 01

Na Tabela 5.6 encontra-se a estatística básica para os coliformes totais e *E.coli*.

Tabela 5.6 - Resumo estatístico de coliformes totais e *E.coli* – Fase 01

Estatística	Coliformes totais			<i>E.coli</i>		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	5	5	5	5	5	5
Mínimo	4,00E+05	2,30E+04	5,00E+04	2,00E+05	7,00E+03	8,00E+03
Máximo	2,40E+06	1,30E+06	5,72E+05	5,00E+05	8,00E+05	2,00E+05
Coef. Var	0,8	1,33	0,67	0,4	1,37	0,74
Média	1,00E+06	3,88E+05	2,96E+05	2,98E+05	2,37E+05	1,15E+05
Mediana	6,97E+05	2,00E+05	2,30E+05	2,72E+05	1,30E+05	1,30E+05
Desvio padrão	8,03E+05	5,16E+05	1,98E+05	1,20E+05	3,23E+05	8,54E+04

As concentrações de coliformes totais foram elevadas no efluente das lagoas L1 e L2, não atendendo ao padrão estabelecido na legislação. Entretanto, observa-se que houve redução de coliformes nas lagoas, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.22. Pelo gráfico, é possível verificar que as concentrações de coliformes no efluente da lagoa facultativa são elevadas, ocorrendo valor médio de 1,00E+06 NMP/100 mL. As médias observadas nas lagoas L1 e L2 foram 4,00E+05 NMP/100 mL e 3,00E+05 NMP/100 mL.

Figura 5.22 - Gráfico Box-Whiskers: Coliformes Totais – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

As concentrações de *E.coli* em ambas as lagoas piloto, também ficaram elevadas, observando valores médios na ordem de $2,00\text{E}+05$ NMP/100 mL e $1,00\text{E}+05$ NMP/100mL.

Figura 5.23 - Gráfico Box-Whiskers: E.coli – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

As remoções obtidas a partir das análises das concentrações afluente e efluente de coliformes totais nas pilotos foram no máximo de 97% e mínimo de 60%. As eficiências observadas no que diz respeito aos coliformes fecais foram no máximo de 97% e mínimo de 70%. Segundo von Sperling (1996a) as lagoas de maturação devem atingir elevadíssimas eficiências na remoção de coliformes, (na faixa entre 99,9 e 99,9%), para serem cumpridos os padrões de utilização de uso do efluente em irrigação. Além disso, a qualidade do efluente deve ser tal, que assegure o padrão de qualidade do corpo receptor onde ele está sendo lançado.

As baixas eficiências podem ter uma relação com os tempos reais de residência. A grande dispersão observada durante o ensaio hidrodinâmico sugere que as pilotos se comportaram como reatores de mistura completa e o gradiente térmico obtido indica que essas lagoas possivelmente sofreram efeitos da estratificação, influenciando no tempo de residência.

Nessa fase as lagoas operaram com o mesmo tempo de detenção teórico, ou seja, de cinco dias. Embora exista uma grande dispersão em torno das médias amostrais, uma discussão focalizando apenas as médias, irá sugerir que, para essa condição de operação, a lagoa mais rasa foi mais eficiente na destruição dos coliformes. Lagoas rasas tendem a apresentar valores de pH mais elevado e além disso, tendem a sofrer os efeitos da incidência da radiação UV sobre toda massa líquida (na direção da profundidade) mais efetivamente do que as lagoas

mais profundas.

Considerando que as lagoas L1 e L2 comportam-se como reatores de mistura completa, sendo esse fato compatível com o resultado obtido no estudo hidrodinâmico, e adotando um valor de $1,5 \text{ d}^{-1}$ para a constante de decaimento bacteriano, sendo este um valor razoável para lagoas de maturação, os valores

esperados, de acordo com a fórmula de contagem de coliformes $N = \frac{N_0}{1 + k_b \times t}$ (von SPERLING, 1996a), seria para L1 e L2 igual a $1,2\text{E}+05$ NMP/100mL de coliformes totais. Para *E.coli*, os valores de densidade, considerando mistura completa, seria de $3,5\text{E}+04$ NMP/100mL para L1 e L2.

Considerando que o comportamento hidráulico das lagoas fosse próximo a um reator em regime de fluxo pistonado, a concentração de coliformes nas lagoas piloto seria de $5,5\text{E}+02$ NMP/100mL para coliformes totais e $1,6\text{E}+02$ NMP/100mL para *E.coli*. Para as lagoas operando como reatores de fluxo disperso, a densidade de coliforme total no efluente das lagoas L1 e L2 seria de $7,42\text{E}+04$ NMP/100 mL, considerando a dispersão obtida igual a 2, conforme o ensaio hidrodinâmico. Para *E.coli*, a densidade, considerando o modelo de fluxo disperso, seria de $2,2\text{E}+04$ NMP/100 mL.

Levando em consideração a ordem de grandeza dos valores de coliformes totais e *E.coli*, verifica-se que os resultados para esses dois parâmetros nas lagoas, em conformidade com o que foi verificado no estudo hidrodinâmico, ficaram muito próximos aos encontrados para reatores em regime hidráulico de mistura completa.

Embora o foco principal do trabalho seja a remoção do nitrogênio amoniacal, as lagoas devem ser projetadas não para atender um objetivo específico, mas englobar objetivos múltiplos no tratamento. As lagoas necessitam de tempos de detenção geralmente grandes para atender remoções satisfatórias de coliformes. Na literatura frequentemente são citados tempos acima de 8 dias para começar a ser observado remoções elevadas para esse parâmetro.

5.1.3 Resultados do monitoramento – Fase 02

Durante a fase 02, as profundidades das lagoas pilotos foram mantidas as mesmas da fase 01, ou seja, as lagoas L1 e L2 funcionaram com 1,0 m e 0,5 m, de profundidade, respectivamente. Nesta etapa, apenas o tempo de detenção foi alterado, desta forma, as lagoas foram submetidas a um tempo de 10 dias, resultando em diferentes taxas de aplicação em cada lagoa.

5.1.3.1 Parâmetros de controle – Fase 02

Os gráficos Box-Whiskers (a), (b), (c) e (d) da Figura 5.24 mostram os valores médios e os percentis das principais condições operacionais das lagoas L1 e L2

Figura 5.24 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 02)

O gráfico (a) da Figura 5.24 mostra que, na média, as lagoas em escala piloto foram submetidas a um tempo de detenção hidráulica de 10 dias. O gráfico mostra uma certa dispersão em torno da média devido às flutuações ocorridas na

vazão de alimentação. As taxas de aplicação superficial de DBO, durante essa fase, foram de 0,005 kgDBO/m²d para lagoa L1 e 0,0025 kgDBO/m²d na L2. Novamente, observa-se uma certa dispersão em torno da média amostral associada às flutuações da DBO afluente e pequenas flutuações na vazão de alimentação dos pilotos, conforme pode ser visto no gráfico (c). No gráfico (d) pode ser observado que ambas as lagoas L1 e L2 foram submetidas a uma taxa média de aplicação volumétrica de DBO de 0,005 kgDBO/m³.d. As dispersões em torno das médias, também são decorrentes das flutuações que ocorreram na vazão de alimentação e da DBO.

5.1.3.2 Condições ambientais nas lagoas – Fase 02

As temperaturas durante essa fase seguiram o mesmo padrão apresentado na fase 01, em que foi observado um valor médio de 25 °C e o valor máximo de 32°C. A média da temperatura do ar durante a fase 02 foi de 26°C. A Figura 5.25 mostra o gráfico com os valores de temperatura.

Figura 5.25 - Gráfico Box-Whiskers - Temperatura – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

A Figura 5.26 mostra os valores de pH observados na facultativa, L1 e L2.

Figura 5.26 - Gráfico Box-Whiskers - pH – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

Observam-se valores de pH mais elevados na lagoa L2, mais rasa, sendo um indicativo de uma atividade fotossintética maior em relação a L1. Entretanto, deve-se recordar que a taxa de DBO em L2 é metade da taxa aplicada em L1. A Tabela 5.7 apresenta o resumo estatístico do pH para as fases 01 e 02.

Tabela 5.7 - Resumo estatístico pH – Fase 01 e 02

Estatística	Fase 01			Fase 02		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	29	29	29	33	33	33
Mínimo	7,0	7,1	6,6	6,9	7,1	8,1
Máximo	8,3	9,1	9,4	8,2	8,8	10,4
Coef. Var	0,04	0,05	0,07	0,04	0,06	0,07
Média	7,7	8,1	8,7	7,4	7,9	9,1
Mediana	7,6	8,1	8,7	7,4	7,8	9,1
Desvio padrão	0,3	0,4	0,6	0,3	0,4	0,6

Confrontando com os dados de pH obtidos durante a fase 01, verifica-se um acréscimo, embora não significativo na lagoa L2. A diminuição das taxas de aplicação de DBO em L2 parece não ter alterado a média e os valores máximos observados, sendo estes, da mesma ordem da fase 01. As médias observadas foram de 8,0 e 9,0 na lagoa L1 e L2 respectivamente.

Nesta fase, a lagoa L2 continuou apresentando valores de supersaturação de oxigênio, indicando uma atividade fotossintética intensa, embasadas pelos valores de pH acima de 9,0. As concentrações médias observadas foram de 9,0 mgO₂/L e 18 mgO₂/L na lagoa L1 e L2 respectivamente. Valores de concentração maiores ou iguais a 30 mgO₂/L ocorreram em ambas as pilotos, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.27.

Nos momentos em que foram observados valores de OD muito elevados, coletaram-se amostras em recipientes de vidro onde era verificado visualmente o escape de micro bolhas do meio líquido para a atmosfera.

Figura 5.27 - Gráfico Box-Whiskers - OD – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

O gráfico da Figura 5.28 mostra que, assim como na fase 01, ocorreu uma redução nas concentrações de alcalinidade total. Essa redução na alcalinidade, assim como argumentado anteriormente, pode estar relacionada ao efeito de volatilização da amônia, onde parte da alcalinidade associada ao nitrogênio amoniacal é perdida.

Figura 5.28 - Gráfico Box-Whiskers - Alcalinidade – Lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

Os decréscimos observados foram de 50 mgCaCO₃/L e 100 mgCaCO₃/L para L1 e L2 respectivamente. A alcalinidade média observada foi 330 mgCaCO₃/L na lagoa L1 e 290 mgCaCO₃/L para L2.

5.1.3.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 02

A redução na taxa de aplicação não alterou significativamente o valor médio da DBO total comparada ao valor médio da fase 01. Entretanto, a alteração na taxa de aplicação superficial de DBO promoveu uma redução da DBO total no efluente da lagoa de 0,5 m (L2). Nesta fase, a lagoa L2 opera com o mesmo tempo de detenção hidráulica e metade da taxa de aplicação superficial de DBO na L1. Na Tabela 5.8 encontra-se a estatística básica para estes dois parâmetros e a Figura 5.29 mostra o gráfico Box-Whiskers para a DBO total.

Tabela 5.8 - Resumo estatístico da DBO total e filtrada – Fase 02

Estatística	DBO Total (mg/L)			DBO Filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	8	8	8	8	8	8
Mínimo	27	32	27	7	4	2
Máximo	82	72	82	19	13	11
Coef. Var	0,3	0,2	0,4	0,3	0,4	0,5
Média	51	58	42	14	7	6
Mediana	53	59	37	15	7	6
Desvio padrão	18	12	17	4	3	3

Figura 5.29 - Gráfico Box-Whiskers - DBO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

As concentrações médias observadas de DBO total foram de 51 mgDBO_T/L, 58 mgDBO_T/L e 42 mgDBO_T/L para o efluente da facultativa, L1 e L2. As concentrações máximas ocorridas foram de 81 mgDBO_T/L e as mínimas observadas ficaram em torno de 42mgDBO_T/L. A Figura 5.30 mostra o gráfico Box-Whiskers para

DBO filtrada.

Figura 5.30 - Gráfico Box-Whiskers - DBO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

Verifica-se uma redução no valor das concentrações da DBO filtrada nas lagoas piloto para as taxas de aplicação superficial de DBO empregadas. A alteração do tempo de detenção hidráulica de 5 para 10 dias provocou aumento da eficiência de redução da DBO filtrada, mas estes ganhos nas eficiências não são elevados, Levando-se em consideração a equação de decaimento de matéria orgânica para reatores de mistura completa, verifica-se que as remoções são dependentes do tempo de detenção das lagoas. Entretanto, em um sistema de lagoas em série, a eficiência, após a primeira lagoa da série, tende a ser menor, devido à diminuição do gradiente de concentração de matéria orgânica após a primeira lagoa. Este comportamento pode ser verificado nas lagoas L1 e L2. Ambas as lagoas são unidades complementares, sendo, portanto, as últimas unidades de uma série de lagoas.

As concentrações médias da DBO filtrada foram de 14 mgDBO_F/L para a lagoa facultativa, 7 mgDBO_F/L e 6 mgDBO_F/L para L1 e L2. As máximas concentrações ocorridas foram de 12 mgDBO_F/L. Na Tabela 5.9 encontra-se a estatística básica realizada sobre a DQO total e filtrada.

Tabela 5.9 - Resumo estatístico da DQO total e filtrada – Fase 02

Estatística	DQO total (mg/L)			DQO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	8	8	8	6	6	6
Mínimo	28	38	143	4	19	27
Máximo	826	229	745	392	147	139
Coef. Var	1,1	0,4	0,7	1,8	0,9	0,8
Média	227	173	298	84	54	53
Mediana	162	188	256	24	33	31
Desvio padrão	253	66	195	152	49	44

O valor médio da DQO total no efluente da lagoa L2 foi significativamente superior quando comparado com a média apresentada no da facultativa. Este comportamento pode estar relacionado com as flutuações na concentração da biomassa algal que agrega DQO ao efluente da lagoa L2. Além disso, a média da DQO total pode ter sido influenciada pelos valores extremos ocorridos nesta fase. A Figura 5.31 mostra o gráfico contendo as estatísticas básicas da DQO total.

Figura 5.31 - Gráfico Box-Whiskers - DQO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

As concentrações médias da DQO filtrada foram próximas a 50 mgDQO_F/L em ambas as pilotos. Os valores máximos observados foram próximos a 150 mgDQO_F/L. Para a DQO total os valores médios apresentados foram de 200 mgDQO_T/L e 300 mgDQO_T/L para L1 e L2, conforme o gráfico da Figura 5.31.

Segundo Mara (2004), os efluentes de lagoas de estabilização (lagoas facultativas e maturação) podem possuir concentrações elevadas de DBO e sólidos suspensos, mas a maior parte dessa DBO e SS está associada à biomassa algal no efluente. No teste de DBO, a biomassa algal consome oxigênio quando os

recipientes utilizados no teste são colocados em uma incubadora com ausência de luz, entretanto, nos corpos receptores, a biomassa algal produz mais oxigênio do que elas necessitam para respiração e, além disso, grande parte dessa biomassa será consumida por organismos superiores. Desta forma, o autor conclui que os valores de DBO e SS no efluente das lagoas não podem ser observados com o mesmo rigor quanto aos limites impostos aos efluentes de outros sistemas de tratamento.

Figura 5.32 - Gráfico Box-Whiskers - DQO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

As duas lagoas piloto apresentaram valores elevados de clorofila-a. Na Tabela 5.10 encontra-se o resumo estatístico sobre a clorofila-a da fase 02. As concentrações médias de clorofila-a, conforme o gráfico da Figura 5.33, foram 1000 µg/L e 1700 µg/L nas lagoas L1 e L2, respectivamente.

Tabela 5.10 - Resumo estatístico da Clorofila-a – Fase 02

Estatística	Clorofila-a (µg/L)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	5	5	5
Mínimo	277	698	745
Máximo	1064	1329	3115
Coef. Var	0,49	0,25	0,61
Média	624	984	1681
Mediana	573	956	1306
Desvio padrão	306	249	1019

Figura 5.33 - Gráfico Box-Whiskers - Clorofila-a – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

As Figuras 5.34 e 5.35 mostram os resultados obtidos em termos de sólidos totais e totais voláteis e na Tabela 5.11 encontra-se o resumo estatístico para estes dois parâmetros.

Tabela 5.11 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 02

Estatística	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	7	7	7	7	7	7
Mínimo	325	350	313	125	150	125
Máximo	775	838	716	300	363	313
Coef. Var	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,2
Média	609	620	592	248	244	250
Mediana	657	625	640	275	243	263
Desvio padrão	141	148	138	64	68	61

Comparando com a fase 01, verifica-se uma pequena redução, nesta fase, nos valores de sólidos totais nas duas pilotos, sendo observado a mesma redução no que diz respeito aos sólidos totais voláteis. As concentrações médias de sólidos totais foram de 620 mgST/L e 592 mgST/L para L1 e L2, respectivamente, e em torno de 250 mgSTV/L para sólidos totais voláteis em ambas as lagoas piloto, como pode ser visto na Tabela 5.12.

Tabela 5.12 - Resumo estatístico ST e STV – Comparação entre as fases 01 e 02

Fase	Estatística	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
		Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
1	Média	666	706	688	274	299	292
	Mediana	656	688	700	263	291	300
	Desvio padrão	33	77	67	41	51	36
2	Média	609	620	592	248	244	250
	Mediana	657	625	640	275	243	263
	Desvio padrão	141	148	138	64	68	61

Figura 5.34 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Totais (ST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02) **Figura 5.35 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)**

A Tabela 5.13 mostra o resumo estatístico para os sólidos suspensos totais e suspensos voláteis. A representação gráfica, das estatísticas desses dois parâmetros, pode ser verificada nos gráficos das Figuras 5.36 e 5.37.

Tabela 5.13 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 02

Estatística	SST (mg/L)			SSV (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	7	7	7	7	7	7
Mínimo	125	150	125	69	46	110
Máximo	300	363	313	183	197	267
Coef. Var	0,3	0,3	0,2	0,3	0,5	0,3
Média	248	244	250	113	105	162
Mediana	275	243	263	104	98	166
Desvio padrão	64	68	61	39	49	56

Com relação aos sólidos suspensos totais e voláteis, verifica-se a mesma tendência apresentada pelas concentrações de clorofila-a, ou seja, as maiores concentrações de sólidos suspensos ocorreram na lagoa L2. Neste caso, a concentração de sólidos suspensos no efluente da L2 pode estar influenciada pela fração de sólidos associada à biomassa algal.

Figura 5.36 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02) **Figura 5.37 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Voláteis (SSV)– Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)**

As concentrações médias observadas para SSV foram 105mgSSV/L na lagoa L1 e 160 mgSSV/L na lagoa L2, como pode ser visualizado no gráfico da Figura 5.37. Tipicamente são encontradas concentrações de sólidos suspensos na ordem de 100 mgSST/L, dos quais a maioria são representadas por algas (VON SPERLING et al., 2009b)

5.1.3.4 Coliformes – Fase 02

Nesta fase, as concentrações de coliformes fecais continuaram elevadas mesmo com a redução na taxa de aplicação superficial e o aumento do tempo de detenção hidráulica de 5 para 10 dias. Na Tabela 5.14 encontra-se o resumo estatístico para o coliforme total e *E.coli* da fase 02.

Tabela 5.14 - Resumo estatístico Coliforme total e *E.coli* – Fase 02

Estatística	Coliforme total (NMP/100mL)			<i>E.coli</i>		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	7	7	7	7	7	6
Mínimo	2,80E+05	5,10E+04	3,10E+03	1,60E+05	2,00E+03	2,10E+03
Máximo	1,25E+07	1,01E+06	6,90E+05	6,80E+05	7,30E+04	6,80E+04
Coef. Var	1,7	1,1	1,2	0,5	1,1	1,0
Média	2,60E+06	2,95E+05	2,03E+05	3,46E+05	2,70E+04	2,47E+04
Mediana	1,02E+06	2,25E+05	9,10E+04	3,30E+05	1,60E+04	1,65E+04
Desvio padrão	4,38E+06	3,23E+05	2,41E+05	1,61E+05	3,01E+04	2,56E+04

As concentrações médias de coliformes totais foram de 2,6E+06 NMP/100 mL na facultativa, 3,0E+05 NMP/100 mL na L1 e 2,0E+05 NMP/100 mL na lagoa mais rasa L2. As figuras 5.38 e 5.39 mostram os gráficos Box-Whiskers de coliforme fecal e *E.coli*, respectivamente.

Figura 5.38 - Gráfico Box-Whiskers - Coliformes Totais – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

Considerando a equação de decaimento bacteriano, $k_b=1,5 \text{ d}^{-1}$ e as lagoas em escala piloto operando como reatores de mistura completa, a concentração de coliforme total no efluente das lagoas L1 e L2 seria de $1,6\text{E}+05$ NMP/100 mL. Para as lagoas operando em regime de fluxo pistonado, a concentração de coliforme total seria de $7,94\text{E}+03$ NMP/100 mL. Desta forma, comparando os dados obtidos pela equação de decaimento para reatores de mistura completa e pistonado, verifica-se que as lagoas têm um comportamento mais próximo a reatores de mistura completa.

Com relação à densidade de *E.coli*, verifica-se que as concentrações foram elevadas, sendo necessário um alto grau de diluição para assegurar o padrão de qualidade dos corpos receptores. Pode-se observar uma concentração muito elevada no efluente da lagoa facultativa.

Figura 5.39 - Gráfico Box-Whiskers – *E.coli* – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

As concentrações médias foram de $2,7\text{E}+04$ NMP/100mL e $2,4\text{E}+04$ NMP/100 mL para as lagoas L1 e L2, como pode ser observado no gráfico da Figura 5.39. As eficiências máximas foram de 99,2% na lagoa L1 e 99,4 na L2. As eficiências médias foram de 88,7% em L1 e 93,5 na L2, sendo observadas eficiências mínimas de 54% e 80 % para L1 e L2 respectivamente. Fazendo as mesmas considerações que foram feitas para o coliforme total, a concentração de *E.coli* no efluente das lagoas L1 e L2, seria de $2,2\text{E}+04$ NMP/100 mL para mistura completa e, $1\text{E}-01$ NMP/100 mL, para fluxo em pistão. Comparando a densidade média da fase 02 com os valores calculados para as lagoas em regime de mistura completa, observa-se uma proximidade da média experimental com os valores calculados. Admitindo o modelo de fluxo disperso nas lagoas e dispersão igual a 2, a densidade de coliforme total seria de $6,5\text{E}+04$ NMP/100 mL e a densidade de *E.coli* seria de $8,5\text{E}+03$ NMP/100 mL. Novamente, verifica-se através da comparação dos valores experimentais e os valores calculados, que as lagoas tendem a um reator de mistura completa.

Pearson et al. (1987) estudando a influência dos parâmetros físico-químicos sobre *E.coli* em duas lagoas de maturação, M1 e M2, alimentadas por uma lagoa facultativa secundária, encontrou valores de *E.coli* na ordem de $2,80\text{E}+05$ NMP/100 mL na facultativa e $2,75\text{E}+03$ NMP/100 mL em M1 e $1,63\text{E}+02$ NMP em M2. No referido trabalho o autor não realizou nenhum ensaio para caracterizar o regime de fluxo nas lagoas. O autor ainda argumenta que, a razão para a diferença nas densidades de *E.coli* entre M1 e M2 deve-se as atividades internas em cada lagoa, uma vez que ambas possuem a mesma geometria e foram submetidas às mesmas taxas de aplicação superficial orgânica e condições externas.

5.1.4. Resultados do monitoramento – Fase 03

Na fase 03, as lagoas foram submetidas à mesma taxa de aplicação superficial de DBO e tempos de detenção hidráulica diferentes. Na lagoa L1 o tempo de detenção foi alterado de 10 dias para 15 dias e na lagoa L2 o tempo foi reduzido

de 10 para 7,5 dias.

5.1.4.1 Parâmetros de controle – Fase 03

As condições operacionais nas quais as lagoas foram submetidas na fase 03 podem ser observadas nos gráficos (a), (b), (c) e (d) da Figura 5.40.

Figura 5.40 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 01)

Nesta fase, as lagoas L1 e L2 foram submetidas à mesma taxa de aplicação superficial de DBO e tempos de detenção de 7,5 dias na lagoa L2 e 15 dias na lagoa L1, conforme pode ser observado nos gráficos (a) e (c) da Figura 5.40.

Como a lagoa L2 apresentou condições favoráveis à volatilização da amônia durante a fase 02, optou-se em trabalhar com uma taxa que ficasse situada entre a taxa aplicada na fase 01 e a taxa aplicada na fase 02. Para a lagoa L1, optou-se trabalhar com um tempo maior do que foi aplicado na fase 01 e 02.

A taxa de aplicação superficial média observada durante esta fase foi em torno de 0,004 kgDBO/m².d. Esse arranjo nos tempos de detenção resultou na aplicação de taxas de aplicação volumétrica de DBO diferentes. Neste caso, a taxa média de aplicação volumétrica foi próxima de 0,004 kgDBO/m³.d na lagoa L1 e

0,0055 em L2.

5.1.4.2 Condições Ambientais nas lagoas – Fase 03

A Figura 5.41 mostra os valores médios de temperatura durante a fase 03. A média observada foi de 26°C, com valores máximos de 31°C e mínimas em torno de 20°C. A média da temperatura do ar foi de 28°C.

Figura 5.41 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

O gráfico da Figura 5.42 mostra o resultado do pH. Durante a fase 03, o pH manteve o mesmo padrão observado durante a fase 02. A média de pH foi de 9,2, ocorrendo valores até 11 na lagoa L2. Esses valores apresentados, juntamente com os altos valores de OD, conforme pode ser visto na Figura 5.43, criam condições propícias para que o processo de volatilização da amônia aconteça. Para valores de pH entre 9,2 e 10,0 a fração de amônia, na forma de NH_3 , deve ficar situada na faixa de 60% a 80%, Essa fração foi determinada segundo o gráfico da Figura 3.1 do item 3.2.2 da revisão bibliográfica, que trata da distribuição das espécies de amônia em função do pH.

Figura 5.42: Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

Na lagoa L1, a diminuição das taxas de aplicação superficial de DBO em relação à fase 02 provocou um pequeno aumento do valor médio de pH do efluente. Na Tabela 5.15 encontra-se a estatística básica do pH para fase 02 e 03.

Tabela 5.15 - Resumo estatístico pH – Fase 02 e 03

Estatística	pH - Fase 02			pH - Fase 03		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	33	33	33	28	28	28
Média	7,4	7,9	9,1	7,7	8,4	9,2
Mínimo	6,9	7,1	8,1	7,0	7,3	7,8
Máximo	8,2	8,8	10,4	8,8	9,6	11,0
Desvio padrão	0,3	0,4	0,6	0,4	0,6	0,8

O valor médio observado foi de 8,4, tendo ocorrido valores acima de 9. Na faixa de pH entre 8,4 e 9,2, a fração de NH_3 ficará situada na faixa entre 20% e 60%.

A observação do resumo estatístico dos valores de OD, na Tabela 5.16, mostra que a condição de supersaturação persistiu durante a fase 03 na lagoa piloto L2, ocorrendo valores médios acima de 10 mgO_2/L . Na lagoa L1, a concentração média de OD na fase 03 foi de 8,5 mgO_2/L , sendo este valor maior do que a média obtida na fase 02.

Tabela 5.16 - Resumo estatístico OD – Fase 02 e 03

Estatística	OD-Fase 02 (mg/L)			OD-Fase 03 (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	33,0	33,0	33,0	27,0	27,0	27,0
Média	0,8	6,6	16,7	0,4	8,5	12,6
Mínimo	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
Máximo	10,3	29,0	37,5	7,1	30,4	37,5
Desvio padrão	2,4	7,8	12,8	1,4	8,0	12,2

O gráfico Box-Whiskers na Figura 5.43 mostra o comportamento das concentrações de OD durante essa fase. Na lagoa facultativa as concentrações de OD durante a fase 03 foram, na maior parte do período, muito baixas.

Figura 5.43 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

Nesta fase também foram observados reduções nas concentrações da alcalinidade da ordem de 50 mgCaCO₃/L na L1 e 100 mgCaCO₃/L na L2, mantendo o mesmo padrão apresentado nas fases 01 e 02. A Figura 5.44 mostra o gráfico Box-Whiskers relativo à alcalinidade total.

Figura 5.44 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

A partir dos valores médios de pH e alcalinidade, ocorridos nas lagoas L1 e L2, durante as fases 01, 02 e 03, foi possível elaborar o gráfico da Figura 5.45 que relaciona o consumo de alcalinidade com o pH.

Figura 5.45 - Relação entre consumo de alcalinidade e pH

A Tabela 5.17 relaciona os valores médios de pH ocorridos nas duas lagoas piloto com o consumo de alcalinidade total e a fração de amônia livre em termos percentuais.

Tabela 5.17 - Relação entre pH, consumo de alcalinidade e fração de NH₃

pH	Δ alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)	% NH ₃
8,1	29	10
8,4	68	20
8,7	69	25
9,1	117	35
9,2	91	45

Os valores de OD e pH obtidos durante a fase 03 sugerem uma atividade fotossintética intensa. A biomassa algal utiliza o CO₂ como fonte de carbono, elevando os valores de pH. O gráfico da Figura 5.45 e a Tabela 5.17 mostram que o consumo de alcalinidade aumenta na direção da elevação do pH, assim como a fração de NH₃. Como o nitrogênio amoniacal pode ser volatilizado em pH elevado, os decréscimos de alcalinidade nos efluentes das lagoas piloto podem estar relacionados a perda da alcalinidade associada a esta parcela de nitrogênio.

5.1.4.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 03

A Tabela 5.18 mostra os valores estatísticos da DBO total e filtrada durante a fase 03. As concentrações médias foram 63 mgDBO_T/L no efluente da facultativa, 56 mgDBO_T/L na lagoa L1 e 44 mgDBO_T/L na lagoa L2.

Tabela 5.18 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 03

Estatística	DBO total (mg/L)			DBO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	9	9	9	9	9	9
Mínimo	33	24	8	7	8	5
Máximo	95	83	88	24	29	22
Coef. Var	0,3	0,4	0,6	0,4	0,4	0,5
Média	63	56	44	16	15	12
Mediana	63	63	39	16	14	10
Desvio padrão	20	22	26	6	6	6

A DBO total da lagoa L2 apresentou um comportamento semelhante ao da fase 02, ou seja, verifica-se uma pequena redução no valor da concentração média para esse parâmetro. Na lagoa L1 foi verificado redução na concentração média apenas na fase 01. Nas demais fases, o efluente da lagoa L1 apresentou uma média de concentração acima dos valores médios no efluente da facultativa. Embora não exista uma tendência clara entre tempo de detenção e fração particulada de matéria orgânica, essas frações parecem ter um efeito maior sobre os valores de DBO para os menores tempos de detenção. Para os tempos de detenção adotados na fase 03, verifica-se que ambas as lagoas piloto sofreram redução na sua concentração média efluente em comparação à média da facultativa.

Entretanto, o ganho em termos de eficiência na remoção da DBO total, talvez não seria significativo para justificar a operação das lagoas com tempos maiores do que 8 a 10 dias. A DBO total, no caso de lagoas facultativas, maturação ou polimento, estarão, para tempos maiores, sujeitos da mesma forma, ao efeito da fração particulada associada a biomassa algal. A Tabela 5.19 permite fazer uma comparação entre os valores médios da DBO total para as fases 01, 02 e 03.

Tabela 5.19 - Comparação DBO total e filtrada – Fase 01, 02 e 03

Fase	Estatística	DBO Total (mg/L)			DBO Filtrada (mg/L)		
		Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
1	Média	53	46	62	19	11	12
	Mediana	50	41	49	17	8	12
	Desvio padrão	9	17	36	7	8	6
2	Média	51	58	42	14	7	6
	Mediana	53	59	37	15	7	6
	Desvio padrão	18	12	17	4	3	3
3	Média	63	56	44	16	15	12
	Mediana	63	63	39	16	14	10
	Desvio padrão	20	22	26	6	6	6

A Figura 5.46 mostra o gráfico Box-Whiskers para a DBO total na fase 03

Figura 5.46 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

As concentrações médias obtidas nessa fase, para a DBO filtrada, foram de 15 mgDBO_F/L na lagoa L1 e 12 mgDBO_F/L na lagoa L2, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.47.

Figura 5.47 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

No caso da DBO filtrada, observando os valores médios nas fases 01 até 03, contidos na Tabela 5.19, verifica-se que o ganho de eficiência para tempos de retenção acima de 10 dias não é tão substancial. Em um sistema contendo várias lagoas, as lagoas subsequentes à primeira, não apresentam eficiências de remoção da DBO filtrada elevadas em comparação ao que ocorre na primeira lagoa da série. Os gradientes de concentração de matéria orgânica vão diminuindo à medida que se percorre um sistema em série, desta forma, as taxas de degradação da matéria orgânica também sofrerão reduções.

As Figuras 5.48 e 5.49 mostram os gráficos com as médias e valores máximos para a DQO total e filtrada. Na Tabela 5.20 encontra-se o resumo

estatístico para estes dois parâmetros.

Tabela 5.20: Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 03

Estatística	DQO total (mg/L)			DQO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	9	9	9	9	9	7
Mínimo	23	19	50	4	4	8
Máximo	338	338	559	136	117	142
Coef. Var	0,6	0,6	0,8	0,6	0,7	0,6
Média	175	177	218	65	63	80
Mediana	183	171	202	61	64	75
Desvio padrão	111	98	173	42	41	47

Novamente, verifica-se para a DQO o mesmo padrão apresentado nas duas fases anteriores. A grande dispersão dos dados não permite avaliar se houve redução nas concentrações de DQO total.

A DQO também é influenciada pela fração particulada associada à biomassa algal, que exercerá demanda, colaborando para o acréscimo de DQO no efluente das duas lagoas piloto. Na Tabela 5.21 permite a comparação dos valores médios das fases 01, 02 e 03.

Tabela 5.21 - Comparação DQO total e filtrada – Fase 01, 02 e 03

Fase	Estatística	DQO Total (mg/L)			DQO Filtrada (mg/L)		
		Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
1	Média	240	314	240	61	54	64
	Mediana	262	225	243	58	71	60
	Desvio padrão	46	256	66	17	30	19
2	Média	227	173	298	84	54	53
	Mediana	162	188	256	24	33	31
	Desvio padrão	253	66	195	152	49	44
3	Média	175	177	218	65	63	80
	Mediana	183	171	202	61	64	75
	Desvio padrão	111	98	173	42	41	47

As concentrações médias foram de 177 mgDQO_T/L no efluente da lagoa L1 e 218 mgDQO_T/L no efluente da L2, conforme gráfico da Figura 5.48.

Figura 5.48 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

Figura 5.49 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

O aumento na taxa de aplicação com a redução do tempo de detenção de 10 dias para 7,5 dias acarretou um aumento da DQO filtrada no efluente da lagoa L2. A concentração média da DQO filtrada não foi alterada significativamente em relação à média apresentada na facultativa com a redução da taxa de aplicação e aumento do TDH na lagoa L1. As concentrações médias observadas foram 64 mgDQO_F/L e 75 mgDQO_F/L, na lagoa L1 e L2, respectivamente.

Embora os maiores valores de OD (Figura 5.43) e pH (Figura 5.42) tenham ocorrido na lagoa L2 os valores de clorofila-a foram menores em relação aos observados na lagoa L1 (Figura 5.50). A Tabela 5.22 mostra o resumo estatístico para a clorofila-a na fase 03 e na Tabela 5.23 é possível acompanhar os valores médios deste parâmetro para as fases 02 e 03

Tabela 5.22 - Resumo estatístico clorofila-a – Fase 03

Estatística	Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	8	8	8
Mínimo	59	355	257
Máximo	1745	2577	1153
Coef. Var	0,8	0,8	0,4
Média	683	1034	700
Mediana	603	677	757
Desvio padrão	563	806	312

Além disso, comparando as concentrações da clorofila-a na L2, desta fase, com a da fase 02, verifica-se que ocorreu uma redução na fase 03.

Tabela 5.23 - Comparação clorofila-a – Fase 02 e 03

Fase	Estatística	Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)		
		Facultativa	L1	L2
2	Média	624	984	1681
	Mediana	573	956	1306
	Desvio padrão	306	249	1019
3	Média	683	1034	700
	Mediana	603	677	757
	Desvio padrão	563	806	312

Este fato não alterou negativamente as condições de pH e OD elevados mantendo-se propícias para a volatilização da amônia.

Figura 5.50 -Gráfico Box-Whiskers: Clorofila-a – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

As Figuras 5.51 e 5.52 mostram o resumo estatístico dos sólidos totais e totais voláteis através dos gráficos Box-Whiskers e a Tabela 5.24 apresenta o resumo estatístico para esse grupo de parâmetros.

Tabela 5.24 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 03

Estatística	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	8	8	8	8	8	8
Mínimo	600	563	525	214	229	213
Máximo	750	750	988	375	338	421
Coef. Var	0,1	0,1	0,2	0,2	0,1	0,2
Média	681	663	722	290	281	323
Mediana	700	676	709	300	290	325
Desvio padrão	52	80	150	58	39	76

As concentrações de sólidos totais no efluente da lagoa L1 e L2 mantiveram-se praticamente inalterados até a fase 03. As concentrações observadas foram de 700 mgST/L no efluente de ambas as lagoas piloto. As concentrações médias de sólidos totais voláteis foram 281 mgSTV/L na L1 e 325 mgSTV/L na L2

Figura 5.51 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

Figura 5.52 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

As concentrações de sólidos suspensos totais seguiram o mesmo padrão de comportamento apresentado pela clorofila-a, tendo nesta fase, ocorrido valores médios um pouco maiores na lagoa L1. Nesta fase, verifica-se uma redução na concentração de SST no efluente de ambas as lagoas em relação ao efluente da lagoa facultativa. Este comportamento refletiu-se nas concentrações de DBO total. Grande parte dos sólidos está associada à biomassa algal em lagoas facultativas e de maturação, portanto, as alterações nesta biomassa, poderão refletir-se nas concentrações dos sólidos, DBO e DQO. As concentrações médias de SST foram 192 mgSST/L no efluente da lagoa facultativa, 148 mgSST/L e 132 mgSST/L no efluente da lagoa L1 e L2, respectivamente. Na Tabela 5.25 encontra-se o resumo estatístico para SST e SSV.

Tabela 5.25 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 03

Estatística	SST (mg/L)			SSV (mg/L)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	9	9	9	9	9	9
Mínimo	130	56	50	88	54	42
Máximo	350	216	212	310	208	198
Coef. Var	0,4	0,4	0,5	0,4	0,4	0,5
Média	192	148	132	160	131	120
Mediana	186	176	128	150	146	116
Desvio padrão	71	58	61	71	52	55

Na Tabela 5.26 são mostrados os valores médios de SST e SSV para as fases 01, 02 e 03 e as Figuras 5.53 e 5.54 mostram os gráficos Box-Whiskers para estes dois parâmetros.

Tabela 5.26 - Comparação SST e SSV – Fases 01, 02 e 03

Fase	Estatística	SST (mg/L)			SSV (mg/L)		
		Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
1	Média	140	152	137	120	129	118
	Mediana	129	123	132	110	106	116
	Desvio padrão	34	55	27	34	51	22
2	Média	248	244	250	113	105	162
	Mediana	275	243	263	104	98	166
	Desvio padrão	64	68	61	39	49	56
3	Média	192	148	132	160	131	120
	Mediana	186	176	128	150	146	116
	Desvio padrão	71	58	61	71	52	55

A mesma análise feita aos SST pode ser estendida aos sólidos suspensos voláteis, sendo observado valores médios de 131 mgSSV/L e 120 mgSSV/L, conforme o gráfico da Figura 5.54.

Figura 5.53 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03) **Figura 5.54 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)**

5.1.4.4 Coliformes – Fase 03

A concentração média de coliforme total observada no efluente da lagoa facultativa foi de $1,0\text{E}+06$ NMP/100 mL. As remoções médias foram 57% na lagoa L1 e 88% na lagoa L2. A média registrada no período foi de $2,30\text{E}+05$ NMP/100 mL e $5,5\text{E}+04$ NMP/100 mL na lagoa L1 e L2 respectivamente.

Tabela 5.27 - Resumo estatístico Coliformes totais e *E.coli* – Fase 03

Estatística	Coliformes totais (NMP/100mL)			<i>E.coli</i> (NMP/100mL)		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
Núm dados	7	7	7	7	7	7
Mínimo	$1,70\text{E}+04$	$1,01\text{E}+05$	$0,00\text{E}+00$	$3,90\text{E}+03$	$0,00\text{E}+00$	$0,00\text{E}+00$
Máximo	$3,80\text{E}+06$	$7,50\text{E}+05$	$1,08\text{E}+05$	$3,50\text{E}+05$	$2,90\text{E}+04$	$8,60\text{E}+03$
Coef. Var	1,31	1,00	0,82	0,84	0,80	1,08
Média	$1,00\text{E}+06$	$2,35\text{E}+05$	$5,52\text{E}+04$	$1,56\text{E}+05$	$1,47\text{E}+04$	$2,93\text{E}+03$
Mediana	$4,40\text{E}+05$	$1,60\text{E}+05$	$6,89\text{E}+04$	$1,40\text{E}+05$	$1,30\text{E}+04$	$2,40\text{E}+03$
Desvio padrão	$1,32\text{E}+06$	$2,34\text{E}+05$	$4,52\text{E}+04$	$1,31\text{E}+05$	$1,18\text{E}+04$	$3,15\text{E}+03$

Adotando os mesmos valores de kb da fase 01 e 02, os valores calculados da densidade de coliforme total, considerando a equação do decaimento para reatores de mistura completa, seriam $4,2\text{E}+04$ NMP/100 mL no efluente da lagoa L1 e de $8,2\text{E}+04$ NMP/100 mL no efluente da L2. Se o regime de fluxo nas lagoas tendesse ao regime pistonado, as densidades seriam de $0,00017$ NMP/100 mL no efluente da L1 e $1,3$ NMP/100 mL no efluente da lagoa L2. Novamente, nesta fase, os dados experimentais se aproximam dos valores calculados sob as considerações de proximidade das lagoas com reatores de mistura completa. Adotando o valor da dispersão obtido no ensaio hidrodinâmico das lagoas piloto e considerando as lagoas como reatores de fluxo disperso, os valores de densidade dos coliformes totais e *E.coli*, para a lagoa L1, seriam de $1,15\text{E}+04$ NMP/100 mL e $1,8\text{E}+03$ NMP/100mL, respectivamente. Na lagoa L2 as densidades seriam de $4,1\text{E}+04$ NMP/100 mL para o coliformes totais e $6,4\text{E}+03$ NMP/100mL para *E.coli*.

Comparando os valores calculados e os experimentais e considerando o modelo de fluxo disperso, verifica-se a proximidade do modelo de fluxo nas lagoas com reatores de mistura completa.

Figura 5.55 - Gráfico Box-Whiskers: Coliformes Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

A concentração média de *E.coli* no efluente das lagoas L1 e L2, nestes valores, poderia apresentar dificuldades em manter os padrões de qualidade dos corpos receptores, principalmente em municípios, onde os fatores de diluição desses corpos fossem pequenos. As médias foram de $1,5\text{E}+04$ NMP/100 mL na lagoa L1 e $3,0\text{E}+03$ NMP/100 mL na lagoa L2. As remoções médias foram 85% e 88%, ocorrendo remoções máximas próximas de 100 % em ambas as lagoas. A Figura 5.56 mostra os resultados obtidos durante a fase 03.

Figura 5.56 - Gráfico Box-Whiskers: *E.coli* – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

Nas Tabelas 5.28 e 5.29 podem ser observados os valores e remoções médias obtidas nas fases 01,02 e 03 de operação do sistema piloto.

Tabela 5.28 - Concentrações médias e remoções de coliformes totais

Piloto	Fase 01			Fase 02			Fase 03		
	média	méd.Rem	Rem.Máx	média	méd.Rem	Rem.Máx	média	méd.Rem	Rem.Máx
L1	4E+05	66	97	3E+05	76	98	2E+05	57	96
L2	3E+05	66	94	2E+05	80	99	5E+04	88	100

obs: as médias estão expressas em NMP/100 mL e as remoções em (%)

Tabela 5.29 - Concentrações médias e remoções de E.coli

Piloto	Fase 01			Fase 02			Fase 03		
	média	méd.Rem	Rem.Máx	média	méd.Rem	Rem.Máx	média	méd.Re m	Rem.Máx
L1	2E+05	76	98	3E+04	89	99	1E+04	85	100
L2	1E+05	70	97	2E+04	93	99	3E+03	88	100

obs: as médias estão expressas em NMP/100 mL e as remoções em (%)

Os resultados sumarizados nas tabelas mostram uma tendência da lagoa L2, mais rasa, de apresentar uma eficiência melhor do que as lagoas mais profundas, principalmente, quando submetidas a tempos de detenção superiores a 8 dias (a partir da fase 02). Na fase 01, com as lagoas operando com 5 dias de detenção hidráulica, praticamente não há diferença com relação à eficiência de remoção.

Com relação às taxas, verifica-se a tendência das menores taxas resultarem em eficiências maiores, ou seja, os maiores tempos de detenção. Durante a fase 03, verifica-se que a lagoa L1 apresentou uma média de remoção melhor, mas o tempo de detenção aplicado na lagoa L1 foi o dobro do praticado em L2. Os resultados demonstraram que a destruição de coliformes nas lagoas piloto foi dependente do tempo de detenção e da profundidade.

Os valores calculados de densidade de coliformes, considerando regime de mistura completa e pistonado, ao longo das 3 fases experimentais, mostraram que o modelo de fluxo é o fator preponderante na destruição de coliformes.

5.1.5 Resultados do monitoramento – Fase 04

Nesta fase foram repetidos os tempos de detenção hidráulica da fase 01 e 02 sobre a lagoa L1. Entretanto a profundidade da lagoa foi alterada de 1,0m de profundidade para 0,70m.

O período de tempo no qual a lagoa L1 funcionou com tempo de detenção hidráulica de 5 dias e com profundidade 0,7 m será utilizado L1(0,7-5) como nomenclatura. Quando a lagoa L1 estiver funcionando com tempo de detenção hidráulica de 10 dias será referenciada como L1(0,7-10).

5.1.5.1 Parâmetros de controle – Fase 04

As principais condições operacionais da fase 04 sobre a lagoa piloto L1 podem ser observados nos gráficos (a), (b), (c) e (d) da figura 5.57.

O funcionamento da lagoa L1 com um tempo de detenção hidráulica de 5 dias resultou em uma taxa média de aplicação superficial de DBO de 0,01 kgDBO/m².d e taxa de aplicação volumétrica de DBO de aproximadamente 0,015 kgDBO/m³.d. O valor médio e a dispersão envolvida nestes dois parâmetros podem ser verificados nos gráficos (c) e (d) da Figura 5.57.

Para 10 dias de tempo de detenção hidráulica, a taxa média de aplicação superficial de DBO foi de 0,004 kgDBO/m².d e taxa de aplicação volumétrica de DBO de 0,005 KgDBO/m³.d. Pelo gráfico da Figura 5.57 pode-se observar as médias, percentis (25% e 75%) e valores máximos que ocorreram nas duas etapas que envolvem a fase 04. Além disso, os gráficos contidos na figura 5.57 mostram uma dispersão em torno do valor médio. Este fato deve-se as oscilações na vazão de alimentação e nas concentrações da DBO.

Figura 5.57 – Box-Whiskers: Condições operacionais nas lagoas piloto – (a) Tempo de detenção hidráulica, (b) Taxa de Aplicação Hidráulica, (c) Taxa de Aplicação Superficial de DBO e (d) Taxa de Aplicação Volumétrica de DBO (Fase 03)

5.1.5.2 Condições ambientais nas lagoas – Fase 04

A média de temperatura durante a fase 04 foi um pouco acima de 26°C nas duas etapas da fase, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.58.

Figura 5.58 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Pelo gráfico da Figura 5.59, que representa as estatísticas dos resultados do pH, verifica-se durante essa fase, que a alteração das taxas de aplicação superficial de DBO não provocou modificações nos valores de pH na lagoa L1. Os

valores médios nas duas etapas da fase 04 ficaram próximos a 8,8.

Figura 5.59 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Considerando que a lagoa L1 e L2 possuem a mesma área superficial, quando confrontados os valores de pH da L1 ocorridos na fase 04 com profundidade de 0,70 m com os valores ocorridos na lagoa L2 com 0,5 m na fase 03, ambas com a mesma taxa de aplicação superficial de DBO, verifica-se uma redução dos valores médios de pH em função da alteração da profundidade. O pH médio na lagoa L2, durante a fase 03, foi de 9,2 enquanto na lagoa L1(0,70-10) na fase 04, a média registrada foi de 8,6. A Tabela 5.30 permite realizar uma comparação entre as médias da fase 03 e 04.

Tabela 5.30: Comparação pH – Fases 03 e 04

Estatística	Fase 03			Fase 04		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	28	28	28	18	9	9
Média	7,7	8,4	9,2	7,9	8,7	8,6
Mínimo	7,0	7,3	7,8	7,3	8,1	7,9
Máximo	8,8	9,6	11,0	8,6	9,8	9,8
Desvio padrão	0,4	0,6	0,8	0,4	0,5	0,7

Confrontando os valores de pH da lagoa L1 durante a fase 01, com os valores ocorridos em L1(0,70-5), uma vez que neste caso as taxas de aplicação foram semelhantes, verifica-se que a alteração da profundidade de 1,0 m para 0,70 não provocou mudanças significativas no valor do pH. A Tabela 5.31 mostra um resumo estatístico das fases 01 e 04.

Tabela 5.31 - Comparação pH – Fases 01 e 04

Estatística	Fase 01			Fase 04		
	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	29	29	29	18	9	9
Média	7,7	8,7	8,1	7,9	8,7	8,6
Mínimo	7,0	6,6	7,1	7,3	8,1	7,9
Máximo	8,3	9,4	9,1	8,6	9,8	9,8
Desvio padrão	0,3	0,6	0,4	0,4	0,5	0,7

Durante a fase 04, nas duas etapas de operação foram observados valores altos de OD, como pode ser visto no gráfico Figura 5.60. As concentrações médias ocorridas foram de 10 mgO₂/L em L1(0,70-5) e 12 mgO₂/L em L1(0,70-10). A redução na profundidade da lagoa L1 de 1,0 m para 0,70 m ocasionou um pequeno aumento no valor médio de OD. Nas fases anteriores, a média ficou situada entre 7 mgO₂/L e 8 mgO₂/L. Pode ser observado que, com a redução da taxa de aplicação superficial de DBO na segunda etapa da fase 04, houve um aumento na concentração média de OD em L1(0,70-10).

Figura 5.60 - Gráfico Box-Whiskers: Oxigênio Dissolvido – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

A Figura 5.61 mostra o gráfico contendo os valores médios de alcalinidade nas duas etapas da fase 04.

Figura 5.61 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Verifica-se uma redução na alcalinidade nas duas etapas da fase 04, ocorrendo uma redução maior na fase L1(0,7-10). A alcalinidade média foi de 340 mgCaCO₃/L em L1(0,70-5) e 300 mgCaCO₃/L. Esta redução, da mesma forma que nas outras fases operacionais, está, possivelmente, relacionada à redução do nitrogênio amoniacal na lagoa piloto.

5.1.5.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO, Sólidos e Clorofila-a – Fase 04

A Tabela 5.32 mostra os valores da estatística básica da DBO total e filtrada na fase 04.

Tabela 5.32 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 04

Estatística	DBO Total (mg/L)			DBO Filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	17	9	8	17	9	8
Mínimo	28	14	22	10	6	7
Máximo	116	218	76	25	28	33
Coef. Var	0,3	0,7	0,4	0,2	0,4	0,6
Média	70	97	43	17	16	14
Desvio padrão	24	64	19	4	6	8

Durante essa fase, a DBO total no efluente da lagoa L1(0,7-5) foi maior que a apresentada na segunda etapa L1(0,7-10), sendo esta submetida a metade da taxa de aplicação superficial ocorrida em L1(0,7-10). Concentrações maiores de clorofila-a foram obtidas na lagoa L1(0,7-5), conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.66, que contém as médias de clorofila-a.

As concentrações médias foram 97 mgDBO_T/L em L1(0,7-5) e 43 mgDBO_T/L em L2(0,7-10). Em termos de DBO total, pode-se observar uma pequena remoção em relação ao efluente da facultativa em L1(0,7-10). No caso de L1(0,7-5), durante o período experimental, como pode ser visto no gráfico da Figura A.4.7 do item A.4.2 no apêndice, verificou-se também a redução na DBO total, embora a média apresentada em L1(0,7-5) não evidencie este comportamento. Deve-se levar em consideração que a média pode ter sido influenciada pelos valores extremos presentes.

Figura 5.62 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

A DBO filtrada continuou a seguir o mesmo padrão apresentado nas demais fases, mesmo com a redução da profundidade de 1,0 m para 0,7 m. Os valores médios nas duas etapas da fase 04 ficaram abaixo de 15 mgDBO_F/L. O gráfico da Figura 5.63 apresenta os valores médios da DBO filtrada.

Figura 5.63 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Nesta fase, houve uma redução na concentração média da DQO total, na duas etapas de operação da fase 04. Comparando a concentração efluente em L1(0,70-5) com L1(0,70-10), verifica-se que a redução na taxa de aplicação superficial de DBO resultou em um decréscimo da DQO em L1(0,70-10), uma vez que as médias foram 204 mgDQO_T/L em L1(0,70-5) e 155 mgDQO_T/L em L1(0,70-10). A Tabela 5.33 mostra o resumo estatístico para a DQO total e filtrada.

Tabela 5.33 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 04

Estatística	DQO Total (mg/L)			DQO Filtrada (mg/L)		
	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	15	8	7	15	9	6
Mínimo	137	104	90	4	4	12
Máximo	413	373	236	114	86	64
Coef. Var	0,3	0,4	0,3	0,7	0,7	0,5
Média	261	204	155	45	43	40
Mediana	233	209	160	35	50	42
Desvio padrão	89	89	51	32	29	22

As Figuras 5.64 e 5.65 mostram os gráficos Box-Whiskers da DQO total e filtrada na fase 04.

Figura 5.64 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

As concentrações médias da DQO filtrada foram 43 mgDQO_F/L em L1(0,7-5) e 40 mgDQO_F/L em L1(0,7-10). No caso da DQO filtrada, o gráfico da Figura 5.68 mostra que não houve redução na concentração em relação ao efluente da facultativa. Os valores de DQO filtrada podem ter ficado sujeitos a interferências da biomassa algal que não ficou retida no processo de filtragem.

Figura 5.65 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

A Tabela 5.34 apresenta os valores da estatística básica sobre a clorofila-a na fase 04.

Tabela 5.34 - Resumo estatístico clorofila-a – Fase 04

Estatística	Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)		
	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	13	8	5
Mínimo	156	250	294
Máximo	3588	5581	1206
Coef. Var	0,9	1,4	0,5
Média	1306	1416	818
Mediana	951	436	1010
Desvio padrão	1223	1927	386

O gráfico da Figura 5.69 apresenta os valores de clorofila-a ocorridos na fase 04, na suas duas etapas. Em termos de média, não se observou uma mudança significativa das concentrações de clorofila-a em comparação as demais fases. Entretanto, os valores extremos foram significativamente maiores com a redução da profundidade da lagoa L1.

Figura 5.66 - Gráfico Box-Whiskers: Clorofila-a – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

As médias observadas foram 1500 $\mu\text{g/L}$ em L1(0,7-5) e 1000 $\mu\text{g/L}$ em L1(0,7-10). A concentração de clorofila-a nos corpos receptores constitui-se como padrão de qualidade das águas. A Resolução N° 357 do CONAMA estabelece os limites de clorofila-a para águas doces em 10 $\mu\text{g/L}$ para águas de classe I, 30 $\mu\text{g/L}$ para águas de classe II e 60 $\mu\text{g/L}$ para águas de classe III.

Levando-se em consideração os limites apresentados, verifica-se a dificuldade que apresentam as lagoas facultativas e de maturação em assegurar esses padrões. Além disso, deve-se considerar que a maioria dos corpos receptores,

principalmente os que estão localizado próximos a pequenos municípios no Estado de São Paulo, possuem baixos fatores de diluição. Segundo Monteggia e Tessele (2001) a presença de algas é indesejável por motivos estéticos e de saúde.

Algumas espécies de algas podem exibir características tóxicas nos ecossistemas aquáticos, devendo, dessa forma, ser previsto uma etapa de tratamento para a remoção dessas algas.

Na Tabela 5.35 encontra-se o resumo estatístico para sólidos totais e totais voláteis e as Figuras 5.67 e 5.68 apresentam os gráficos contendo as estatísticas referentes a esse grupo de parâmetros.

Tabela 5.35 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 04

Estatística	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	15	8	7	15	8	7
Mínimo	525	450	600	163	163	225
Máximo	863	925	738	500	450	313
Coef. Var	0,1	0,2	0,1	0,3	0,3	0,1
Média	688	688	673	280	277	266
Mediana	688	681	688	238	250	263
Desvio padrão	95	139	46	92	87	38

As concentrações médias foram 688 mgST/L para L1(0,7-5) e 673 mgST/L L1(0,7-10). As concentrações efluentes da lagoa L1 para as duas etapas operacionais ficaram próximas à concentração no efluente da facultativa. Este comportamento está relacionado com a fração de sólidos associada à biomassa algal representada neste caso pela clorofila-a.

Em relação aos sólidos totais voláteis, verifica-se o mesmo comportamento dos sólidos totais, ou seja, concentração efluente da lagoa L1 muito próxima aos valores encontrados no efluente da facultativa. As médias observadas nas duas etapas da fase 04 foram 277 mgSTV/L e 266 mgST/L, na L1(0,70-5) e L1(0,70-10), respectivamente.

Figura 5.67 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Figura 5.68 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

As concentrações médias de sólidos suspensos totais foram 277 mgSST/L em L1(0,7-5) e 288 mgSST/L em L1(0,7-10). Nesta fase as médias de sólidos suspensos voláteis foram 115 mgSST/L em L1(0,7-5) e 84 mgSST/L em L1(0,7-10). Os maiores valores de SSV, nesta fase, ocorreram em L1(0,7-5), onde foram observados os maiores valores de clorofila-a (conforme a Figura 5.66). A Tabela 5.36 mostra o resumo estatístico básico para SST e SSV.

Tabela 5.36 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 04

Estatística	SST (mg/L)			SSV (mg/L)		
	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	15	8	10	16	9	7
Mínimo	163	163	225	54	32	22
Máximo	500	450	388	266	258	132
Coef. Var	0,3	0,3	0,2	0,5	0,7	0,4
Média	280	277	288	131	115	84
Mediana	238	250	300	116	82	92
Desvio padrão	92	87	51	60	82	35

Os gráficos das Figuras 5.69 e 5.70 mostram os resultados de sólidos suspensos totais e voláteis respectivamente.

Figura 5.69 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Figura 5.70 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Nesta fase, pode-se observar que não houve redução de sólidos suspensos no efluente da lagoa L1 para as duas etapas de operação. As frações de sólidos praticamente seguiram a mesma tendência que a clorofila-a, desta forma, é bem provável que os sólidos estejam sendo influenciadas por uma fração de sólidos associada às algas.

5.1.5.4 Coliformes – Fase 04

Os gráficos das Figuras 5.71 e 5.72 mostram as concentrações médias, percentis (25% e 75%), máximos e mínimos de coliformes totais e *E.coli* e a Tabela 5.37 o resumo estatístico pra estes dois parâmetros.

Tabela 5.37 - Resumo estatístico coliformes totais e *E.coli* – Fase 04

Estatística	Coliformes Totais (NMP/100 mL)			<i>E.coli</i> (NMP/100 mL)		
	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	12	7	5	12	7	5
Mínimo	1,80E+05	1,20E+04	1,00E+03	6,00E+04	2,10E+02	0,00E+00
Máximo	6,10E+06	9,10E+05	7,90E+05	6,80E+05	1,20E+05	5,50E+04
Coef. Var	1,1	1,3	1,5	0,7	1,1	1,5
Média	2,05E+06	2,39E+05	2,25E+05	2,82E+05	4,38E+04	1,56E+04
Mediana	7,85E+05	1,01E+05	1,20E+05	2,15E+05	3,13E+04	1,00E+03
Desvio padrão	2,20E+06	3,13E+05	3,28E+05	1,95E+05	4,88E+04	2,39E+04

Nesta fase, observa-se ainda valores muito altos e baixas eficiências na remoção desses dois parâmetros.

Figura 5.71 - Gráfico Box-Whiskers: Coliformes Totais – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

As concentrações médias de coliformes totais foram de 2,3E+05 NMP/100 mL na lagoa L1(0,7-5) e 2,2E+05 NMP/100 mL para L1(0,7-10). As eficiências médias de remoção foram 83% para L1(0,7-5) e 93,8 % para L1(0,7-10).

Figura 5.72 - Gráfico Box-Whiskers: *E.coli* – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Os valores médios de densidade de *E.coli* foram $4E+04$ NMP/100 mL e $1E+04$ NMP/100 mL para L1(0,7-5) e L1(0,7-10), respectivamente. As eficiências médias foram 74% em L1(0,7-5) e 90% em L1(0,7-10), ocorrendo valores máximos de 99% em ambas as etapas da fase 04.

O estudo hidrodinâmico aponta que as pilotos se comportaram como reatores de mistura completa e os gradientes térmicos indicaram estratificação da lagoa, sendo possível, segundo Torres et al (2000, apud KELLNER et al., 2009), que no volume ativo das pilotos tenha ocorrido uma grande mistura. Deve-se levar em consideração que este comportamento tem um impacto sobre as eficiências de remoção de patógenos, pois afeta diretamente os tempos de detenção hidráulica nas lagoas, reduzindo o valor teórico estabelecido antes do início de operação. A comparação dos valores experimentais com os valores calculados nas fases anteriores, considerando os dois regimes de fluxo ideal, mostraram que o regime de fluxo é o fator que tem maior influência na destruição dos coliformes.

Para Mara (2004), a principal função de uma lagoa de maturação é reduzir o número de organismos patogênicos excretados, principalmente bactéria fecal e vírus presentes no efluente de lagoas facultativas. A remoção de DBO e sólido nas lagoas de maturação é baixa em relação à lagoa facultativa, e os nutrientes (nitrogênio e fósforo) seguem a mesma tendência, ou seja, baixas eficiências de remoção. Entretanto, remoções consideráveis podem ser alcançadas em um sistema de série de lagoas. O autor ainda comenta que, em lagoas de maturação, a diversidade de espécies de algas é grande, entretanto, a biomassa é menor em relação às lagoas facultativas. Mara (2004) conclui que em um sistema de série de lagoas de maturação, a biomassa algal deverá diminuir à medida que se

percorre a série e a diversidade deverá aumentar. A Tabela 5.38 mostra dos dados de desempenho de uma série de lagoas no nordeste do Brasil.

Tabela 5.38 – Desempenho de uma série com 5 lagoas de estabilização no nordeste do Brasil

Parâmetro	Esgoto bruto	Efluente das lagoas (mg/L)					Remoção acumulada
		Anaeróbia	Facultativa	1° Maturação	2° Maturação	3° Maturação	
DBO (mg/L)	240	63	45	25	19	17	93
DQO (mg/L)	601	171	190	135	103	109	82
Sólidos suspensos (mg/L)	305	56	74	61	43	45	85
Nitrogênio amoniacal (mg/L)	45	32	27	20	14	8	82
Clorofila-a (µg/L)	-	-	1120	480	270	420	-
Coliforme Fecal	5E+07	3E+06	3E+05	2E+04	450	30	99,9999

Notas: As lagoas tem tempo de detenção de 5 dias, exceto a lagoa anaeróbia com 6,8 dias e a terceira lagoa de maturação com 5,8 dias

Fonte: Silva (1982), apud Mara (2004)

Os valores da DBO, DQO e sólidos suspensos da primeira lagoa de maturação, contidos na Tabela 5.38, são relativamente menores em relação aos valores encontrados nas duas lagoas piloto L1 e L2 durante as fases 01, 02, 03 e 04. Em contrapartida, ao contrário ao que o autor relata sobre a biomassa algal, verifica-se que os valores de clorofila-a, nas unidades piloto, foram maiores em relação ao valor da primeira lagoa de maturação apresentado na Tabela 5.38 e no efluente da lagoa facultativa, que alimenta as lagoas L1 e L2. Considerando que a biomassa algal seja representada pela concentração de clorofila-a, a diferença entre os valores de DBO, DQO e sólidos suspensos apresentados na tabela 5.38 com os valores obtidos experimentalmente, pode estar relacionada com a diferença nos valores de clorofila-a (biomassa algal) entre as unidades piloto e o da primeira lagoa de maturação da Tabela 5.38. Este comportamento também pode ter ocasionado o aumento das concentrações de DBO, DQO e sólidos nos efluentes das lagoas pilotos em relação ao efluente da lagoa facultativa, uma vez que a concentração de clorofila-a nas duas unidades pilotos foi, em média, sempre maior do a concentração efluente da lagoa facultativa.

No caso dos coliformes, verifica-se que os valores de densidade da Tabela 5.38, na primeira unidade de maturação, foram semelhantes aos valores obtidos experimentalmente. A tabela mostra que o padrão de lançamento para coliformes foi atendido apenas a partir da segunda lagoa de maturação. O tempo de detenção hidráulica no sistema apresentado por Mara (2004) até a segunda lagoa de maturação foi de 23, 3 dias enquanto que, no sistema piloto, a média foi de 29 dias. Desta forma, eram esperadas remoções nas unidades piloto semelhantes ao que foi encontrado na segunda lagoa de maturação da Tabela 5.38. Como o autor não apresenta informações sobre o regime hidráulico nas lagoas, essa diferença entre o valor apresentado na Tabela 5.38, da segunda lagoa de maturação, e o valor obtido nas unidades piloto, pode estar relacionada ao padrão de fluxo das lagoas.

5.1.6 Resultados do monitoramento das formas nitrogenadas – Fases 01, 02, 03 e 04

5.1.6.1 Taxas de aplicação de NTK

Os gráficos Box-Whiskers da Figura 5.73 mostram as taxas de aplicação superficial de NTK com suas médias e valores máximos ocorridos durante as quatro fases operacionais.

Figura 5.73 - Gráfico Box-Whiskers: Taxas de Aplicação de NTK – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01, 02, 03 e 04)

Durante a fase 01 as taxas médias aplicadas apresentaram uma média de 0,01 kgNTK/m²d na lagoa L1 e 0,005 kgNTK/m²d na lagoa L2. Na fase 02, com a redução das vazões, as taxas aplicadas ficaram a metade das taxas aplicadas na fase 01 resultando em média de 0,005 KgNTK/m²d e 0,0025 KgNTK/m²d, respectivamente.

Na fase 03 as lagoas piloto funcionaram com tempos de detenção hidráulica de 15 dias na lagoa L1 e 7,5 dias na lagoa L2. Com estes tempos, as lagoas operaram com a mesma taxa de aplicação superficial de NTK, sendo as médias, para essa fase, de 0,0035KgNTK/m²d.

Na fase 04 a lagoa L2 foi posta fora de operação, desta maneira, optou-se por trabalhar apenas com L1 em duas etapas. Como descrito anteriormente, nesta etapa, a profundidade foi alterada para um valor intermediário entre 0,5 m e 1,0 m. A profundidade adotada foi de 0,7 m e com essas características, na primeira etapa da fase 04, a taxa média aplicada foi de 0,0065KgNTK/m²d em L1(0,7-5) e 0,003 KgNTK/m²d na segunda etapa.

5.1.6.2 Monitoramento do Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) - Fases 01, 02, 03 e 04

Nesta seção são discutidos os resultados obtidos durante o monitoramento do Nitrogênio Total Kjeldahl. As Figuras 5.74 a 5.77 compreendem aos resultados obtidos nas fases 01, 02, 03 e 04. A Tabela 5.39 mostra o resumo estatístico de NTK da fase 01.

Tabela 5.39 - Resumo estatístico NTK – Fase 01

Estatística	NTK (mg-N/L)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	20	20	20
Mínimo	41	31	22
Máximo	90	65	47
Coef. Var	0,2	0,2	0,2
Média	54	44	37
Mediana	54	45	39
Desvio padrão	11	8	7

Durante a fase 01, as menores concentrações de NTK nos efluentes ocorreram na lagoa L2, sendo a média observada de 37 mgNTK-N/L. Foram observadas, da mesma forma, remoções de NTK na lagoa de 1,0 m de profundidade, sendo a média observada de 44 mgNTK-N/L. O efluente da lagoa facultativa durante a fase 01 apresentou uma média de 54 mgNTK-N/L.

Figura 5.74 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

A Tabela 5.40 apresenta o resumo estatístico do NTK da fase 02 e a Figura 5.75 mostra o gráfico Box-Whiskers para este parâmetro.

Tabela 5.40 - Resumo estatístico NTK – Fase 02

Estatística	NTK (mg-N/L)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	24	25	25
Mínimo	37	17	15
Máximo	72	56	36
Coef. Var	0,2	0,3	0,3
Média	50	34	23
Mediana	49	34	22
Desvio padrão	9	10	6

Na fase 02, conforme o gráfico da Figura 5.75, observa-se que as médias de NTK nos efluentes das duas lagoas piloto foram menores que as médias ocorridas na fase 01. Nesta fase, as taxas de aplicação em ambas as pilotos foram reduzidas pela metade das taxas praticadas durante a fase 01.

Figura 5.75 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

O efluente da lagoa L2 continuou, na fase 02, apresentando concentrações menores de NTK em relação à L1. As médias observadas foram 50 mgNTK-N/L na facultativa, 34 mgNTK-N/L e 23 mg NTK-N, na lagoa L1 e L2, respectivamente.

Na fase 03, o aumento da taxa de aplicação em L2 não resultou em prejuízo, no sentido de aumentar a concentração do NTK no efluente. A Tabela 5.41 mostra o resumo estatístico para o NTK.

Tabela 5.41 - Resumo estatístico NTK – Fase 03

Estatística	NTK (mg-N/L)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	22	21	21
Média	57	31	25
Mínimo	32	9	6
Máximo	124	49	41
Coef. Var	0,4	0,3	0,4
Média	57	31	25
Mediana	51	31	24
Desvio padrão	25	9	9

Levando-se em consideração a média ocorrida durante a fase 02, observa-se através do gráfico da Figura 5.76, que a média de NTK foi praticamente a mesma, ou seja, em torno de 22 mgNTK-N/L. Na lagoa L1, a diminuição da taxa em relação à aquela aplicada na fase 02 não provocou a redução na concentração média de NTK, mantendo-se praticamente a mesma de 35 mgNTK-N/L. Pode-se observar ainda que, durante essa fase, a lagoa de menor profundidade, continuou apresentando concentrações menores em relação a L1, mesmo as duas estando submetidas a mesma taxa nessa fase.

Figura 5.76 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

Durante a fase 04, a alteração da profundidade da lagoa L1 de 1,0 m para 0,7 m não alterou significativamente, quando confrontados os valores de L1 na fase 01 com os valores ocorridos em L1(0,7-5), as concentrações de NTK. Na Tabela 5.42 encontram-se os valores estatísticos para o NTK.

Tabela 5.42 - Resumo estatístico NTK – Fase 04

Estatística	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	18	9	9
Média	50	43	29
Mínimo	27	13	22
Máximo	72	65	36
Coef. Var	0,2	0,4	0,2
Média	50	43	29
Mediana	50	50	28
Desvio padrão	12	19	5

Na fase 04, a lagoa L1(0,7-5) foi submetida a uma taxa menor do que as taxas praticadas na fase 01 e, mesmo assim, não foram observadas alterações significativas no que diz respeito ao NTK, ficando as médias próximas a 45 mgNTK-N/L. Entretanto, considerando que as lagoas L1 e L2 possuem a mesma área superficial e mesma geometria, e considerando que L2 na fase 03 funcionou com a mesma taxa de aplicação de NTK da fase 04, verifica-se que o aumento da profundidade coincide com o aumento na concentração de NTK de 22 mgNTK-N/L na fase 03 em L2 para 35 mgNTK-N/L em L1(0,7-10).

Figura 5.77 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Os gráficos da Figura 5.78 apresentam as eficiências médias, os percentis (25% e 75%), máximas e mínimas ocorridas na fase 01, 02, 03 e 04.

Figura 5.78 - Gráfico Box-Whiskers: Eficiência na remoção de NTK – Lagoa facultativa e pilotos (fase 01,02,03 e 04)

Considerando as eficiências médias na remoção do NTK, verifica-se que a redução na taxa de aplicação da fase 01 até 03 acompanha o aumento, em termos percentuais, das eficiências. Entretanto, a alteração do tempo de detenção de 10 dias para 15 dias, não ocasionou uma redução significativa na concentração de NTK em L1. Este fato demonstra que a relação entre a taxa aplicada superficial de NTK não é linear em relação à eficiência de remoção de NTK. O gráfico da Figura 5.79 mostra a relação entre taxa de aplicação superficial de NTK e a concentração efluente de NTK nas lagoas L1 e L2.

Figura 5.79 - Relação entre taxa de aplicação superficial de NTK e NTK efluente das lagoas piloto – (a) L1 e (b) L2

Embora a relação tenha apresentado valores relativamente baixos de R^2 , ela permitiu verificar a existência de uma relação não linear entre a taxa de aplicação e o NTK efluente. Desta forma, operar as lagoas com taxas muito baixas, não aumentaria significativamente as eficiências de remoção de NTK.

O gráfico (c) da Figura 5.78 permite avaliar o efeito da profundidade sobre a eficiência na redução do NTK efluente da lagoa L1 e L2. Na fase 03, a taxa aplicada foi a mesma nas duas lagoas e verificou-se uma média de eficiência maior na lagoa mais rasa L2. Comparando o valor médio de NTK em L2, fase 03, com o valor médio ocorrido em L1(0,7-10), e considerando que as taxas nessas duas fases foram semelhantes, verifica-se que o aumento da profundidade de 0,5m para 0,7m coincide com a redução das eficiências, indicando, possivelmente, que as reduções de NTK são sensíveis à profundidade. Entretanto, esses resultados devem ser analisados com certa ressalva, uma vez que os valores de NTK são influenciados pela concentração de biomassa algal, devendo também ser confrontados com os resultados de nitrogênio amoniacal.

5.1.6.3 Monitoramento do Nitrogênio Amoniacal - Fases 01, 02, 03 e 04

Neste item, são apresentados os resultados obtidos durante o monitoramento da concentração de nitrogênio amoniacal durante todo período experimental. Na Figura 5.80, encontra-se o gráfico Box-Whisker que traz informações sobre a média e os valores máximos ocorridos durante a fase 01. A Tabela 5.43 mostra o resumo estatístico para o nitrogênio amoniacal.

Tabela 5.43 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 01

Estatística	Nitrogênio amoniacal (mg-N/L)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	27	27	27
Mínimo	24	13	4
Máximo	43	35	29
Coef. Var	0,1	0,2	0,5
Média	35	26	17
Mediana	35	25	17
Desvio padrão	4	6	9

A lagoa L2 produziu um efluente com uma média de nitrogênio amoniacal menor do que foi obtido na lagoa L1. Nesta fase, L1 e L2 foram submetidas ao mesmo tempo de detenção de 5 dias e a taxa de aplicação superficial de DBO e NTK na lagoa L2 foram na média a metade da taxa aplicada na L1. A média amostral foi de 18 mgNH₃-N/L na lagoa L2 e 25 mgNH₃-N/L em L1. A lagoa L2 com 5 dias de detenção já atendia aos padrões de lançamento estabelecidos pela CONAMA 357/2005 de 20 mgNH₃-N/L, atualmente, temporariamente, suspenso.

Figura 5.80 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 01)

Na fase 02, as lagoas L1 e L2 entraram em funcionamento com um tempo de detenção de 10 dias. A Tabela 5.44 mostra o resumo estatístico para este parâmetro.

Tabela 5.44 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 02

Estatística	Nitrogênio amoniacal (mg-N/L)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	32	32	29
Mínimo	27	4	2
Máximo	48	31	13
Coef. Var	0,2	0,4	0,6
Média	36	20	6
Mediana	35	20	6
Desvio padrão	5	8	3

Nesta fase, conforme o gráfico da Figura 5.81, verifica-se que L2 novamente produziu um efluente com uma concentração média de nitrogênio amoniacal menor do que a média apresentada na lagoa L1. Confrontando os dados da fase 01 e 02, verifica-se o efeito da redução das taxas de aplicação sobre a concentração de nitrogênio amoniacal nas lagoas. A redução das taxas ocasionou a queda nas concentrações nitrogênio amoniacal nos efluentes. As médias nessa fase foram de 20 mgNH₃-N/L na lagoa L1 e 6 mgNH₃-N/L na L2.

Figura 5.81 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 02)

Na fase 03, as lagoas entraram em operação com tempos de detenção distintos, adotando 15 dias para a lagoa L1 e 7,5 dias para L2. Na Tabela 5.45 pode-se observar a estatística básica para o nitrogênio amoniacal da fase 03.

Tabela 5.45 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 03

Estatística	Nitrogênio amoniacal (mg-N/L)		
	Facultativa	L1	L2
Núm dados	29	29	25
Mínimo	24	1	1
Máximo	50	30	16
Coef. Var	0,2	0,6	0,6
Média	36	13	7
Mediana	36	13	6
Desvio padrão	7	7	4

Com o estabelecimento destes tempos as duas lagoas piloto operaram sob as mesmas taxas de aplicação de NTK e DBO. Desta maneira, nesta fase é possível verificar o efeito da profundidade sobre a concentração do nitrogênio.

Figura 5.82 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Efluente lagoa facultativa e pilotos (fase 03)

Pela Figura 5.82, verifica-se que a lagoa L2 produziu um efluente com concentração de nitrogênio menor do que foi observado na lagoa L1, mesmo estando submetida à mesma taxa de aplicação. A média observada na fase 03 foi de 13 mgNH₃-N/L na lagoa L1 e 7 mgNH₃-N/L na L2, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.82.

A Tabela 5.46 mostra o resumo estatístico do nitrogênio amoniacal e o gráfico da Figura 5.83 mostra o comportamento das concentrações de nitrogênio amoniacal em uma profundidade intermediária a L1 e L2, na fase 04. Nesta fase, apenas a lagoa L1 foi utilizada, já que ambas possuem a mesma área superficial e geometrias semelhantes.

Tabela 5.46 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal – Fase 04

Estatística	Nitrogênio amoniacal (mg-N/L)		
	Facultativa	L1(0,70-5)	L1(0,70-10)
Núm dados	18	9	9
Mínimo	17	3	2
Máximo	41	39	25
Coef. Var	0,2	0,5	0,5
Média	32	25	15
Mediana	34	32	17
Desvio padrão	7	13	8

A fase 04 além de permitir observar o efeito da profundidade, permite, também, avaliar o efeito das taxas sobre as concentrações. A lagoa L1(0,70-10) foi submetida a um tempo de detenção de 10 dias, operando com a metade da taxa aplicada em L1(0,70-5) com 5 dias de detenção. Verifica-se que a lagoa, operando

com 10 dias, produziu um efluente com concentrações menores em comparação à L1(0,70-5). A média foi de 28 mgNH₃-N/L em L1(0,70-5) e 15 mgNH₃-N/L em L1 (0,7-10).

Figura 5.83 - Gráfico Box-Whiskers: Nitrogênio Amoniacal – Lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

A lagoa L2 com 0,5 m de profundidade, na fase 03, foi submetida a mesma taxa de aplicação de NTK e DBO que a lagoa L1(0,7-10) na fase 04. Confrontando os valores médios, verifica-se que o aumento na profundidade de 0,5m para 0,7 m acompanha o acréscimo na concentração de nitrogênio amoniacal de 5 mgNH₃-N/L na L2 (fase 03) para 15 mgNH₃-N/L na L1(0,7-10). As lagoas mais rasas parecem oferecer condições mais favoráveis para as atividades fotossintéticas e desenvolvimento da biomassa algal. A luz incidente sobre a lagoa rasa pode atingir toda a profundidade da lagoa, criando condições para o desenvolvimento de algas em toda massa líquida da lagoa. Se for considerado que o processo de volatilização da amônia seja a principal rota de remoção do nitrogênio, será razoável que, as melhores remoções aconteçam em lagoas onde a atividade fotossintética e desenvolvimento da biomassa algal também sejam intensas. À medida que a profundidade vai aumentando, a luz passa a não percorrer toda profundidade, desta forma, parte da massa líquida não contribuirá com a atividade fotossintética da lagoa.

Na Figura 5.84, encontram-se os gráficos contendo os valores médios de eficiência de remoção de nitrogênio amoniacal nas lagoas piloto durante toda fase experimental.

Figura 5.84 - Gráfico Box-Whiskers: Eficiência na remoção de nitrogênio amoniacal – Lagoa facultativa e pilotos (fase 04)

Nota-se que as maiores remoções em termos percentuais ocorreram na lagoa L2, de 0,5 m de profundidade. Na fase 01, a remoção média observada foi de 28 % na lagoa L1 e 55% na lagoa L2.

A redução na taxa de aplicação e o aumento do tempo de detenção hidráulica de 5 dias para 10 dias ocasionaram o aumento das remoções médias em ambas as lagoas piloto. Na fase 02, a média de remoção obtida foi 42% na L1 e 85% na L2. A remoção média na lagoa L2 continuou mais elevada na fase 03, mesmo estando as duas lagoas com a mesma taxa de aplicação superficial de DBO e NTK. Isto demonstra que lagoas mais rasas são mais eficientes para remoção de nitrogênio amoniacal. Nesta fase, o tempo de detenção na lagoa L2 foi reduzido de 10 dias para 7,5 dias e ainda assim a lagoa L2 manteve sua eficiência em 80%.

É possível comparar o efeito do aumento da profundidade das lagoas sobre as remoções considerando as eficiências médias ocorridas na lagoa L1(0,70-10) durante a fase 04 com a eficiência média na lagoa L2 durante a fase 03. As taxas, neste caso, foram semelhantes e isso permite verificar que o aumento da profundidade atuou negativamente sobre a eficiência, uma vez que ambas as lagoas possuem a mesma área superficial e mesma geometria.

Na fase 04 foi possível verificar o efeito da taxa de aplicação. A redução da taxa de aplicação superficial adotada na lagoa L1(0,70-5) de 0,0065 KgNTK/m²d para 0,003 KgNTK/m²d em L1(0,7-10) resultou no aumento da eficiência média de

30% para 60%.

5.1.6.4 Efeito da temperatura, pH e OD sobre a concentração de nitrogênio amoniacal efluente - Fases 01, 02, 03

Nesta seção foi discutido o comportamento da concentração de nitrogênio amoniacal em relação à temperatura das lagoas, o pH e a concentração de OD. As Figuras 5.85, 5.96 e 5.87 mostram os gráficos relativos às concentrações de nitrogênio amoniacal em função da temperatura, pH e oxigênio dissolvido, respectivamente.

Pelo gráfico da Figura 5.85, verifica-se que, em todas as fases operacionais, as menores concentrações efluentes tenderam a ocorrer nas maiores temperaturas, ou seja, verifica-se uma relação entre temperatura e eficiência de remoção do nitrogênio amoniacal. Embora o coeficiente de correlação tenha sido muito baixo, devido à dispersão dos pontos amostrais, os gráficos, ainda assim, permitem verificar a dependência das remoções com as condições locais, onde as lagoas estão inseridas. A temperatura tem um efeito sobre as atividades metabólicas dos organismos vivos. Desta forma, a temperatura pode desempenhar um papel importante nas atividades fotossintéticas das lagoas, aumentando a taxa de metabolização do carbono inorgânico em material celular, tendo como consequência o aumento do pH devido ao consumo deste carbono.

Figura 5.85 - Concentração de nitrogênio amoniacal em função da temperatura da lagoa L1 e L2 – (a) L1 fase 01, (c) L1 fase 02, (e) L1 fase 03, (b) L2 fase 01, (d) L2 fase 02 e (f) L2 fase 03.

Figura 5.86 - Concentração de nitrogênio amoniacal em função do pH da lagoa L1 e L2 – (a) L1 fase 01, (c) L1 fase 02, (e) L1 fase 03, (b) L2 fase 01, (d) L2 fase 02 e (f) L2 fase 03.

Figura 5.87 - Concentração de nitrogênio amoniacoal em função do OD da lagoa L1 e L2 – (a) L1 fase 01, (c) L1 fase 02, (e) L1 fase 03, (b) L2 fase 01, (d) L2 fase 02 e (f) L2 fase 03.

Para o pH, observa-se um comportamento semelhante nas concentrações de nitrogênio amoniacal. Verifica-se a tendência de ocorrer as menores concentrações efluentes à medida que o pH se eleva. O pH desempenha um papel importante na distribuição das espécies de amônia. Em pH elevado, a maior parte do nitrogênio amoniacal estará na forma de NH_3 , sujeito a ser volatilizado. O modelo de Pano e Middlebrooks (1982) considera a volatilização do nitrogênio amoniacal como sendo o principal processo na remoção de nitrogênio, sendo fortemente dependente do pH na lagoa. Outros autores, como por exemplo, Senzia et al. (2003), consideram a incorporação do nitrogênio pela biomassa algal como sendo a principal via de remoção. A nitrificação, dependendo das condições ambientais nas lagoas, como a temperatura e pH, podem apresentar um papel significativo na transformação do nitrogênio amoniacal.

Na fase 01, verifica-se uma grande dispersão dos pontos amostrais e isto, não permitiu delinear nenhuma tendência nas concentrações de nitrogênio amoniacal em função do pH das lagoas.

Na fase 01, os pontos amostrais ficaram mais situados na faixa de pH 7,0 a 8,4. Nesta fase, de acordo com o gráfico da Figura 5.86, que trata da distribuição das espécies de nitrogênio amoniacal em função do pH, os valores de pH encontram-se numa faixa de crescimento mais suave da fração de NH_3 , desta maneira, a variação do pH dentro dessa faixa acarreta pequenas alterações dessas frações e isto pode influenciar na dispersão dos pontos amostrais.

As concentrações de nitrogênio amoniacal parecem ser sensíveis à concentração de OD nas lagoas. As concentrações de nitrogênio amoniacal efluente decresceram à medida que a concentração de oxigênio dissolvido aumentou. O oxigênio e o pH, podem ser indicadores da intensidade da atividade fotossintética nas lagoas e isto pode ter uma influência no processo de volatilização, uma vez que aumenta a concentração de NH_3 . Considerando que o processo de volatilização possa ser modelado de acordo com uma cinética de primeira ordem, o aumento do gradiente de concentração provocaria o aumento da taxa de volatilização. Além disso, o meio supersaturado de oxigênio poderia aumentar o arraste de NH_3 para a atmosfera. Entretanto, para verificar isto, poderia se submeter amostras com concentrações significativas de nitrogênio amoniacal, em pH elevado, a diferentes concentrações de OD e medir a concentração final de nitrogênio em intervalos de

tempos.

Considerando apenas os valores médios de pH e concentração efluente de nitrogênio amoniacal nas duas lagoas piloto, o gráfico da Figura 5.88, permitiu estabelecer uma relação entre o pH e a concentração efluente de nitrogênio.

Figura 5.88 - Concentração de nitrogênio amoniacal efluente em função do pH

Pode-se observar pelo gráfico da Figura 5.92, que a relação entre pH e a concentração efluente de nitrogênio não é linear. As concentrações decrescem à medida que o pH das lagoas se eleva. Este comportamento também foi verificado para o NTK.

5.1.6.5 Perfil de concentração de nitrogênio Amoniacal ao longo do comprimento da lagoa - Fases 01, 02 e 04

No gráfico da Figura 5.89 pode-se observar as concentrações de amônia ao longo do comprimento da lagoa piloto L1.

(Fase 01)

(Fase 02)

(Fase 04)

Figura 5.89 - Perfil de concentração de nitrogênio amoniacal – Lagoa L1 (fases 01,02 e 04)

Pelos valores de concentração de nitrogênio amoniacal apresentados, verifica-se uma grande redução na concentração nos dois primeiros metros de comprimento. A partir desse ponto, as concentrações ficaram praticamente constantes ao longo do comprimento restante. Esse padrão foi verificado nas fases 01, 02 e 04 sendo que, na fase 03, o ensaio não foi realizado. O mesmo comportamento foi verificado na lagoa L2, como revelado pelo gráfico da Figura

5.90, que traz os gráficos contendo as concentrações de nitrogênio ao longo do comprimento da lagoa L2.

(Fase 01)

(Fase 02)

(Fase 04)

Figura 5.90 - Perfil de concentração de nitrogênio amoniacal – Lagoa L2 (fases 01,02 e 04)

O perfil de distribuição de nitrogênio amoniacal é compatível com o padrão de escoamento tendendo a um reator de mistura completa, corroborando o comportamento observado na lagoa L1 por meio do ensaio hidrodinâmico. Embora o ensaio não tenha sido realizado na lagoa L2, ambas as lagoas possuem geometrias

semelhantes, sendo, portanto, razoável aceitar que o mesmo padrão de escoamento tenha ocorrido na lagoa L2. As semelhanças apresentadas pelos perfis de concentração de nitrogênio amoniacal nas duas lagoas piloto reforçam a idéia de compatibilidade entre os escoamentos.

A queda brusca na concentração nos metros iniciais das lagoas piloto podem ter sido influenciadas pelo alto grau de mistura e pH na região do epilímnio.

5.1.6.6 Relação entre a razão de nitrogênio amoniacal efluente e afluente com a taxa de aplicação superficial de NTK.

A partir do monitoramento das taxas de aplicação e das concentrações de nitrogênio total kjeldahl foi possível construir um gráfico que relaciona as taxas de aplicação superficial de NTK com a relação entre o nitrogênio amoniacal efluente das lagoas piloto com o afluente, levando em consideração a profundidade das lagoas.

Figura 5.91 - Razão de nitrogênio efluente e afluente em função da taxa de aplicação superficial de NTK

Pode-se observar no gráfico da Figura 5.91 que as menores frações ocorreram na lagoa de menor profundidade para diversas taxas aplicadas. Embora o

R^2 não tenha sido ideal as curvas seguem uma tendência verificada durante toda a fase experimental. A Figura 5.92 permite fazer uma comparação das curvas apresentadas na Figura 5.91 com o modelo proposto por Yánes (2001). O modelo de Yánez foi validado em lagoas localizadas em San Juan e Lima, com taxas de aplicação superficial entre 50 kgDBO/ha.d e 1200kgDBO/ha.d e concentrações de nitrogênio amoniacal variando de 28 mg/L a 60 mg/L. A curva que representa o modelo de Yánes foi obtida pela aplicação da eq. (5.1).

$$\frac{NH_{3(\text{efluente})}}{NH_{3(\text{afluente})}} = \frac{CS}{(57,188 + 0,84 \times CS)} \quad (5.1)$$

Figura 5.92 - Razão de nitrogênio efluente e afluente em função da taxa de aplicação de NTK – Comparação com modelo de Yánes (2001)

Para a lagoa de 1,0 m de profundidade, o modelo de Yánes (2001) superestimou os valores da fração de nitrogênio amoniacal efluente e afluente para as menores taxas. À medida que as taxas crescem, o modelo passa a subestimar os valores da fração. Na lagoa de 0,5 m, o modelo superestimou os valores da fração. O modelo de Yánez não leva em consideração o efeito da profundidade das lagoas, ficando apenas em função da taxa de aplicação superficial de DBO.

A Figura 5.93 relaciona as taxas de aplicação de DBO com as taxas de NTK. O gráfico foi construído considerando os valores médios de cada fase experimental.

Figura 5.93 - Relação entre taxa de aplicação superficial de NTK e de DBO

O gráfico que relaciona as taxas apresentou boa correlação, demonstrando que as taxas de aplicação superficial de DBO e NTK, no caso das lagoas de Lins, são praticamente as mesmas. Além disso, o gráfico permite trabalhar com esses dois parâmetros. A partir da concentração efluente de nitrogênio amoniacal requerida para lagoa e a escolha de sua profundidade é possível determinar as taxas de projeto, seja em termos de NTK ou DBO, e a partir dessas taxas, determinar a área da lagoa necessária para atingir a concentração de nitrogênio amoniacal desejada.

5.1.6.7 Discussões Adicionais: Balanço de massa de nitrogênio amoniacal

A partir de um simples balanço de massa, construiu-se os gráficos das Figuras 5.94 e 5.95, que mostram a significância de cada processo (volatilização, assimilação pela biomassa) na remoção do nitrogênio amoniacal.

No balanço de massa foi considerado apenas o nitrogênio amoniacal que sai com o efluente, a parcela volatilizada e a parcela incorporada à biomassa. Além disso, durante as fases iniciais foram realizadas determinações de concentração de nitrito e nitrato. As concentrações foram muito baixas, deixando de ser realizado o monitoramento desses dois parâmetros. Os altos valores de pH, a competição entre algas e nitrificantes pelo carbono inorgânico, podem ter criado condições

desfavoráveis para o estabelecimento do processo de nitrificação, sendo então desconsiderada do balanço de massa sob hipótese do processo não ser significativo.

Para o cálculo da parcela incorporada, foi considerada que todo acréscimo de nitrogênio orgânico no efluente deve-se à fração de amônia utilizada pela biomassa algal, sendo determinada pela diferença entre nitrogênio orgânico afluente e efluente. Senzia et al. (2003) consideram que parte do nitrogênio amoniacal e nitrato serão incorporados na biomassa em seu balanço de massa sobre o nitrogênio orgânico.

A parcela de nitrogênio amoniacal volatilizada foi determinada como sendo a diferença entre o nitrogênio amoniacal afluente e a fração incorporada menos o nitrogênio amoniacal que sai das lagoas.

Os gráficos da Figura 5.94 mostram o balanço de nitrogênio amoniacal na lagoa L1 para fases 01, 02 e 03. Com exceção da fase 01, verifica-se que a volatilização e a incorporação na biomassa foram os processos mais significativos na remoção do nitrogênio amoniacal. Na fase 03, a volatilização colaborou com 49% da remoção de nitrogênio amoniacal no efluente da lagoa L1. Na fase 01, como comentado anteriormente, embora tenham ocorrido alguns valores de pH acima de 9,0, as médias foram relativamente menores em comparação às demais fases.

Figura 5.94 - Percentual de nitrogênio amoniacal incorporado a biomassa, que volatiliza e que deixa o sistema na lagoa L1 – Fases 01, 02 e 03

Os gráficos da Figura 5.95 mostram o balanço de massa para a lagoa L2 nas fases 01, 02 e 03.

L2 - fase01

L2 - fase02

L2 - fase03

Figura 5.95 - Percentual de nitrogênio amoniacal incorporado a biomassa, que volatiliza e que deixa o sistema na lagoa L2 – Fases 01, 02 e 03

Na lagoa L2, a volatilização aparece como sendo o processo mais efetivo na remoção da amônia, correspondendo a um valor de 73% na fase 02. A lagoa L2 apresentou valores percentuais, em termos de volatilização, maiores que a lagoa L1. Este fato também foi verificado quando comparadas as eficiências médias de remoção do nitrogênio em todas as fases.

Os altos valores de pH e oxigênio dissolvido ocorridos na lagoa L2 podem ter contribuído mais significativamente no processo de volatilização da amônia do que na lagoa L1.

5.2 RESULTADOS EXPERIMENTAIS – FILTRO PERCOLADOR

Neste capítulo são apresentados os resultados relativos ao monitoramento dos filtros nas fases 01, 02, 03 e 04. A nomenclatura "filtro de pedra" que aparece na maioria dos gráficos se refere ao filtro preenchido com brita. Da mesma forma que "filtro de plástico" estará se referindo ao filtro preenchido com anel plástico.

5.2.1 Resultados do monitoramento – Fase 01

5.2.1.1 *Parâmetros de controle – Fase 01*

Na fase 01, os filtros percoladores foram submetidos a uma taxa de aplicação hidráulica média de $3,8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ (baseado na área seccional do filtro). As taxas médias de aplicação hidráulica, baseadas na área total do material suporte, foram de $0,009 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ e $0,014 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$, no filtro de plástico e pedra, respectivamente. O gráfico da Figura 5.96 mostra os valores médios e os máximos ocorridos durante a fase experimental. Verifica-se certa dispersão em torno da média. Este comportamento está relacionado com as variações nas concentrações de DBO ao longo do período e flutuações na vazão de alimentação. Pelas médias apresentadas, nota-se que os dois filtros apresentaram taxas de aplicação semelhantes.

Figura 5.96 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação hidráulica - Filtros percoladores (fase 01)

O mesmo comportamento apresentado pela taxa de aplicação hidráulica é verificado na taxa de aplicação superficial de DBO, ou seja, observa-se uma certa dispersão em torno da média. As médias apresentadas em cada filtro foram iguais, revelando que, durante o período, os filtros foram submetidos a mesma taxa de aplicação superficial de DBO. O valor médio observado foi 0,22 kgDBO/m².d (baseado na área seccional do filtro). Considerando a área total do material suporte no filtro de plástico e pedra, a taxa média observada foi de 0,0006 kgDBO/m².d para o filtro de plástico e 0,0008 kgDBO/m².d para o filtro de pedra.

Figura 5.97 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação superficial de DBO – Filtros percoladores (fase 01)

Na Figura 5.98, encontram-se os valores médios, máximos e mínimos para a taxa de aplicação volumétrica em ambos os filtros na fase 01.

Figura 5.98 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação volumétrica de DBO – Filtros percoladores (fase 01)

A taxa média volumétrica foi de 0,06 kgDBO/m³.d em ambos os filtros. A composição dos valores apresentado, em termos de taxa de aplicação hidráulica e volumétrica de DBO, classificam os filtros, nesta fase, como sendo de taxa baixa, portanto, sendo favorável ao processo de nitrificação. Segundo Metcalf e Eddy Inc. (2004), remoções de 90% de NH₄ poderão ocorrer em filtros percoladores operando com taxas de aplicação volumétricas de 0,08 kgDBO/m³.d. Para o mesmo autor, uma eficiência de 50% será esperada em filtros operando com taxas próximas de 0,22 kgDBO/m³.d. Dentro dessa faixa de taxas de aplicação volumétricas, os filtros, estariam operando como filtros de baixa taxa.

5.2.1.2 Condições ambientais no filtro percolador – Fase 01

A média do pH efluente, em ambos os filtros, foi de 8,0, sendo observados valores máximos próximos a 9,0 e mínimos próximos a 4,0. O valor médio de pH encontra-se dentro de uma faixa ideal para nitrificação.

Figura 5.99 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01)

A temperatura média no afluente e efluente dos filtros piloto foi 25°C, sendo observados valores máximos de 31°C e mínimos de 18°C. A região de Lins é caracterizada como uma região de clima quente. A fase 01 iniciou-se em meados da estação de inverno. Na Figura 5.100 pode-se observar o gráfico Box-Whiskers referente à temperatura.

Figura 5.100 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01)

Os valores de OD na lagoa facultativa oscilaram muito durante a fase 01, sendo observado um valor médio de 4 mgO₂/L e valores máximos acima de 10 mgO₂/L e mínimos próximos a zero.

Os valores médios de OD no filtro, em ambos os filtros, foi de 6 mgO₂/L, sendo observado um valor mínimo no filtro preenchido com anel plástico de 2 mgO₂/L. As concentrações de oxigênio nos filtros percoladores ficaram dentro da faixa necessária para o estabelecimento do processo de nitrificação. Na Figura 5.101 encontra-se o gráfico contendo as médias e os valores máximos e mínimos de

OD.

Figura 5.101 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01)

A Figura 5.102 mostra o gráfico contendo a série histórica de OD durante a fase 01

Figura 5.102 - Gráfico série histórica: OD – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01)

Pelo gráfico contendo as séries históricas verifica-se que, durante a fase 01, houve uma grande ocorrência de valores muito baixos de OD no efluente da lagoa facultativa. No início da fase 01, algumas amostras foram retiradas no período da manhã, próximos às 8 horas. Além disso, as caixas de entrada das lagoas facultativas sofreram manutenção neste período, desta forma pode ter ocorrido, em virtude de algumas manobras, a sobrecarga da lagoa facultativa que alimenta os filtros.

O gráfico da Figura 5.103 mostra os valores médios da alcalinidade observados durante a fase 01. Os valores de alcalinidade média foram de 400

mgCaCO₃/L na facultativa, 270 mgCaCO₃/L no filtro de plástico e 200 mgCaCO₃/L no filtro de pedra.

Desta maneira, durante a fase 01, observou-se o consumo de alcalinidade em ambos os filtros, indicando a possibilidade de ocorrência de nitrificação para as taxas aplicadas durante a fase 01.

Figura 5.103 - Gráfico Box-Whiskers : Alcalinidade – Efluente da lagoa facultativa e filtros percoladores (fase 01)

5.2.1.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO e Sólidos – Fase 01

A Tabela 5.47 apresenta a estatística básica para a DBO total e filtrada nos filtros percoladores.

Tabela 5.47 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 01

Estatística	DBO total (mg/L)			DBO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	FpL*	Fp**	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	9	9	9	7	9	9
Mínimo	29	30	23	7	5	7
Máximo	155	153	176	20	60	71
Média	56	69	68	16	19	22
Mediana	48	64	50	17	12	15
Desvio padrão	39	36	48	5	17	20

*FpL = filtro com meio suporte de anel plástico

**Fp = filtro com meio suporte de pedra britada

Na fase 01, pela observação do valor médio da DBO na lagoa facultativa, filtro de pedra e plástico, verifica-se que não ocorreu remoção da DBO total. Os valores médios obtidos foram 56 mgDBO_T/L na facultativa, e 69 mgDBO_T/L no filtro de pedra e plástico.

Figura 5.104 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01)

O mesmo padrão pode ser observado em termos da DBO filtrada. O valor médio observado foi de 19 mgDBO_F/L no efluente da lagoa facultativa e em torno de 20 mgDBO_F/ no filtro de pedra e no filtro de plástico. Neste caso, os valores médios da DBO total e filtrada podem ter sido influenciados pelos seus valores extremos. O gráfico da Figura 5.105 mostra os valores médios observados, máximos e mínimos para a DBO filtrada.

Figura 5.105 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01)

A DQO total, em termos de valores médios, apresentou um comportamento diferente, apresentando uma redução na concentração média nos

filtros. Na Tabela 5.48 encontra-se a estatística básica para a DQO.

Tabela 5.48 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 01

Estatística	DQO total (mg/L)			DQO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	15	15	14	3	3	3
Mínimo	165	94	94	57	8	15
Máximo	299	315	280	75	117	272
Média	238	205	179	63	74	123
Mediana	226	189	168	58	97	82
Desvio padrão	41	63	54	10	58	133

As Figuras 5.106 e 5.107 mostram os gráficos Box-Whiskers para a DQO bruta e filtrada.

Figura 5.106 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01)

Para DQO filtrada, observa-se um aumento na concentração média de 63 mgDQO_F/L na facultativa para 123 mgDQO_F/L no filtro de pedra e 74 mgDQO_F/L no filtro de plástico. Observa-se uma dispersão maior dos dados em torno da média de DQO filtrada no filtro de pedra.

Figura 5.107 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01)

Os filtros percoladores funcionando como unidades terciárias, podem apresentar baixas eficiências na remoção de DBO e DQO filtrada, uma vez que as concentrações de matéria, orgânica solúvel e, facilmente degradáveis no afluente dessas unidades, terciárias, são muito baixas e a fração particulada, principalmente devido à biomassa algal, pode não sofrer qualquer ação nos filtros.

As concentrações médias de sólidos totais, partindo da lagoa facultativa até a saída dos filtros, permaneceram inalteradas, conforme pode ser visto na Tabela 5.49 e no gráfico da Figura 5.108.

Tabela 5.49 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 01

Estatística	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	8	8	8	8	8	8
Média	609	643	593	243	253	245
Mínimo	325	363	313	125	138	144
Máximo	713	825	850	325	388	338
Mediana	654	663	631	242	256	241
Desvio padrão	121	142	176	64	81	57

Pode ser observado que a dispersão dos dados em torno da média foi maior nos filtros percoladores do que no efluente da facultativa. A concentração média foi próxima a 609 mgST/L na facultativa, 643 mgST/L no filtro com meio suporte de plástico e 593 mgST/L no filtro com meio suporte de pedra.

Figura 5.108 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01)

Na Figura 5.109, o gráfico de sólidos totais voláteis apresenta um comportamento semelhante ao que foi verificado com os sólidos totais. Em termos de concentração média, os valores ficaram praticamente inalterados.

Figura 5.109 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 01)

A Tabela 5.50 mostra a estatística básica para SST e SSV onde é possível observar as médias e o número de dados de cada parâmetro.

Tabela 5.50 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 01

Estatística	SST (mg/L)			SSV (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	8	8	8	8	8	8
Média	127	89	105	108	74	77
Mínimo	94	52	42	78	42	40
Máximo	174	156	222	156	134	110
Mediana	123	85	100	101	68	79
Desvio padrão	29	33	53	28	29	25

Os gráficos das Figuras 5.110 e 5.111, que tratam dos valores médios, máximos, mínimos de sólidos suspensos totais e suspensos voláteis, mostram uma redução desses dois parâmetros nos filtros percoladores

Figura 5.110 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01)

Figura 5.111 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente da lagoa facultativa e efluentes dos filtros percoladores (fase 01)

Era esperado que os filtros contribuíssem um pouco na redução da DBO e DQO, mesmo com eficiências baixas, uma vez que o filtro opera como uma unidade terciária. Entretanto, a fase 01 constitui-se como o início de funcionamento dos filtros e, o processo de formação do biofilme sobre o meio suporte, encontra-se na sua fase, também, inicial. Desta forma, mais sujeito aos efeitos do escoamento (cisalhamento sobre o biofilme) que poderiam provocar o desprendimento de parte do biofilme. A parcela de biomassa desprendida pode ocasionar um acréscimo nos valores de DBO e DQO.

5.2.2 Resultados do monitoramento – Fase 02

5.2.2.1 Parâmetros de controle – Fase 02

Na fase 02, houve problemas com o sistema de distribuição do efluente da lagoa facultativa sobre os filtros percoladores. O gráfico da Figura 5.112 mostra a discrepância das taxas aplicadas em cada filtro. No filtro preenchido com anéis plásticos, as taxas aplicadas, baseadas na área seccional do filtro, ficaram em torno de 50% igual ou menores que $5 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$. A média neste caso foi praticamente da mesma ordem da mediana. No filtro preenchido com brita, a média foi de $6 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ (baseadas na área seccional do filtro). Considerando a área total dos materiais utilizados como meio suporte, as taxas de aplicação hidráulica apresentaram médias de $0,012 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ e $0,021 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{d}$ para o filtro de pedra e plástico, respectivamente. Nesta fase, as dificuldades enfrentadas para manter a mesma média de aplicação nos dois filtros foram grandes. Desta forma, na fase 03 houve substituição do sistema de distribuição.

Figura 5.112 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação hidráulica – Filtros percoladores (fase 02)

O comportamento apresentado pela taxa de aplicação hidráulica tem reflexo direto sobre as taxas de aplicação superficial. Sendo assim, nesta fase os filtros operaram com taxas diferentes. Neste caso, a mediana foi de $0,23 \text{ kgDBO}/\text{m}^2.\text{d}$

no filtro de plástico e 0,25 kgDBO/m²d no filtro de pedra. As taxas de aplicação superficial de DBO baseadas na área total do material de enchimento apresentaram médias de 0,0005 kgDBO/m²d e 0,001 kgDBO/m²d para o filtro de plástico e pedra, respectivamente. A Figura 5.113 mostra os valores médios, percentis, máximos e mínimos para a taxa de aplicação superficial de DBO.

Figura 5.113 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação superficial de DBO – Filtros percoladores (fase 02)

A Figura 5.114 mostra o gráfico Box-Whiskers da taxa de aplicação volumétrica de DBO. Pode-se observar que houve discrepâncias nas taxas aplicadas em cada filtro. A taxa volumétrica média no filtro de plástico foi de 0,05 kgDBO/m³.d e no filtro de pedra a taxa volumétrica média foi de 0,07 kgDBO/m³.d.

Figura 5.114 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação volumétrica de DBO – Filtros percoladores (fase 02)

Para as taxas aplicadas na fase 02, os filtros deveriam ser classificados como intermediários segundo Metcalf e Eddy INC. (2004). Entretanto, pelas taxas de

aplicação volumétrica aplicadas, os filtros devem ser classificados como de baixa taxa.

5.2.2.2 Condições ambientais no filtro percolador – Fase 02

A média de pH, em ambos os filtros, durante a fase 02, foi de 7,9, sendo observados valores acima de 8,0. A média na lagoa facultativa foi de 7,2. Esses valores de pH são favoráveis para a ocorrência de nitrificação. O gráfico da Figura 5.115 mostra a estatística básica para o pH.

Figura 5.115 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

As médias de temperatura no efluente da lagoa facultativa e filtros percoladores foram de 24°C, sendo registrados valores perto de 30°C, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.116.

Figura 5.116 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

O valor médio de OD no efluente da lagoa facultativa foi menor do que 2 mgOD/L, sendo observado o valor máximo de 10 mgO₂/L. É provável que a lagoa facultativa, neste período, tenha sido operada com sobrecarga. O valor médio de OD nos filtros se manteve no mesmo patamar dos valores encontrados na fase 01. No filtro preenchido com pedra britada, a média foi de 6 mgO₂/L sendo observado esta média no filtro preenchido com anel plástico. O gráfico da Figura 5.117 mostra os valores médios, máximos e mínimos para o OD no efluente da lagoa facultativa e filtros.

Figura 5.117 - Gráfico Box-Whiskers: OD – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

Nesta fase, verifica-se uma redução da alcalinidade média em ambos os filtros. A média foi 250 mgCaCO₃/L e 200 mgCaCO₃/L no filtro de plástico e pedra, respectivamente. A Figura 5.118 mostra os valores médios, máximos e mínimos para a alcalinidade em ambos os filtros.

Figura 5.118 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

5.2.2.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO e Sólidos – Fase 02

Na fase 02, os filtros percoladores contribuíram para a redução da DBO total, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.119. As concentrações médias foram de 46 mgDBO_T/L no filtro de plástico e de 42 mgDBO_T/L no filtro preenchido com brita. A Tabela 5.51 mostra a estatística básica para a DBO total e filtrada.

Tabela 5.51 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 02

Estatística	DBO total (mg/L)			DBO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	4	4	4	4	4	4
Mínimo	41	36	1	7	5	5
Máximo	82	55	62	18	10	10
Média	57	46	42	13	8	7
Mediana	54	46	52	14	8	6
Desvio padrão	17	8	28	5	2	3

Os valores máximos ocorridos nesta fase foram iguais ou menores que a média de DBO total no efluente da lagoa facultativa. Levando em consideração as médias apresentadas, as eficiências na redução da DBO ficaram perto dos 30%.

Figura 5.119 - Gráfico Box-Whiskers: DBO total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

As concentrações médias da DBO filtrada foram abaixo de 8 mgDBO_F/L. O filtro preenchido com pedra manteve uma média semelhante ao meio suporte de plástico, mesmo estando submetido à uma taxa de aplicação relativamente maior nessa fase.

Figura 5.120 - Gráfico Box-Whiskers: DBO filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

Nesta fase, verificam-se reduções nas concentrações médias de DQO total em ambos os filtros. A Tabela 5.52 apresenta a estatística básica para a DQO.

Tabela 5.52 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 02

Estatística	DQO total (mg/L)			DQO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	4	4	4	3	4	4
Mínimo	99	66	117	12	19	20
Máximo	261	168	171	63	43	54
Média	193	130	136	42	29	36
Mediana	206	143	128	50	27	35
Desvio padrão	70	45	24	27	10	15

A concentração média da DQO total no efluente da lagoa facultativa foi de 193 mgDQO_T/L, e nos filtros, as concentrações médias foram de 130 mgDQO_T/L no filtro preenchido com anel plástico e 136 mgDQO_T/L no filtro contendo pedra britada. Estes valores podem ser observados no gráfico da Figura 5.121.

Figura 5.121 - Gráfico Box-Whiskers: DQO total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

A DQO filtrada apresentou o mesmo comportamento da DQO total, ou seja, podem-se observar reduções nas concentrações. Pelo gráfico da Figura 5.122, verifica-se que a DQO filtrada nos filtros apresentou uma concentração média menor que 36mgDQO_F/L para ambos os septos.

Figura 5.122 - Gráfico Box-Whiskers: DQO filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

Os filtros percoladores na fase 02 apresentaram uma redução na concentração de sólidos totais. A menor média ocorreu no filtro de plástico. Na Tabela 5.53 encontram-se os valores médios, máximos e mínimos para ST e STV.

Tabela 5.53 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 02

Estatística	ST (mg/L)			STV (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	4	4	4	4	4	4
Mínimo	588	110	500	200	70	175
Máximo	775	675	700	300	263	301
Média	652	468	595	247	176	221
Mediana	624	544	591	244	186	204
Desvio padrão	88	251	105	43	80	59

O filtro de pedra, devido a problemas no distribuidor de efluente, ficou submetido, na média, à uma taxa relativamente superior ao que foi aplicado no filtro preenchido com anel plástico. Desta forma, as diferenças encontradas na quantidade de sólidos nos efluentes de cada filtro, podem estar relacionadas aos efeitos hidrodinâmicos sobre o biofilme.

Figura 5.123 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

O gráfico da Figura 5.124 revela que houve uma redução no valor médio de sólidos totais voláteis no filtro percolador. Assim como ocorrido com os sólidos totais, verifica-se que o filtro de plástico apresentou menores concentrações médias. As médias foram de 176 mgSTV/L no filtro preenchido com anel plástico e de 221 mgSTV/L no de brita.

Figura 5.124 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

Os gráficos das Figuras 5.125 e 5.126 mostram os valores médios, máximos e mínimos dos sólidos suspensos totais e voláteis no filtro percolador e a Tabela 5.54 apresenta a estatística básica sobre esses dois parâmetros.

Tabela 5.54 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 02

Estatística	SST (mg/L)			SSV (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	4	4	4	4	4	4
Mínimo	84	14	76	82	16	52
Máximo	136	92	148	110	74	132
Média	117	63	103	99	55	85
Mediana	123	72	93	102	64	77
Desvio padrão	23	34	32	12	26	34

Nesta fase podem-se observar reduções nas concentrações médias de sólidos suspensos totais e suspensos voláteis.

Figura 5.125 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

Figura 5.126 - Gráfico Box-Whiskers - Sólidos Suspensos Voláteis – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 02)

As médias em termos de sólidos suspensos totais foram 63 mgSST/L e 103 mgSST/L no filtro de plástico e pedra, respectivamente. Para os sólidos

suspensos voláteis as médias observadas foram 55 mgSSV/L e 85 mgSSV/L.

5.2.3 Resultados do monitoramento – Fase 03

5.2.3.1 Parâmetros de controle – Fase 03

Nesta fase, as taxas de aplicação foram novamente aumentadas, entretanto, os valores impostos ainda caracterizam os filtros como baixa taxa, segundo as taxas de aplicação volumétrica. Considerando as taxas de aplicação hidráulica, os filtros poderiam ser classificados como sendo de taxa intermediária. Pode-se observar pelo gráfico da Figura 5.127 que as médias apresentaram ainda diferenças entre os filtros. Nesta fase, foram realizados testes das médias para amostras com variâncias diferentes para verificar se as taxas foram tão desiguais em virtude das dispersões. Os testes revelaram que, apenas na fase 02, o filtro ficou realmente submetido a taxas diferentes em cada material de enchimento. Os testes estão relatados no item 5.2.5. As médias foram 8 m³/m²d e 8,3 m³/m² d (considerando a área seccional do filtro) no filtro de plástico e pedra respectivamente. As taxas de aplicação hidráulica, considerando a área total do meio suporte, foram 0,019 m³/m².d e 0,032 m³/m².d para o filtro de plástico e pedra, respectivamente.

Figura 5.127 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação hidráulica – filtros percoladores (fase 03)

Pelo gráfico da Figura 5.128 verifica-se que as medianas foram relativamente próximas nesta fase. A taxa média de aplicação de DBO, considerando a área seccional do filtro percolador, foi de 0,6 kgDBO/m².d no filtro de plástico e 0,72 kgDBO/m² no filtro de pedra. As taxas de aplicação superficial de DBO, em termos da área total do material de enchimento, foram de 0,002 kgDBO/m².d e 0,003 kgDBO/m².d para o filtro de plástico e pedra, respectivamente.

Figura 5.128 - Gráfico Box-Whiskers: Taxa de aplicação superficial de DBO – filtros percoladores (fase 03)

Para a taxa de aplicação volumétrica de DBO as médias foram de 0,16 kgDBO/m³.d para o filtro de plástico e 0,20 kgDBO/m³.d no filtro de pedra. O gráfico da Figura 5.129 mostra a estatística básica para a taxa de aplicação volumétrica em ambos os filtros.

Figura 5.129 - Gráfico Box-Whiskers - Taxa de aplicação volumétrica de DBO – filtros percoladores (fase 03)

Pelas taxas volumétricas de DBO aplicadas durante a fase 03, os filtros devem ser classificados como de taxa baixa.

5.2.3.2 Condições ambientais nos filtros percoladores – Fase 03

O pH no efluente da facultativa foi de 7,7, sendo observados valores acima de 8,5. O efluente do filtro, para os dois tipos de enchimento utilizados, apresentou uma média próxima a 8, como pode ser visto no gráfico da Figura 5.130.

Essa elevação no pH pode estar relacionada à presença de algas na região superior do filtro. No final do período de funcionamento dos filtros, foram realizados ensaios para verificar a presença de clorofila-a no efluente dos filtros. Em ambos, foram constatadas quantidades significativas de clorofila-a.

Os valores para os filtros, sendo submetidos à uma taxa de aplicação hidráulica compatível com a fase 01, foram de 218 µg/L no efluente da facultativa, 319 µg/L no filtro de pedra e 267 µg/L no filtro de plástico. Para os filtros operando com taxa de aplicação hidráulica próxima a 10 m³/m².d, os valores encontrados nos efluentes foram de 773 µg/L na facultativa, 776 µg/L no filtro de pedra e 568 µg/L no filtro preenchido com anel plástico. Para as taxas baixas, foram verificadas concentrações no efluente do filtro até maiores que na facultativa. Visualmente, notou-se a formação de lodo no topo dos filtros.

Figura 5.130 - Gráfico Box-Whiskers: pH – Efluente da Lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

A temperatura média registrada no período foi perto dos 24°C. A fase 03 percorreu o período final de verão, outono e início do inverno e este fato fica evidente nas diferenças entre os valores máximos e mínimos.

Figura 5.131 - Gráfico Box-Whiskers: Temperatura – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

Durante a fase operacional, foi verificada concentrações muito baixas de oxigênio dissolvido na lagoa facultativa, ocorrendo valores de 0 mgO₂/L. A média na facultativa foi de 2,0 mgO₂/L e no efluente do filtro foi de 6,0 mgO₂/L em ambos os filtros. O gráfico da Figura 5.132 mostra o valor médio, percentis, mediana, máximos e mínimos para o oxigênio dissolvido.

Figura 5.132 - Gráfico Box-Whiskers: Oxigênio Dissolvido (OD) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

Nos dois filtros percoladores, na fase 03, ocorreu a redução da alcalinidade. A média na lagoa facultativa foi de 400 mgCaCO₃/L e no efluente dos filtros foi de 300 mgCaCO₃/L. A Figura 5.133 mostra a estatística básica para a alcalinidade.

Figura 5.133 - Gráfico Box-Whiskers: Alcalinidade – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

5.2.3.3 Matéria Orgânica – DBO, DQO e Sólidos – Fase 03

Na Tabela 5.55 encontra-se a estatística básica para a DBO total e filtrada na fase 03.

Tabela 5.55 - Resumo estatístico DBO total e filtrada – Fase 03

Estatística	DBO total (mg/L)			DBO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	9	8	9	9	9	9
Mínimo	52	60	45	10	6	9
Máximo	116	104	107	23	19	19
Coef. Var	0,29	0,22	0,31	0,27	0,33	0,28
Média	80	73	71	17	11	12
Mediana	82	64	64	15	10	11
Desvio padrão	24	16	22	4	4	3

A tendência de redução na concentração da DBO total no filtro percolador, verificada na fase 02, foi mantida durante a fase 03, mesmo com o aumento da taxa de aplicação superficial da DBO. Entretanto, no caso de filtros operando como unidades terciárias, as eficiências são baixas, ficando abaixo dos 30%. Neste caso, em termos de concentração média, a eficiência em ambos os filtros, foram menores que 15% contra os 30% obtidos na fase 02. Desta forma, levando em consideração o comportamento das eficiências envolvidas na fase 02 e 03, o aumento na taxa de aplicação superficial contribuiu negativamente, como deveria ser esperado. A Figura 5.134 mostra a estatística básica para a DBO total.

Figura 5.134 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

No gráfico da Figura 5.135 é possível verificar a redução da DBO filtrada em ambos os filtros percoladores. A média para os dois materiais de enchimento utilizados (brita e anel plástico) foi de 11 mgDBO_F/L.

Figura 5.135 - Gráfico Box-Whiskers: DBO Filtrada – Lagoa facultativa e efluente dos filtro percolador (fase 03)

A concentração da DQO total também foi reduzida no filtro percolador, como pode ser observado pelas médias presentes no gráfico da Figura 5.136. Na Tabela 5.56 encontra-se a estatística básica para a DQO.

Tabela 5.56 - Resumo estatístico DQO total e filtrada – Fase 03

Estatística	DQO total (mg/L)			DQO filtrada (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	8	8	8	8	7	8
Mínimo	170	132	143	8	38	19
Máximo	388	273	285	141	123	126
Coef. Var	0,31	0,24	0,26	0,64	0,42	0,52
Média	267	202	218	63	67	62
Mediana	238	209	219	67	64	63
Desvio padrão	83	48	56	41	28	32

As eficiências na redução da DQO total ficaram abaixo de 25%.O gráfico da Figura 5.137 mostra que os valores médios da DQO filtrada não sofreram alterações ao longo do sistema.

Figura 5.136 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Total – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

Figura 5.137 - Gráfico Box-Whiskers: DQO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

A série histórica de dados mostra que houve em algumas ocasiões redução da DQO filtrada em ambos os filtros.

Figura 5.138 - Gráfico série histórica: DQO Filtrada – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

Os valores médios obtidos durante a fase 03 com relação aos sólidos

totais e sólidos totais voláteis mostram que não houve redução desses dois parâmetros no filtro percolador. A Tabela 5.57 mostra os valores médios, o desvio padrão e o número de dados de sólidos totais e totais voláteis na fase 03.

Tabela 5.57 - Resumo estatístico ST e STV – Fase 03

Estatística	ST			STV		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	8	8	8	8	7	8
Mínimo	480	480	510	170	180	210
Máximo	700	660	720	400	270	340
Coef. Var	0,15	0,1	0,12	0,35	0,16	0,18
Média	571	563	604	234	220	260
Mediana	545	565	590	190	200	240
Desvio padrão	85	58	75	81	36	47

As Figuras 5.139 e 5.140 mostram os gráficos Box-Whiskers de sólidos totais e totais voláteis, respectivamente.

Figura 5.139 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais (ST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

Figura 5.140 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Totais Voláteis (STV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

As concentrações médias de sólidos totais foram 571 mgST/L no efluente da facultativa, 563 mgST/L no filtro de plástico e 604 no filtro preenchido com pedra britada. Para os sólidos totais voláteis, as concentrações médias nos filtros percoladores foram 220 mgSTV/L no filtro de plástico, e 260 mgSTV/L no filtro de pedra, enquanto na facultativa, a média observada foi de 234 mgSTV/L.

Entretanto, o mesmo não foi observado em relação aos valores médios de sólidos suspensos totais e voláteis, onde se verifica uma redução nos valores de concentração. A Tabela 5.58 mostra o resumo estatístico para os sólidos suspensos e suspensos voláteis.

Tabela 5.58 - Resumo estatístico SST e SSV – Fase 03

Estatística	SST (mg/L)			SSV(mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	9	9	9	9	9	9
Mínimo	82	54	64	66	6	56
Máximo	286	162	166	266	163	150
Coef. Var	0,41	0,39	0,36	0,51	0,53	0,33
Média	161	107	120	129	98	108
Mediana	142	86	146	104	96	124
Desvio padrão	66	41	43	66	52	36

A média em termos de suspensos totais foi de 107 mgSST/L no filtro de plástico e 120 mgSST/L no de pedra, conforme o gráfico da Figura 5.141. Com relação ao sólido suspenso volátil o valor médio, em ambos os filtros, foi em torno de 100 mgSST/L. A Figura 5.142 mostra o gráfico Box-Whiskers para os sólidos suspensos voláteis.

Figura 5.141 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Totais (SST) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

Figura 5.142 - Gráfico Box-Whiskers: Sólidos Suspensos Voláteis (SSV) – Efluente da lagoa facultativa e efluente dos filtros percoladores (fase 03)

A Tabela 5.59 mostra alguns valores de DBO total e sólidos suspensos totais de filtros percoladores, em sistemas de tratamento de esgotos domésticos.

Tabela 5.59 – Características e desempenhos de filtros percoladores em sistemas de tratamento de esgotos domésticos.

Condições operacionais		Meio suporte	Afluente		Efluente		Referência
TAV (kgDBO/m³.d)	Temperatura (°C)		DBO (mg/L)	SST (mg/L)	DBO (mg/L)	SST (mg/L)	
0,28	17-20	plástico	62	-	7,5	<10	EPA (1991)
0,19	17-21	plástico	127	-	10	<5	EPA (1991)
2,13	17-19	plástico	122	-	50	30	EPA (1991)
0,21	23-28	escória	101	-	7	9	EPA (1991)
0,59	12	pedra	102	-	-	18	Harrison e Daigger (1987)

Fonte: Almeida (2007)

Notam-se pela Tabela 5.59, que as concentrações de sólidos suspensos totais, apresentadas na literatura, foram relativamente menores quando comparadas com as concentrações obtidas na fase 01, 02 e 03 nos filtros de pedra e plástico. Os dados da literatura, presentes na Tabela 5.59, não revelam as concentrações afluentes de sólidos. Supondo que os filtros apresentados na Tabela 5.59 não tivessem sido operados como unidades de pós-tratamento de efluentes de lagoas facultativas, a diferença entre as concentrações de sólidos nos dados da literatura e os obtidos na pesquisa poderia estar relacionada com o aporte de sólidos, representada pela biomassa algal no efluente das lagoas facultativas, nos filtros. Essa fração, para as condições operacionais nos filtros, parece não ter sofrido qualquer ação ao longo do filtro, colaborando para a baixa eficiência de redução de

sólidos. Embora os efluentes dos filtros tenham sido coletados na saída de cada unidade, esses efluentes, mesmo após os decantadores, poderiam apresentar concentrações de sólidos semelhantes às concentrações obtidas na saída dos filtros, isto porque, a grande parte de sólidos, representado pelas algas, possui baixa sedimentação. Esses sólidos colaboram da mesma forma com as flutuações e acréscimos de DBO e DQO nos filtros.

Meiring et al. (1995), operando um filtro percolador de baixa carga, em um sistema PETRO, obteve concentrações efluentes de 28 mgSST/L com uma eficiência de remoção de 39%.

5.2.4. Resultados do monitoramento das formas nitrogenadas – Fases 01,02 e 03

5.2.4.1. Taxas de aplicação de NTK

Na Figura 5.143 encontram-se os gráficos (a), (b) e (c) relativos às taxas de aplicação superficial de NTK das fases 01, 02 e 03 na qual o filtro foi submetido. Durante a fase 01 foi aplicado, considerando a área seccional do filtro, uma taxa média de 0,18 KgNTK-N/m²d nos dois materiais de enchimento (brita e anel plástico). Na fase 02, as taxas foram aumentadas, entretanto, verifica-se que a taxa média para os dois enchimentos foram diferentes. No filtro de plástico, a média foi de 0,22 KgNTK-N/m²d e de 0,28 kgNTK-N/m²d no filtro de pedra.

Figura 5.143: Gráfico Box-Whiskers - Taxa de aplicação de NTK – Filtros percoladores (fases 01, 02 e 03)

No início da fase 03, o filtro ainda operava com o distribuidor antigo, sendo substituído durante esta fase. A mudança contribuiu para diminuir as diferenças entre as vazões nos dois filtros. A taxa média no filtro de plástico, considerando a área seccional do filtro, foi de 0,48 kgNTK-N/m².d e no filtro de pedra em torno de 0,5 kgNTK-N/m².d.

Na fase 01, levando em consideração a área total do material suporte, a média no filtro de plástico foi de 0,0004 kgNTK/m².d e no filtro de pedra de 0,0007 kgNTK/m².d. A média na fase 02, considerando a área total do material suporte, foi de 0,0006 kgNTK/m².d e 0,0009 kgNTK/m².d no filtro de plástico e pedra, respectivamente. A média na fase 03 no filtro de plástico, considerando a área total do material de enchimento foi de 0,001 kgNTK/m².d e para o filtro de pedra, fazendo

a mesma consideração para área, a média foi de 0,002 kgNTK/m².d

5.2.4.2 Monitoramento do Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK) - Fases 01, 02, 03 e 04

Na Figura 5.144 encontra-se o gráfico contendo as médias de NTK no afluente e efluente do filtro percolador referente à fase 01 e a Tabela 5.60 mostra um resumo estatístico para este parâmetro.

Tabela 5.60 - Resumo estatístico NTK – Fase 01

Estatística	NTK (mg-N/L)		
	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	21	21	20
Mínimo	38	11	9
Máximo	72	50	46
Coef. Var	0,18	0,38	0,46
Média	51	30	20
Mediana	52	33	19
Desvio padrão	9	12	9

Nesta fase inicial, onde os filtros operaram como de baixa taxa, verifica-se uma redução na concentração média de NTK em ambos os filtros. O filtro preenchido com brita, apresentou as menores concentrações, sendo observado uma média de 20 mgNTK-N/L. Levando-se em consideração a mediana, verifica-se que 50% dos dados ficaram abaixo da média. No filtro preenchido com anel plástico, a média foi de 30 mgNTK-N/L.

Figura 5.144 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente da lagoa facultativa e filtros percoladores (fase 01)

Na fase 02, as taxas de aplicação hidráulica no filtro de plástico, devido aos problemas apresentados no distribuidor, resultaram muito próximas da taxa praticada na fase 01. No filtro de pedra, a taxa foi superior em relação à fase 01. Mesmo o filtro de pedra sendo submetido a uma taxa superior, a média de NTK não sofreu alteração, apresentando um valor de 20 mgNTK-N/L. A Tabela 5.61 mostra o resumo estatístico para o NTK na fase 02.

Tabela 5.61 - Resumo estatístico NTK – Fase 02

Estatística	NTK (mg/L)		
	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	15	16	16
Mínimo	44	8	9
Máximo	114	47	36
Coef. Var	0,3	0,46	0,41
Média	57	25	23
Mediana	53	25	26
Desvio padrão	17	11	9

Mesmo sendo submetido à mesma taxa da fase 01, o filtro de plástico na fase 02, apresentou efluente com uma concentração menor, sendo a média de 20 mgNTK-N/L. Após o estágio inicial de operação, se as condições hidrodinâmicas forem favoráveis, poderá ocorrer o desenvolvimento de um biofilme mais estável, com o estabelecimento de diversos grupos de microrganismos e com boa parte do meio suporte recoberto pela biomassa. O gráfico da Figura 5.145 mostra o valor médio, máximos e mínimos para o NTK na fase 02.

Figura 5.145 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente da lagoa facultativa e filtros percoladores (fase 02)

Com o aumento da taxa de aplicação na fase 03, verifica-se um acréscimo no valor médio de NTK. Na Tabela 5.62 encontra-se o resumo estatístico.

Tabela 5.62 - Resumo estatístico NTK – Fase 03

Estatística	NTK (mg-N/L)		
	Facultativa	FpL	Fp
Núm dados	16	14	13
Mínimo	38	19	26
Máximo	90	65	49
Coef. Var	0,22	0,32	0,18
Média	60	37	36
Mediana	59	35	35
Desvio padrão	13	12	6

Nesta fase, as médias nos dois meios suportes foram semelhantes, sendo observado o valor de 37 mgNTK-N/L, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.146.

Figura 5.146 - Gráfico Box-Whiskers: NTK – Efluente da facultativa e filtros percoladores (fase 03)

Na Figura 5.147 encontram-se os gráficos (a), (b) e (c) de eficiência na redução da concentração média de NTK.

(a) Fase 01

(b) Fase 02

(c) Fase 03

Figura 5.147 - Gráfico Box-Whiskers: Eficiência na redução de NTK – Filtros percoladores

O filtro de pedra apresentou eficiência na redução da concentração de NTK maior que o filtro de plástico durante a fase 01. Nesta fase, obteve-se uma eficiência média de 60% no filtro de pedra e 40% no filtro preenchido com anel plástico. Embora o anel plástico apresente uma área superficial específica superior ao leito de brita, a rugosidade da brita pode contribuir de maneira positiva na formação do biofilme nos estágios iniciais de funcionamento.

Na fase 02, mesmo com o aumento da taxa de aplicação superficial de DBO e NTK, o filtro de pedra manteve sua remoção média na ordem de 60%. No filtro de plástico, verifica-se um aumento significativo no valor da concentração média, passando de 40% para 60% na fase 02. Como as taxas de aplicação na fase 02 do filtro de plástico foram semelhantes ao que foi imposto na fase 01, este acréscimo de eficiência pode ser creditado ao processo de formação de biofilme mais estável ao longo do tempo.

As eficiências, praticamente, se mantiveram constantes com as taxas aplicadas durante a fase 01 e 02. Acima de 0,3 KgDBO/m²d o filtro percolador apresentou redução na eficiência de remoção de NTK.

Na legislação brasileira não existe um limite direto para o lançamento do NTK, apenas a fração que está associada ao nitrogênio amoniacal.

5.2.4.3 Monitoramento do nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato - Fases 01, 02, 03

Na figura 5.148 encontram-se os gráficos Box-Whiskers relativos às concentrações de (a) nitrogênio amoniacal, (b) nitrito, (c) nitrato durante a fase 01. As concentrações médias de nitrogênio amoniacal no efluente dos dois meios suportes empregados foram de 15 mgNH₃-N/L para o anel plástico e 10 mgNH₃-N/L para o meio suporte de pedra. A Tabela 5.63 mostra o resumo estatístico para estes parâmetros.

Tabela 5.63 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato – Fase 01

Estatística	N.Amoniacal (mg-N/L)			Nitrito (mg-N/L)		Nitrato (mg-N/L)	
	Facultativa	FpL	Fp	FpL	Fp	FpL	Fp
Núm dados	26	26	26	16	16	14	14
Mínimo	24,1	1,7	0,0	8,7	2,0	0,0	0,2
Máximo	40,9	34,7	27,4	32,9	16,5	68,1	74,1
Coef. Var	0,12	0,53	0,9	0,49	0,64	2,36	1,2
Média	33,7	15,6	7,9	14,9	6,9	8,7	16,2
Mediana	33,3	17,4	5,6	11,4	5,4	0,4	15,4
Desvio padrão	4,2	8,3	7,1	7,3	4,4	20,6	19,4

Foi observado o valor máximo de 35 mgNH₃/L no filtro preenchido com anel plástico. O meio suporte de pedra produziu um efluente com concentrações menores de nitrogênio amoniacal em comparação com o meio suporte de plástico. Com uma taxa de aplicação superficial média de 0,20 kgDBO/m²d o filtro atendeu ao que estabelece Resolução CONAMA 357/2005, que estipula o padrão de lançamento como sendo de 20 mgNH₃-N/L, temporariamente suspenso pela Resolução CONAMA 397/2008.

Figura 5.148: Gráfico Box-Whiskers – Nitrogênio Amoniacal, nitrito e nitrato – Filtros percoladores (Fase 01)

Entretanto, o gráfico (b) na Figura 5.148 mostra concentrações significativas de nitrito no efluente do filtro para o meio suporte de brita e anel plástico. As concentrações médias foram de $15 \text{ mgNO}_2^- \text{-N/L}$ e $7 \text{ mgNO}_2^- \text{-N/L}$. A resolução CONAMA 357/2005 apesar de não estabelecer um padrão de lançamento para nitrito e nitrato, estes se constituem em parâmetros de qualidade de água nos corpos receptores. Para rios e lagos de classe III, a legislação impõe um limite de concentração de 1 mgN/L para o nitrito e 10 mgN/L para o nitrato.

Philips et al. (2002) argumentam no seu trabalho que, sob condições normais, a oxidação da amônia e nitrito, ocorrem simultaneamente com taxas de oxidação semelhantes, e acontecendo no mesmo espaço físico.

Como as bactérias nitrificantes são organismos reconhecidamente sensíveis às condições ambientais, a taxa de oxidação simultânea entre as bactérias oxidadoras de amônia e as oxidadoras de nitrito pode facilmente ser perturbada por estas condições (PHILIPS et al., 2002)

O gráfico (c) da Figura 5.148 mostra que houve formação de nitrato. Entretanto, o processo de nitratação não foi completo, ou seja, a nitrificação foi apenas parcial. Este fenômeno de acúmulo de nitrito tem sua origem em diversos fatores abióticos tais como: temperatura, pH, concentração de NH_3 (pH acima de 8), concentração de ácido nitroso, entre outros relatados na revisão bibliográfica.

A concentração média de nitrato foi de 8,7 mgNO_3^- -N/L no efluente do filtro com enchimento de anel plástico e 18 mgNO_3^- -N/L no efluente do filtro preenchido com brita. Alguns dados foram anômalos devido a erros experimentais. Nas primeiras semanas, para mensurar a quantidade de nitrato, foi utilizado o método que emprega eletrodo de íon seletivo. Entretanto, este se demonstrou inadequado para efluente com concentrações significativas de sólidos. Sendo assim, a mensuração do nitrato passou a ser realizada utilizando um sistema de análise por injeção em fluxo (FIA).

Na fase 02, o aumento na taxa de aplicação não ocasionou alteração nas concentrações médias de nitrogênio em relação ao que foi obtido na fase 01. A estatística básica com relação ao nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato encontra-se na Tabela 5.64.

Tabela 5.64 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato – Fase 02

Estatística	N.Amoniacal (mg-N/L)			Nitrito (mg-N/L)		Nitrato (mg-N/L)	
	Facultativa	FpL	Fp	FpL	Fp	FpL	Fp
Núm dados	28	28	28	28	28	16	17
Mínimo	30,2	0,0	0,0	2,3	0,8	4,3	5,4
Máximo	50,4	35,3	23,0	19,9	18,3	33,2	38,2
Coef. Var	0,13	0,65	0,64	0,42	0,67	0,61	0,48
Média	38,9	14,3	10,8	9,2	6,7	12,7	15,8
Mediana	38,6	15,1	12,1	8,2	5,8	10,6	14,5
Desvio padrão	5,1	9,2	6,9	3,9	4,5	7,8	7,5

As concentrações médias ficaram abaixo de 20 mgNH_3 -N/L em ambos os filtros (brita e anel plástico). No filtro preenchido com anel plástico, a média foi de 14,3 mgNH_3 -N/L contra 10,8 mgNH_3 -N/L no filtro preenchido com brita. Os resultados

referentes ao nitrogênio amoniacal estão representados no gráfico da Figura 5.149 (a).

Na fase 02, os dados revelam uma presença significativa de nitrito no efluente do filtro percolador, sendo observadas concentrações maiores no filtro preenchido com anel plástico. As médias foram de 9 mgNO₂⁻-N/L e 7 mgNO₂⁻-N/L nos filtros contendo anel plástico e no preenchido com brita, respectivamente.

No gráfico da Figura 149 (c) verifica-se a presença de nitrato no efluente dos filtros, demonstrando a ocorrência de uma nitrificação parcial, assim como ocorreu na fase 01. As médias de nitrato foram 13 mgNO₃⁻-N/L no efluente do filtro com anel plástico e 16 mgNO₃⁻-N/L no filtro contendo brita.

(a) N. Amoniacal

(b) Nitrito

(c) Nitrato

Figura 5.149: Gráfico Box-Whiskers – Nitrogênio Amoniacal, nitrito e nitrato – Filtros percoladores (Fase 02)

Com uma taxa de aplicação na faixa de 0,6 a 0,7 kgDBO/m²d, os filtros começaram a não atender, em termos de concentração do nitrogênio amoniacal, o antigo limite de lançamento proposto pela Resolução CONAMA 357/2005. A concentração média, em ambos os filtros, ficou em torno de 20 mgNH₃-N/L, conforme pode ser visto no gráfico da Figura 5.150 (a).

Figura 5.150: Gráfico Box-Whiskers – Nitrogênio Amoniacal, nitrito e nitrato – Filtros percoladores (Fase 03)

Até mesmo a nitrificação parcial foi reduzida com o aumento da taxa de aplicação superficial de DBO. O efeito de acúmulo de nitrito ainda persistiu nessa fase. As concentrações médias foram para ambos os filtros em torno de 6 mgNO₂/L. As concentrações de nitrato também foram reduzidas quando comparadas com as obtidas na fase 02. A concentração média de nitrato no efluente ficou situada em

torno de 8 mgNO₃⁻/L em ambos os filtros.

Para a taxa de aplicação adotada na fase 03, excluindo o efeito de acúmulo de nitrito, verifica-se que a nitrificação ficaria comprometida podendo, inclusive, deixar de ocorrer para taxas superiores a essa. A Tabela 5.65 apresenta a estatística básica para o nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato.

Tabela 5.65 - Resumo estatístico nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato – Fase 03

Estatística	N.Amoniacal (mg-N/L)			Nitrito (mg-N/L)		Nitrato (mg-N/L)	
	Facultativa	FpL	Fp	FpL	Fp	FpL	Fp
Núm dados	18	16	16	16	16	16	16
Mínimo	30,8	11,2	3,9	2,0	2,7	0,0	0,4
Máximo	48,7	35,3	29,2	14,2	11,9	17,5	19,7
Coef. Var	0,12	0,34	0,32	0,53	0,49	0,75	0,66
Média	38	20,2	18,7	6,4	6,2	7,6	8,6
Mediana	36,8	18,7	19,3	6,7	5,5	6,5	6,2
Desvio padrão	4,7	6,9	5,9	3,4	3	5,8	5,7

Pelos gráficos da Figura 5.151, que mostram as eficiências médias na redução da concentração do nitrogênio amoniacal nos filtros percoladores, para os dois materiais de enchimento, verifica-se que o filtro preenchido com brita apresentou valores percentuais maiores do que o filtro contendo anel plástico. Entretanto, na fase 03, as médias foram semelhantes e a dispersão dos dados não permite julgar se houve diferenças para os dois materiais utilizados como meio suporte.

Figura 5.151: Gráfico Box-Whiskers - Eficiência na redução de nitrogênio amoniacal – Filtros percoladores

Na fase 01 a eficiência média foi de 59% no filtro com anel plástico ocorrendo valores máximos de 98%. A média no filtro preenchido com brita foi de 80%, sendo observado o valor máximo de 99%.

A fase 02 apresentou praticamente os mesmos valores que ocorreram na fase 01. Entretanto, a média no filtro de pedra foi ligeiramente menor, apresentando um valor de 70%. Nesta fase, o filtro de pedra foi submetido a uma taxa maior ao que foi aplicado na fase 01. No filtro de plástico, devido aos problemas apresentados pelo distribuidor, a taxa foi praticamente a mesma da fase anterior, entretanto, o valor da mediana na fase 02, foi relativamente maior quanto comparada com a obtida na fase 01. Esse comportamento pode estar relacionado ao que foi

comentado anteriormente, ou seja, após transcorrido o tempo de partida, existe o estabelecimento de uma massa aderida de microrganismos mais estável.

Safferman e Bishop, (1996, apud GEBARA, 2006), analisando qualitativamente a evolução do biofilme sobre partículas sólidas, identificaram, após um dia, pequenas quantidades de bactérias, principalmente, nas regiões protegidas do meio suporte. Após o terceiro dia, segundo o autor, o material suporte foi recoberto por um material filamentoso. A partir do quarto e oitavo dia, o material filamentoso foi substituído por grupos de bactérias na forma de bastões, aderidos à superfície através de uma camada de polissacarídeo.

A fase final de estabilização ocorre quando a produção de biofilme iguala-se à quantidade retirada pelo escoamento (TRULEAR; CHARACKLIS, 1982 apud GEBARA, 2006).

O aumento na taxa de aplicação na fase 03 ocasionou uma redução significativa na eficiência de redução da concentração do nitrogênio amoniacal.

5.2.4.4. Monitoramento do NTK, nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato - Fase 04

Para obter a taxa limite de aplicação hidráulica e superficial desejada, após a fase 03, as vazões nos filtros percoladores foram alteradas em curtos espaços de tempo até o momento em que nenhuma nitrificação fosse observada. Desta forma, a fase 04 ficou dividida em duas etapas de 30 dias. As taxas de aplicação hidráulica, baseadas na área seccional do filtro, foram de 12 m³/m².d para a primeira etapa e 17 m³/m².d para segunda. Considerando a área total do material de enchimento, as taxas de aplicação hidráulica, na primeira etapa, foram de 0,03 m³/m².d no filtro de plástico e 0,04 m³/m².d no filtro de pedra. Na segunda etapa, as taxas foram de 0,04 m³/m².d no filtro de plástico e 0,05 m³/m².d no filtro de pedra, considerando a área total do material de enchimento.

As taxas de aplicação superficial de NTK, considerando a área seccional do filtro, ficaram na faixa de 0,55 kgNTK/m².d a 0,60 kgNTK/m².d e 0,7 kgNTK/m².d a 0,8 kgNTK/m².d na primeira e segunda etapa respectivamente. Considerando a

área total do material de enchimento, as taxas de aplicação superficial de NTK, na primeira etapa, ficaram na faixa de 0,001 kgNTK/m².d a 0,002 kgNTK/m².d no filtro de plástico. No filtro de pedra, na primeira etapa, as taxas de aplicação superficial de NTK ficaram na faixa de 0,0016 kg NTK/m².d a 0,0018 kg NTK/m².d. Na segunda etapa, as taxas de aplicação superficial de NTK, no filtro de plástico, ficaram na faixa de 0,0017 kgNTK/m².d a 0,002 kgNTK/m².d e no filtro de pedra ficaram na faixa de 0,020 kgNTK/m².d a 0,0025 kg/m².d. Os gráficos (a) e (b) na Figura 5.152 contém a série de dados referentes às taxas de aplicação hidráulica e NTK.

Pode-se perceber pelo gráfico (c) da Figura 5.152, o aumento gradativo, a partir do início da primeira etapa da fase 04, nas concentrações de nitrogênio amoniacal. A concentração iniciou-se, para o filtro preenchido com brita, com o valor de 5mgNH₃-N/L, sendo verificado no final da primeira etapa o valor 14 mgNH₃-N/L. Para o filtro preenchido com anel plástico, a concentração inicial observada foi de 5mgNH₃-N/L e no final da etapa foi de 19 mgNH₃-N/L.

A partir da taxa de aplicação hidráulica próxima a 18 m³/m².d, o filtro começou a produzir um efluente com concentrações de nitrogênio amoniacal próximo de 20 mgNH₃-N/L, com a tendência de não atender mais o limite de lançamento da Resolução CONAMA 357/2005. No gráfico (c) da Figura 5.152 é possível observar, na segunda etapa da fase 04, valores próximos de 15 mgNH₃-N/L no filtro de plástico e de 5 mgNH₃-N/L no filtro de pedra. Entretanto, as concentrações no efluente da lagoa facultativa também foram menores.

No gráfico (d) da Figura 5.152 encontram-se as eficiências na redução do nitrogênio amoniacal nos filtros percoladores para os dois meios suportes empregados. Nota-se nítida tendência de redução da eficiência após o início de operação dos filtros na fase 04. Na segunda etapa verifica-se um ligeiro aumento na eficiência. Este efeito pode estar relacionado ao ganho momentâneo em função da melhora na eficiência de molhamento nos meios suportes do filtro. Após esse ganho momentâneo, o filtro volta a apresentar a tendência de perda da eficiência para a taxa de aplicação hidráulica próxima de 18 m³/m² d.

(a) Taxa de aplicação hidráulica

(b) Taxa de aplicação superficial de NTK

(c) Concentração de N. Amoniacal

(d) Eficiência de remoção

Figura 5.152 - Gráfico série de dados da fase 04: Taxa de aplicação hidráulica, superficial de NTK, concentração de N. Amoniacal e eficiência na redução de nitrogênio amoniacal – Filtros percoladores

A Figura 5.153 mostra os gráficos relativos às concentrações de nitrito (a) e nitrato (b) no filtro percolador para os dois materiais de enchimento. Nas duas etapas que compõem a fase 04 nota-se a presença de nitrito em concentrações significativas.

Na primeira etapa, ocorreram concentrações da ordem de 8 mgNO₂⁻-N/L em ambos os filtros. A partir do início da segunda etapa é verificada uma tendência de redução nas concentrações de nitrito.

Figura 5.153 - Gráfico série de dados da fase 04 – Concentrações de nitrito e nitrato – Filtros percoladores

No gráfico (b) da Figura 5.153, onde é possível ver a série de dados referentes ao nitrato, verifica-se a tendência de redução na concentração deste parâmetro, ocorrendo seu desaparecimento já no final da primeira etapa. Na segunda etapa, não foi detectado nitrato no efluente do filtro percolador durante toda a etapa, embora tenha ocorrido a presença de nitrito. Entretanto, o comportamento do gráfico aponta para a probabilidade de desaparecimento do nitrito do efluente do filtro com o decorrer do tempo, ou seja, o processo de nitrificação foi completamente

comprometido para essa taxa de aplicação.

5.2.4.5 Distribuição das formas nitrogenadas (Nitrogênio Amoniacal, Nitrito e Nitrato) ao longo da altura do filtro- Fase 02 e 03

Os gráficos (a), (b) e (c) da Figura 5.154 mostram distribuição das concentrações de nitrogênio amoniacal, nitrito e nitrato ao longo da altura do filtro percolador. Os perfis foram determinados apenas no filtro preenchido com anel plástico. No filtro contendo brita, o deslocamento das pedras acabou inutilizando os pontos intermediários de coleta.

Pelos perfis apresentados, verifica-se que a atividade das bactérias nitrificantes começa a se intensificar a partir dos 2 metros do topo do filtro. Neste caso, existe a tendência desse grupo de microrganismos estabelecer-se mais próximo à região da base do filtro. Na região superior do filtro, a presença de matéria orgânica remanescente da lagoa facultativa fornece condições para o desenvolvimento de uma comunidade heterotrófica. Esse tipo de distribuição foi relatado na literatura, conforme apresentado na pesquisa bibliográfica.

Os perfis revelam o acúmulo de nitrito ao longo do filtro percolador. Era esperado que as concentrações de nitrito fossem baixas ao longo da altura do filtro e as de nitrato aumentassem no sentido para a base. A nitrificação e a nitratação, como mencionado anteriormente, ocorrem praticamente no mesmo instante de tempo e espaço. Philips et al. (2002), relata no seu artigo que muitos pesquisadores mencionaram que grupos de bactérias oxidadoras de amônia e as oxidadoras de nitrito estão em contato umas com as outras nos flocos de lodo. Essa justaposição poderia ser extrapolada em sistemas que utilizam biomassa aderida a um meio suporte.

(a)

(b)

(c)

Figura 5.154 - Perfis das formas nitrogenadas ao longo da altura – Filtro de plástico

Qualquer distúrbio nessa organização espacial pode levar ao acúmulo de nitrito (PHILIPS et al., 2002). Poughon et al. (1999, apud PHILIPS et al., 2002) encontraram confirmação sobre o efeito do distúrbio da organização espacial, conduzindo experimentos em leitos fixos, tipicamente formados por organismos nitrificantes. Os autores observaram maiores picos de nitrito, quando mudanças nas condições de operação, produziram um rearranjo da distribuição da biomassa. Embora o autor não faça uma referência direta sobre quais são as condições de operação, tanto o pH, como temperatura e concentração de NH_3 podem encaixar-se dentro desse contexto, devendo ser levado em consideração esse grupo de parâmetros, no dimensionamento de filtros tratando efluentes de lagoas facultativas, principalmente, pelo fato do efluente de lagoas facultativas possuírem concentrações significativas de amônia, pH elevado e estarem, na maioria dos casos, localizadas em regiões de clima quente. Philips et al. (2002) não deixa de fora da discussão a questão da temperatura e a sazonalidade.

Os perfis foram levantados sob diferentes taxas de aplicação. O aumento na taxa de aplicação hidráulica não provocou alterações significativas no formato do perfil. O acréscimo da taxa pode resultar no surgimento de novas áreas preponderantemente constituídas por grupos de bactérias heterotróficas, diminuindo a camada relativa às nitrificantes. Em taxa muito baixa, é possível ocorrer nitrificação em localidades mais próximas ao topo do filtro.

5.2.4.6 Condições de operação e zonas de acúmulo de nitrito

Na Figura 5.155 observa-se a distribuição dos pontos amostrais (pH versus amônia total) da fase 01 sobre o gráfico de ocorrência de acúmulo de nitrito, nos quais estão as condições limites das zonas de inibição da nitrificação proposto por Anthonisen et al.(1976).

Durante a fase 01, uma parcela dos pontos ficou contida dentro da zona 02 de inibição da nitratação devido à concentração de NH_3 . Outra parcela ficou localizada na faixa de concentração de NH_3 (FA) formada pelos valores $\text{FA}=0,1 \text{ mg/L}$

e $FA=1,0$ mg/L. Entre estes dois limites Anthonisen et al. (1976) conclui que poderá ocorrer a inibição das nitratantes (nitrobacters) pela presença de NH_3 (FA).

Figura 5.155 - Relação entre concentração de amônia livre e ácido nitroso e inibição das nitrificantes – Filtro percolador (Fase 01)
Adaptado: Anthonisen et al. (1976)

Os gráficos das Figuras 5.156 e 5.157 mostram os pontos amostrais, da fase 02 e 03, determinados pelo par de valores de pH e nitrogênio amoniacal total sobre o diagrama operacional que descreve as faixas inibição pelo efeito da concentração de amônia livre (FA) e ácido nitroso (FNA).

Figura 5.156 - Relação entre concentração de amônia livre e ácido nitroso e inibição das nitrificantes – Filtro percolador (Fase 02)
Adaptado: Anthonisen et al. (1976)

Figura 5.157 - Relação entre concentração de amônia livre e ácido nitroso e inibição das nitrificantes – Filtro percolador (Fase 03)
Adaptado: Anthonisen et al. (1976)

Para a fase 02 e 03, verifica-se que as concentrações de nitrogênio

amoniaco total e os valores de pH na lagoa facultativa levaram o filtro percolador a operar entre a faixa de provável inibição da atividade das bactérias nitratantes, levando ao efeito de acúmulo de nitrito no sistema.

Os gráficos da Figura 5.158 mostram em detalhes a distribuição dos pontos amostrais dentro dos limites de inibição da nitratação pela amônia livre para as fases 01, 02 e 03.

As concentrações de NH_3 ficaram em todas as fases bem acima de 0,1 mg/L. Segundo Anthonisen et al. (1976), a inibição das nitratantes poderá ocorrer a partir de valores de 0,1 mg/L de NH_3 (FA).

A Figura 5.159 contém os gráficos que relacionam o pH do efluente da lagoa facultativa, que alimenta o filtro, com a fração determinada pela concentração de nitrito e a quantidade de amônia oxidada.

Figura 5.159 - Relação entre a razão de concentração de nitrito e nitrogênio amoniacal oxidado com pH afluente – Filtros percoladores

Com exceção do gráfico (c) da Figura 5.159, nos demais gráficos é possível verificar uma tendência das maiores porcentagens de nitrito em relação à amônia oxidada ocorrerem nas faixas de pH acima de 7,5. A grande dispersão dos valores apresentados durante a fase 02 em ambos os filtros não permitem verificar

qualquer tendência dos pontos amostrais, principalmente, no filtro preenchido com pedra. No gráfico (d), embora a dispersão tenha sido maior em relação aos demais gráficos (a), (b), (e) e (f), ainda assim é possível verificar certa tendência. Este comportamento, apresentado no filtro de pedra na fase 02, pode estar relacionado com a dificuldade em manter um padrão na alimentação dos filtros durante essa fase. A elaboração destes gráficos, não tem como objetivo obter uma curva de correlação, apenas tem o propósito de elucidar o possível efeito do pH sobre o acúmulo de nitrito no sistema.

A Tabela 5.66 mostra os resultados referentes à detecção do número provável de bactérias nitritantes e nitratantes durante a fase 03.

Tabela 5.66 - Concentração de nitritantes e nitratantes – Fase 03

Fase	Data	Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
		Nitritantes (NMP/100mL)	Nitratantes (NMP/100mL)	Nitritantes (NMP/100mL)	Nitratantes (NMP/100mL)
3	16/10/08	3,30E+04	4,00E+03	1,20E+04	2,00E+03
	25/06/09	1,60E+06	4,00E+04	1,60E+06	4,00E+04
	27/08/09	3,30E+03	4,00E+02	2,20E+03	4,00E+02
	22/10/09	4,00E+04	2,00E+04	6,00E+04	2,00E+01

Durante a fase 03, a concentração de bactérias nitratantes foi menor comparado com o número mais provável de nitritantes presentes em ambos materiais de enchimento. Verifica-se o valor de 20 NMP/100 mL para as nitratantes no filtro preenchido com anel plástico. Esse menor número apresentado pode influenciar nas taxas de formação de nitrito e nitrato, levando ao um desbalanceamento entre as quantidades oxidadas.

Além disso, em condições favoráveis para nitrificação, as taxas de nitratação e nitratação devem ser equivalentes. Dentro dessas condições, não deverá ser observado o acúmulo de nitrito no sistema, sendo esse praticamente oxidado a nitrato quase que instantaneamente. A presença de amônia livre, em concentrações inibitórias é capaz de alterar as taxas entre esses grupos de bactérias (nitritantes e nitratantes). Sendo assim, a taxa de formação de nitrito pode assumir uma ordem de valor mais elevada em relação à taxa de nitratação.

A presença de nitrogênio amoniacal na sua forma ionizada, também pode exercer um efeito de inibição sobre os grupos de bactérias nitrificantes, entretanto, segundo Philips et al. (2002) este efeito é menor quando comparado ao da amônia livre (NH_3).

5.2.5 Efeito do tipo de meio suporte sobre a transformação do nitrogênio amoniacal no filtro percolador.

Neste item foi verificado se existe alguma relação do tipo de meio suporte empregado nos filtros percoladores sobre o processo de nitrificação. Com exceção da quarta fase operacional, onde o objetivo era determinar a taxa limite de aplicação, adotando como critério de controle a taxa na qual a nitrificação praticamente encerrasse, as demais fases contam com número razoável de dados. Desta maneira, será adotada a hipótese de que as variáveis envolvidas nas inferências estatísticas seguem uma distribuição normal.

Apesar do grande esforço empregado para assegurar que ambos os filtros fossem submetidos à mesma taxa de aplicação hidráulica, em alguns momentos foi observado, por meio da monitoração das vazões efluentes, a ocorrência de diferentes taxas de aplicação hidráulica em cada filtro ao longo do período experimental. Este fato pode da mesma forma submeter cada filtro a diferentes taxas de aplicação superficial. Isto posto, na tentativa de assegurar uma análise segura sobre o efeito do meio suporte sobre a nitrificação, existe a necessidade de verificar se as taxas durante cada fase foram diferentes ou iguais em cada filtro.

A partir da verificação da hipótese de igualdade entre as taxas de aplicação hidráulica, mediante a aplicação do teste de comparação de duas médias considerando amostras independentes com variâncias desconhecidas e diferentes, poderá ser realizada uma discussão sobre o efeito do tipo de meio suporte utilizado sobre a transformação da amônia via nitrificação, descartando a fase em que o filtro foi submetido a taxas diferentes, eliminado, dessa maneira, esse efeito sobre a análise.

5.2.5.1. Teste de comparação de duas médias para as taxas de aplicação hidráulica considerando amostras retiradas na fase 01,02 e 03

A análise qualitativa dos percentis em torno da mediana através das observações dos gráficos das taxas de aplicação hidráulica das fases 01, 02 e 03, sugere que as variâncias ocorridas no filtro com meio suporte de plástico (Filtro de Plástico) e pedra (Filtro de Pedra) possuem valores ligeiramente diferentes. Esta observação permite a escolha do teste que envolve a comparação de médias com amostras de variâncias diferentes e desconhecidas. A partir do resumo estatístico, e assumindo que a hipótese de nulo (H_0) seja norteadada pela prerrogativa de não existir diferença significativa entre as médias da taxa de aplicação hidráulica em cada filtro, rejeitaremos H_0 se t_{obs} pertencer à região crítica. O resumo do teste com alguns parâmetros utilizados e o resultado do teste nas fases 01, 02 e 03 pode ser observado na Tabela 5.67.

Tabela 5.67 - Teste de hipótese para as taxas de aplicação hidráulica

Fase	Meio suporte	Nº Dados	Média (m^3/m^2d)	SD ² (m^3/m^2d) ²	t_{obs}	t_c	Rejeita H_0 ?
1	Anel Plástico	33	3,61	0,99	0	$\pm 2,00$	Não
	Brita	33	3,8	1,09			
2	Anel Plástico	28	4,66	2,33	-2,16	$\pm 2,00$	Sim
	Brita	28	5,79	5,44			
3	Anel Plástico	16	7,45	2,54	1,76	$\pm 2,12$	Não
	Brita	16	8,84	7,36			

Pode-se observar pela tabela 5.67 que t_{obs} nas fases 01 e 03 não pertencem à região crítica com um nível de significância de 5%, sendo, portanto, aceita a hipótese de que ambos os filtros foram na média submetidos à mesma taxa de aplicação hidráulica. Na fase 03, o valor da variância, impulsionado pela existência de 4 valores extremos, foi relativamente elevado. A tomada de decisão para a realização do teste foi pelo não descarte de nenhum dado.

Pode-se observar a rejeição da hipótese de nulo na fase 02. Mediante aos resultados apresentados pela inferência estatística, para evitar conclusões errôneas

sobre o efeito do meio suporte na transformação do nitrogênio, devido ao fato da ocorrência de taxas diferentes, a fase 02 será descartada da análise.

5.2.5.2 Comparação das eficiências no desaparecimento do nitrogênio amoniacal.

A apresentação dos dados e as discussões que estarão relacionadas ao desaparecimento da amônia pela transformação do nitrogênio amoniacal em outras formas nitrogenadas, como nitrito e nitrato, serão conduzidas baseadas na análise das eficiências, apresentadas em termos percentuais, oriundas do monitoramento das concentrações de nitrogênio amoniacal afluentes e efluentes do filtro em ambos os materiais suportes. O objetivo é verificar se houve influência do tipo de meio suporte sobre a eficiência na redução do nitrogênio amoniacal.

A Figura 5.160 mostra os gráficos Box- Whiskers relativos aos valores percentuais das eficiências no desaparecimento do nitrogênio amoniacal durante a fase 01 e 03

Figura 5.160 - Eficiência de redução do nitrogênio amoniacal (a) fase 01 e (b) fase 02 – Filtro percolador

Durante a fase 01 a eficiência, para o meio suporte constituído de anéis de plásticos, apresentou um valor médio de 55%, sendo observado um valor máximo de 95% e mínimo de 3,1%. Para o meio suporte formado de brita, a média de eficiência foi de 78%, sendo registrado um valor máximo de 100% e mínimo de 23,4%. A princípio, a análise do gráfico Box-Whiskers na fase 01, sugere que, para as taxas aplicadas durante a fase 01, o filtro constituído de brita apresentou uma eficiência melhor em relação aos anéis de plásticos.

O gráfico (b) da Figura 5.160 revela que, durante a fase 03, as eficiências foram ligeiramente maiores no filtro preenchido com pedra britada, sendo obtidos valores médios de 50% com meio suporte de brita contra 45% no anel plástico. Durante essa fase, observou-se a ocorrência de valores máximos de 87% e mínimo de 13% no meio suporte de brita e máximo de 69% e mínimo de 6,4% no meio suporte constituído de anel plástico.

Comparando a fase 03 com a fase 01, pode ser observado que as diferenças entre os valores médios apresentados com meio suporte de brita e anel plástico foram menores na fase 03. Embora na fase 03 o filtro esteja operando com uma taxa de aplicação maior ao que foi aplicado na fase 01, era esperado que, nas

taxas menores ocorressem as menores diferenças, em termos de eficiência, entre meio suporte de brita e anel plástico. Segundo Metcalf e Eddy Inc. (2004) em baixas taxas de aplicação, os filtros preenchidos com pedra e material plástico deverão apresentar praticamente a mesma eficiência.

Este tipo de comportamento pode estar relacionado, embora não monitorado, com o aumento da eficiência de molhamento no filtro preenchido com anel plástico no momento em que a taxa de aplicação foi aumentada. Em taxas menores pode ocorrer regiões onde o efluente não percolou e, conseqüentemente, locais onde o biofilme não se desenvolveu.

Na fase 01, os filtros poderiam estar sob a influência do fenômeno de desprendimento do biofilme, levando grande parte dos microrganismos para fora do sistema. Entretanto, resgatando o que foi apresentado nos gráficos das Figuras 5.108 e 5.110, do item 5.2.1.3, que tratam da análise estatística em torno da concentração de sólidos totais e suspensos, verificam-se que não há diferenças significativas entre as concentrações efluentes em ambos os filtros durante a fase 01. Fazendo uma analogia entre a concentração de sólido e o fenômeno de desprendimento de biofilme, não poderia ser levantada a hipótese que este fenômeno tenha ocorrido, mais acentuado durante a fase 01, no filtro contendo anel plástico, uma vez que as concentrações efluentes de sólidos foram semelhantes durante a fase 01.

A Tabela 5.68 apresenta os dados e valores obtidos no teste de médias que foram utilizados para verificar se houve diferença significativa a um nível de confiança de 5% entre os materiais de enchimento, no que diz respeito às eficiências.

Tabela 5.68 - Teste de hipótese para as eficiências

Fase	Meio suporte	Nº Dados	Média (%)	SD ² (m ³ /m ² d) ²	t _{obs}	t _c	Rejeita H ₀ ?
1	Anel Plástico	26	55	474	-4,14 ± 2,00		Sim
	Brita	26	78	347			
3	Anel Plástico	16	45	418	-0,76 ± 2,12		Não
	Brita	16	50	277			

Pela Tabela 5.68 observa-se que t_{obs} na fase 01 pertence à região crítica com um nível de significância de 5%, sendo, portanto, rejeitada a hipótese de nulo. Entretanto, o teste de médias durante a fase 03 apresentou a aceitação da hipótese de nulo, sendo, portanto, iguais às eficiências em ambos os meios suportes para uma taxa de aplicação hidráulica média de $8 \text{ m}^3/\text{m}^2\text{d}$ para os dois filtros.

A rejeição da hipótese de que as médias das taxas de aplicação são iguais para os dois meios suportes na fase 01, permite verificar que o preenchimento de pedra foi mais eficiente, em termos de redução da concentração de nitrogênio amoniacal, que o filtro preenchido com anel plástico, para as taxas de aplicação hidráulicas empregadas durante a fase 01. Para as taxas altas, esta diferença parece não existir, entretanto, como comentado anteriormente, esse comportamento pode estar relacionado com o aumento da eficiência de molhamento associado ao aumento da taxa de aplicação hidráulica. Em condições de semelhança hidráulica os anéis plásticos deveriam apresentar uma eficiência maior devido à maior área superficial específica disponível para o desenvolvimento do biofilme.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A partir da coleta e análise dos dados, em um campo experimental, composto por duas unidades complementares em escala piloto, filtros percoladores e lagoas rasas, cujo objetivo é o pós tratamento de efluente de lagoas facultativas visando à remoção do nitrogênio amoniacal, faz-se as seguintes considerações finais:

Para o tratamento complementar utilizando lagoas rasas.

- Foi possível reduzir as concentrações de nitrogênio amoniacal abaixo do limite de 20 mg/L para lançamento, estabelecida pela Resolução CONAMA 357/2005, com tempos de detenção a partir de 5 dias. A lagoa de 0,5 m, exibiu concentração média de nitrogênio amoniacal de 17 mg/L com taxas de aplicação superficial de DBO de 0,005 kgDBO/m².d e operando com tempo de detenção de 5 dias. Em profundidades maiores que 0,5 m, serão necessários tempos acima de 10 dias para produzir efluentes com concentrações abaixo de 20 mg/L. A lagoa de 1,0 m de profundidade começou a atender ao limite de lançamento com taxas na ordem de 0,005 kgDBO/m².d e com tempos de detenção de 10 dias.
- As lagoas mais rasas são mais eficientes na redução da concentração de nitrogênio amoniacal. Para todas as taxas aplicadas nas duas lagoas piloto, a lagoa L2 com 0,5 metros sempre apresentou concentrações efluentes de nitrogênio amoniacal menor do que foi observado na lagoa L1 de 1,0 m de profundidade. Desta forma, as remoções mostram-se sensíveis à profundidade da lagoa.
- As remoções também mostraram-se sensíveis às condições ambientais nas lagoas pilotos. As concentrações de nitrogênio amoniacal no efluente das lagoas decresceram à medida que as temperaturas se elevaram. Este fato, foi observado em relação ao pH e ao oxigênio dissolvido. As

concentrações de nitrogênio amoniacal decresceram, ao passo que o pH e o oxigênio dissolvido, aumentavam.

- A suposição de que o processo de volatilização é o fator predominante na remoção do nitrogênio mostrou-se aceitável. O simples balanço de massa em torno do nitrogênio amoniacal revelou que a volatilização correspondeu de 50% a 70% do total de nitrogênio amoniacal. Para tempos de detenção abaixo de 8 dias, as maiores frações estavam associadas ao nitrogênio incorporado à biomassa e que sai com o efluente.
- A variação nos tempos de detenção e nas taxas de aplicação superficial permitiram estabelecer uma relação entre as taxas de aplicação superficial de NTK e DBO e a fração de nitrogênio amoniacal removido. A variação da profundidade nas lagoas piloto permitiu extrapolar essa relação para duas profundidades. O modelo de Yánes, para as taxas adotadas durante a pesquisa, superestimou as frações de remoção na lagoa L2 de 0,5 metros. Para a lagoa L1 de 1,0 m de profundidade, o modelo de Yánes superestimou as frações para as menores taxas de aplicação. Para as taxas maiores, o modelo tende a subestimar as frações.
- O comportamento das lagoas frente às remoções de matéria orgânica ficou dentro do esperado para lagoas complementares. Os gradientes de concentrações de matéria orgânica tendem a diminuir à medida que se percorre um sistema de série de lagoas. Desta forma, considerando o modelo cinético, que descreve a taxa de utilização do substrato, verifica-se que as taxas reduzem à medida que esse gradiente decresce. As concentrações de DBO e DQO total, foram influenciadas pela fração de material orgânico associada a biomassa algal, sendo encontrados valores de concentração efluente das pilotos, maiores que o efluente da própria facultativa. As concentrações médias de clorofila-a foram maiores no efluente das duas pilotos.

- O comportamento hidráulico das lagoas tendeu a reatores de mistura completa. O ensaio de caracterização hidráulica revelou um número de dispersão elevado na lagoa complementar L1. Os valores calculados da densidade de coliformes totais e E.coli sob a consideração de regime de mistura completa aproximaram-se dos valores amostrais obtidos. O perfil de nitrogênio amoniacal ao longo do comprimento das lagoas mostrou um padrão de distribuição que aproxima as lagoas pilotos de reatores de mistura completa. A estratificação e o comportamento hidráulico tiveram uma influência grande nas densidades de E.coli e coliformes totais, distanciando essas lagoas do atendimento de múltiplas qualidades.

Para o tratamento complementar utilizando filtros percoladores.

- Os filtros percoladores, para os dois materiais de enchimentos adotados, apresentaram reduções na concentração de nitrogênio amoniacal até valores abaixo de 20 mg/L quando foram submetidos a taxa de aplicação volumétrica de DBO de 0,06 kgDBO/m³.d. A partir de 0,20 kgDBO/m³.d os filtros começaram a exibir queda na eficiência de redução da concentração de nitrogênio amoniacal, sendo observados valores muito próximos ao limite de lançamento imposto pela Resolução CONAMA 357/2005 DE 20 mg/L.
- As eficiências na redução do nitrogênio amoniacal, em termos percentuais, decresceram com o aumento das taxas de aplicação. No filtro de pedra a eficiência média de redução foi de 80% para uma taxa média volumétrica de DBO de 0,06 kgDBO/m³.d e no filtro preenchido com anel plástico, a remoção média foi de 60% para essa mesma taxa. Para uma taxa de aplicação volumétrica de 0,20 kgDBO/m³.d as eficiências foram de 60% no filtro de pedra e 40% no filtro de plástico.
- Para as taxas de aplicação hidráulica acima de 18 m³/m².d e 0,70 kgDBO/m².d verificou-se o encerramento do processo de nitrificação nos filtros para ambos os materiais de enchimento. Acima dessas taxas, não

foi detectada a presença de nitrato no efluente dos filtros e as baixas concentrações de nitrito apresentaram a tendência de desaparecimento. No início da fase 04, foram observadas concentrações de $8 \text{ mgNO}_2\text{-N/L}$ em ambos os filtros, decaindo para $6 \text{ mgNO}_2\text{-N/L}$ e no final da etapa 4 atingiu o valor de $4 \text{ mgNO}_2\text{-N/L}$, com uma taxa de aplicação superficial de DBO de $1,2 \text{ kgDBO/m}^2\text{.d}$. Conclui-se que, para essas taxas, o processo de nitrificação nos filtros deixa de ocorrer.

- Para todas as taxas aplicadas durante a fase experimental, verificou-se a presença de nitrito no efluente dos filtros em concentrações significativas. As concentrações médias ficaram na faixa de 6 a $15 \text{ mgNO}_2\text{-N/L}$. Este efeito de “acúmulo de nitrito” ou inibição da nitratação está relacionado às condições ambientais nos filtros como pH temperatura e a concentração de NH_3 no meio líquido. Os valores de temperatura, pH e concentração de NH_3 , ocorridos em todas as fases, levaram os filtros a operarem na faixa de provável acúmulo de nitrito devido à presença de NH_3 em concentrações capazes de provocar a inibição da nitratação.
- O diagrama proposto por Anthonisen et al (1976) que relaciona concentração de amônia livre, ácido nitroso e pH com a inibição das nitrificantes mostrou que a maioria dos pontos amostrais ficaram situados na faixa de inibição da nitratação, devido à presença de NH_3 .
- A fração entre a quantidade de nitrito no efluente dos filtros e a quantidade de nitrogênio amoniacal oxidado em função do pH, mostrou que as maiores frações tendem a ocorrer com mais frequência em pH mais elevado. Desta forma os valores de pH e a concentração de nitrogênio amoniacal nos efluentes das lagoas facultativas tornam-se parâmetros importantes no dimensionamento de filtros percoladores no qual se deseja a nitrificação.

- Os testes para determinar as densidades de nitritantes e nitratantes, demonstraram que nos filtros, a densidade de nitratantes sempre foram menores em relação às nitratantes e isto causa um desbalanceamento entre a taxa de nitrificação e nitratação, provocando a presença de nitrito nos efluente dos sistemas em concentrações significativas.
- O filtro preenchido com pedra britada mostrou-se mais eficiente na redução da concentração de nitrogênio amoniacal do que o filtro preenchido com anel plástico para as baixas taxas. Já com o aumento das taxas de aplicação, esta diferença não foi significativa, como foi demonstrado no teste de médias. Entretanto, este comportamento poderia estar relacionado com o aumento da eficiência de molhamento em decorrência do aumento das taxas de aplicação hidráulica.
- Com o estabelecimento de uma nitrificação parcial, não foi possível relacionar de maneira efetiva as remoções de nitrogênio amoniacal com as taxas de aplicação superficial e volumétrica.

7 CONCLUSÕES

- A lagoa de 0,5 m foi mais eficiente na redução da concentração de nitrogênio amoniacal do que a lagoa de 1,0m, demonstrando que lagoas mais rasas são mais adequadas para remover nitrogênio amoniacal.
- Para uma mesma taxa de aplicação de DBO, e mesmo DTH, as lagoas de 0,5m apresentaram remoções superiores em relação à remoção obtida na lagoa L1, permitindo concluir que, para o mesmo TDH e taxas de aplicação, as lagoas mais rasas serão mais indicadas, quando o foco é a remoção de nitrogênio amoniacal.
- O aumento da profundidade das lagoas, não resultará em ganho de desempenho, frente às remoções de nitrogênio amoniacal, em lagoas operando como unidade de pós-tratamento de efluente de lagoas facultativas.
- As lagoas complementares apresentaram baixas eficiências na remoção adicional de DBO, DQO, sólidos, coliformes totais e *E.coli*.
- Para enquadrar o efluente das lagoas complementares, no que diz respeito à remoção da DBO, DQO, sólidos e patógenos, seria necessária uma etapa posterior de tratamento para enquadrar esses efluentes dentro de uma perspectiva de qualidades múltiplas, o que poderia aumentar o custo de implantação.
- Os filtros percoladores, operando como unidades para pós-tratamento de efluente de lagoas, não demonstraram ser uma alternativa viável, uma vez que apresentaram baixas eficiências na remoção adicional de DBO, DQO, sólidos e clorofila-a, mesmo operando como filtros de baixa taxa.
- Os filtros apenas foram capazes de reduzir o nitrogênio amoniacal abaixo de 20 mg/L, quando operaram como unidades de baixa taxa. Desta forma, os custos de implantação tornam estes dispositivos numa alternativa pouco atrativa, uma vez que as unidades resultariam muito grandes.
- As condições ambientais no município de Lins, tais como: temperatura e pH, foram favoráveis nas lagoas complementares, uma vez que as remoções de nitrogênio amoniacal, mostram-se sensíveis a estes dois parâmetros.

Entretanto, no caso dos filtros, a combinação de elevadas temperaturas, o pH e a concentração de nitrogênio amoniacal no efluente da lagoa facultativa, ocasionou a inibição da nitratação e a presença de concentrações significativas de nitrito no efluente dos filtros. Isto posto, pode-se concluir que os filtros percoladores não são adequados para o pós-tratamento de efluentes de lagoa facultativa, onde as concentrações de nitrogênio amoniacal, pH e temperatura fossem semelhantes ao caso de Lins.

- No caso das lagoas, caso seja possível remover a clorofila-a, através de processos físico-químicos, com custos relativamente baixos, e tomar os devidos cuidados em relação aos aspectos hidráulicos, adequando às densidades de patógenos do efluente dessas unidades aos valores estabelecidos pela legislação, à adoção dessas unidades complementares de lagoa, poderiam ser mais adequadas do que os filtros percoladores.

8 RECOMENDAÇÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.

Para elaborar um modelo racional de remoção de nitrogênio em lagoas rasas, é necessário entender as principais rotas de transformação do nitrogênio no interior das lagoas. Desta maneira, um futuro projeto deve focar seus objetivos nas determinações em campo, nas parcelas de nitrogênio associado à biomassa, à parcela sedimentada e à fração volatilizada. Além disso, como as lagoas mostraram-se sensíveis às condições ambientais, como temperatura e pH, seria razoável estabelecer uma relação entre intensidade luminosa e fluxo de calor com as atividades fotossintéticas.

As questões de hidrodinâmica, também necessitam de maiores delineamentos, verificando o posicionamento das lagoas em função do vento dominante e sua participação no grau de mistura em lagoas rasas. Além disso, necessita de ver o efeito do posicionamento das chicanas dentro das lagoas.

Para os filtros percoladores, poderia aprofundar as discussões sobre o efeito da recirculação do efluente dos filtros sobre o processo de inibição da nitratação.

Obter um quadro mais preciso da distribuição do nitrogênio ao longo da altura dos filtros.

Fazer uma análise qualitativa das diversas comunidades de microrganismos existentes no biofilme e sua distribuição espacial ao longo da altura do filtro. Além disso, observar as possíveis alterações dessas comunidades frente à alteração das taxas de aplicação.

9 REFERÊNCIAS

ALMEIDA, P.G.S. **Efeito de diferentes tipos de meio suporte no desempenho de Filtros biológicos percoladores aplicados ao pós-tratamento de efluentes de reatores UASB, com ênfase na nitrificação.** 2007. 156p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2007.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). Standard methods for the examination of water and wastewater. 25.ed., Washington, 2005.

ANTHONISEN, A. C. et al. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. **Journal WPCF**, v.48, n.5, p.835-852, 1976.

ASSUNÇÃO, F. A. L. **Estudo da remoção de nitrogênio, com ênfase na volatilização de amônia, em lagoas de polimento de efluentes de reatores UASB tratando esgotos urbanos de Belo Horizonte/MG.** 2009. 79p.. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerias. Belo Horizonte, 2009.

BASTOS, R. K. X. **Tratamento e utilização de esgotos sanitários para produção animal Sub-Projeto 1:** Tratamento de esgotos sanitários em lagoas de polimento para a utilização o efluente em irrigação e piscicultura: PROSAB, 2006. (Relatório Técnico).

BERAN, B.; KARGI F. A dynamic mathematical model for wastewater stabilization ponds. **Ecological Modelling**, n. 181, p. 39-57, 2005.

BIESTERFELD, S. et al. Quantification of denitrification potential in carbonaceous trinckling filters. **Water Research**, v. 37, p. 4011-4017, 2003.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução 357, de 17 de março de 2005.

CONAMA - CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE. Resolução 397, de 03 de Abril de 2008.

EVANGELISTA, N.; von SPERLING, M.; CHERNICHARO, C. A.L. Modelagem matemática da remoção bacteriana e de ovos de helmintos em um sistema de reator UASB/ lagoa facultativa, em escala real. In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 28°, 2002, Cancún. **Anais.** Cancún, 2002.

FERRARA, R. A.; AVCI, C. B. Nitrogen dynamics in waste stabilization ponds. **J. Wat. Pollut. Contr. Fed**, v. 54, n. 4, p.361-369, 1982.

FRANCHIN, A.C.; POVINELLI, J. Remoção de matéria orgânica e nitrogênio em filtros percoladores com diferentes materiais suportes- brita e serragem de couro . In: Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 30°, 2006, Punta del Este. **Anais...** Punta del Este, 2006.

FOGLER H. S. **Elementos de engenharia das Reações Químicas**. 3 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2002. 892 p.

FONSECA, M. F. **Remoção de nitrogênio amoniacal em filtro biológico percolador pós tratado efluente de reator UASB**. 2009. 123p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Rio de Janeiro. Rio de Janeiro, 2009.

GEBARA, D. **Desempenho de um reator aeróbio de leito fluidizado no tratamento de esgoto sanitário**. 2006. 399p. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo. São Paulo, 2006.

GIESEKE, A . et al. Simultaneous P and N removal in a sequencing batch biofilm reactor: insights from reactor and microscale investigations. **Water Research**, v. 36, p. 501-509, 2002.

GUJER, W.; BOLLER, M. Nitrification in tertiary trickling filters followed by deep-bed filters. **Wat. Res**, v. 20, n. 11, p. 1363-1373, 1986a.

GUJER, W.; BOLLER, M. Design of a nitrifying tertiary trickling filter based on theoretical concepts. **Wat. Res**, v. 20, p. 1353-1361, 1986b.

HARRISSON, R. J.; DAIGGER, G.T. A comparison of trickling filter media. **Journal of Water Pollution Control Federation**. v. 59, n. 7, p.679-685, 1987.

HEIJNEN, J. et al. Formation of biofilms on small suspended particles in air-lift reactors. **Water Science & Technology**, v. 26, n. 9/10, p. 2015-2019, 1992.

IWAI, S.; KITAO, T. **Wastewater treatment with microbial films**. USA: Ed. Technomic Publishing Company, Inc. Lancaster, 1994. 183 p.

KELLNER, E.; PIRES, E. C. P. **Lagoas de estabilização: Projeto e Operação**. 2 ed. Rio de Janeiro: ABES, 1998. 244p.

KELLNER, E. et al. Influência da estratificação térmica no volume útil e no comportamento hidrodinâmico de lagoa de estabilização: determinação experimental e teórica. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 14, n. 1, p. 129-138, 2009.

LAI, P. C. C.; LAM, P. K. S. Major pathways for nitrogen in waste water stabilization ponds. **Water Air and Soil Pollution**, n. 94, p. 125-136, 1997.

LEVENSPIEL, O. **Engenharia das reações químicas**. São Paulo: Editora Edgard Blucher Ltda, 1972. v. 2.

MAGALHÃES, M.N.; LIMA, A.C.P. **Noções de probabilidade e estatística**. 6ª ed. São Paulo: Edusp, 2008. 395p.

MARA, D. D.; PEARSON, H. W. Artificial freshwater environments: waste stabilization ponds. In: **Biotechnology**. Editora W. Schoernborn, 1986. p. 177-206.

Mara, D. **Domestic wastewater treatment in developing countries**. 1ª ed. London: Earthscan, 2004. 293p.

MAYNARD, H. E.; OUKI, S. K.; WILLIAMS, S. C. Tertiary lagoons: A review of removal mechanisms e performance. **Wat. Res.**, v. 33, n. 1, p. 1-13, 1999.

MEIRING, P. G. J. et al. Removal of Algal Biomass and Final Treatment of Oxidation Pond Effluents by the PETRO Process. In: IAWQ International Specialist Conference and Workshop on Waste Stabilisation Ponds Technology and Applications. 3 ed., 1995. João Pessoa. **Anais**. João Pessoa, 1995. p. 23-29.

METCALF & EDDY INC. **Wastewater Engineering**: Treatment and Reuse. 4 ed. Boston: McGraw-Hill, 2004. 1819 p.

MONTEGGIA, L.O.; TESSELE, F. **Remoção de algas e fósforo de efluentes de lagoas de alta taxa**. In: Pós-tratamento de efluentes de reatores aneróbios: Coletânea de trabalhos técnicos. v. 2. PROSAB, Belo Horizonte, 2001.

MORENO, M.D.; MEDINA, M. A.; MORENO, J.; SOLER, A.; SAEZ, J. Modeling the performance of deep waste stabilization ponds. **Water Resources Bulletin**, v. 24, n. 2, p.377-387, 1988.

MUTTAMARA, S.; PUETPAIBOON, U. Nitrogen Removal in baffled waste stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech**, v. 33, n. 7, p. 173-181, 1996.

NICOLELLA, C.; VAN LOOSDRECHT, M.C.M; HEIJNEN, J.J. Wastewater treatment with particulate biofilm reactors. **Journal of Biotechnology**, v. 80, p. 1-33, 2000.

NIJHOF, M.; KLAPWIJK, A. Diffusional transport mechanisms and biofilm nitrification characteristics influencing nitrite levels in nitrifying trickling filter effluents. **Wat. Res.**, v. 29, n. 10, p. 2287-2292, 1995

OLIVEIRA, F.F.; GONÇALVES, R.F. Principais tecnologias empregadas no polimento do efluente de lagoa de estabilização . In: Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária, 20º, 1999, Rio de Janeiro. **Anais**. Rio de Janeiro, 1999.

OLIVEIRA, S. M. A. C.; von SPERLING, M. Avaliação de 166 ETEs em operação no país, Compreendendo diversas tecnologias. Parte I - Análise de desempenho. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 347-357, 2005.

PANO, A.; MIDDLEBROOKS, E. J. Ammonia nitrogen removal in facultative wastewater Stabilization Ponds. **Journal WPCF**, v. 54, n. 4, p 344-351, 1982.

PARKER, D.S.; RICHARDS, T. Nitrification in trickling filters. **Journal WPCF**, v. 58, n. 9, p. 896-901, 1986.

PATRICK, C. C. L.; PAUL, K. S. L.; AVCI, C. B. Major pathways for nitrogen removal in wastewater stabilization ponds. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 94, p.125-136, 1997

PEARSON, H.W.; MARA, DD.; MILLS, S.W.; SMALLMAN, D.J. Physico-chemical parameters influencing faecal bacterial survival in waste stabilization ponds. **Wat. Sci. Tech.**, v. 19, n. 12, p.145-152, 1987.

PHILIPS, S. et al. Origin, causes and effects of increased nitrite concentrations in aquatic environments. **Environmental Science & Bio/Technology**, p.115-141, 2002.

PRESSINOTTI, F.; KRAMPE, J. Avaliação de um filtro percolador alemão para tratamento de esgoto doméstico em escala piloto sob temperaturas tropicais. In: Simpósio Nordeste de Saneamento Ambiental, I, 2002, **Anais do evento**, 2002.

REED, S. C. Nitrogen removal in wastewater stabilization ponds. **J. Wat. Pollut. Contr. Fed.** v. 57, n. 1, p.39-45, 1985.

RIVAS, A. Método en columna, una nueva alternativa para el muestreo de lagunas de estabilización. In: Congreso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, XXVIII, 2002, Cancún. **Anais**. Cancún, 2002.

SENZIA, M. A.; MAYO, A. W.; MBWETTE, T. S. A.; KATIMA, J. H. Y.; JØRGENSEN, S. E. Modelling nitrogen transformation and removal in primary facultative ponds. **Ecological Modelling**, v. 154, p. 207-215, 2002

SENZIA, M. A.; MASHAURI, D. A.; MAYO, A. W. Suitability of constructed wetlands and waste stabilisation ponds in waste water treatment: Nitrogen transformation and removal. **Physics and Chemistry of the Earth**, v. 28, p.1117-1124, 2003.

SHIPIN, O. V.; MEIRING, P. GJ.; ROSE, P. PETRO system: A low-tech approach to the removal of waste-water organics (incorporating effective removal of micro-algae by the trickling filter). **Water SA**, v. 24, n. 4, p.347-354, 1999.

SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R.; SOARES, J.; MARA, D. D.; PEARSON, H. W. Nitrogen removal in pond systems with different configurations and geometries. **Wat. Sci. Technol.** v. 31, n. 12, p. 321-330, 1995.

SILVA, G. M. **Estudo de viabilidade de pós tratamento de efluentes de UASB através de filtros biológicos percoladores sem etapa de clarificação**. 2005. 162 p. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Espírito Santo. Vitória, 2005.

SOARES, J.; SILVA, S. A.; OLIVEIRA, R.; ARAUJO, A. L. C.; MARA, D. D; PEARSON H. W. Ammonia removal in a pilot-scale waste stabilization pond complex in Northeast Brazil. **Wat. Sci. Technol.** v. 33, n. 7, p.165 - 171, 1996.

TORRES, J. J. et al. Study of the internal hydrodynamics in three facultative ponds of two municipal WSPS in Spain. **Wat. Res.**, v. 33, n. 5, p1133-1140, 1999.

VALERO, M. A. C.; MARA, D. D. Nitrogen transformation and removal in maturation ponds: Tracer experiments with N stable isotopes in the United Kingdom in Summer. In: International Conference SmallWat07, II, 2007, Seville. **Anais**. Seville, 2007, 6p.

VAN LOOSDRECHT, M. C. M.; TIJHUIS, L.; WIJDIEKS, A. M. S.; HEIJNEN, J. J. Population distribution in aerobic biofilms on small suspended particles. **Wat. Sci. Tech.**, v. 31, n. 1, p.163-171, 1995.

VON SPERLING, M. **Princípios básicos do tratamento de esgotos**: princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Minas Gerais: DESA - UFMG, 1996, 210p.

VON SPERLING, M. **Lagoas de estabilização**: princípios de tratamento biológico de águas residuárias. Minas Gerais: DESA - UFMG, 1996a, 134p.

VON SPERLING, M. Impacto dos nutrientes do esgoto lançado em corpos de água. In: ANDRADE NETO, C.O.; VOLSCHAN JR, I.; FLORÊNCIO, L.; VON SPERLING, M. (coord.). **Nutrientes de esgoto sanitário**: utilização e remoção. Rio de Janeiro:ABES, 2009a.

VON SPERLING, M. Remoção de nutrientes em sistemas naturais. In: CORAUCCI FILHO, B.; MONTEGGIA, L. O.; PIVELI, R.P.; VON SPERLING, M. (coord.). **Nutrientes de esgoto sanitário**: utilização e remoção. Rio de Janeiro:ABES, 2009b

YÁNES, F., **Lagunas de Estabilizacion**: Teoria, Diseno y mantenimiento. Cuenca: Monsale, 1993, 427p.

YÁNES, F. **Post tratamiento de efluentes de procesos anaerobicos en lagunas de estabilizacion**. Trabalho apresentado a Exhibicion Premier sobre Tecnologia en Calidad del Agua y el Ambiente, 2001, Guayaquil.

ZANOTELLI, C. T. **Modelagem matemática de nitrogênio e fósforo em lagoas facultativas e de aguapés para o tratamento de dejetos de suínos**. 2002. 180 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2002.

ZIMMO, O. R.; van der STEEN, N. P.; GIJZEN H. J.; Nitrogen mass balance across pilot-scale algae and duckweed-based wastewater stabilisation ponds. **Water Research**, v. 38, p.913-920, 2004.

APÊNDICE A - MONITORAMENTO DAS LAGOAS PILOTO

A.1. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 01

A.1.1. Dados de controle

Tabela A.1.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 01 - lagoas piloto.

Tabela A.1.1. Dados de pH e temperatura durante a fase de lagos photo.											
Data	pH						Temperatura (°C)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Ar	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
18/06/2007	7,3	7,0	7,9	8,1	8,5	30	27	26	26,7	23	23,7
21/06/2007	-	-	7,9	8,2	8,5	30	-	-	26	24	24
26/06/2007	-	7,0	8,1	8,1	9,0	28	-	26	25	23	25
28/06/2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
03/07/2007	7,4	7,0	8,0	8,4	8,7	27	26	25	26	22	23
05/07/2007	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
10/07/2007	7,3	6,9	8,1	8,2	8,5	27	27	27	24	20	20
12/07/2007	-	-	7,6	8,1	8,4	26	-	-	22	22	21
17/07/2007	6,9	6,7	7,3	7,6	7,8	20	22	22	21	20	20
19/07/2007	-	-	7,6	8,0	8,2	17	-	-	21	19	18
23/07/2007	7,3	6,9	7,4	8,1	8,2	21	24	23	21	20	20
26/07/2007	-	-	7,6	8,1	8,4	16	-	-	18	18	17
02/08/2007	-	-	7,9	8,2	8,7	-	-	-	23	21	20
06/08/2007	-	-	8,0	8,2	8,7	31	-	-	25	24	24
08/08/2007	7,2	6,9	8,2	8,4	9,1	31	28	27	27	26	27
28/08/2007	-	-	7,4	9,1	9,1	29	-	-	25	26	26
30/08/2007	-	-	7,5	8,4	8,8	21	-	-	24	23	23
18/09/2007	7,1	6,9	7,5	8,4	9,4	35	29	29	28	29	29
22/10/2007	-	-	7,5	8,1	8,9	36	-	-	30	29	29
25/10/2007	-	-	7,6	7,7	7,9	21	-	-	23	22	22
30/10/2007	-	-	7,4	7,9	9,1	34	-	-	30	29	30
31/10/2007	-	-	7,4	8,1	8,7	37	-	-	29	29	29
06/11/2007	-	-	7,6	8,2	8,7	26	-	-	25	25	25
07/11/2007	7,1	6,8	7,6	8,1	9,1	31	29	27	28	28	28
12/11/2007	-	-	7,7	8,5	-	-	-	-	27	27	-
20/11/2007	-	-	7,8	8,6	9,4	34	-	-	32	33	32
26/11/2007	-	-	7,8	8,3	9,3	32	-	-	29	29	29
27/11/2007	-	-	7,7	8,0	9,4	33	-	-	29	29	30
28/11/2007	7,5	6,9	7,6	7,9	8,8	27	28	27	26	26	26
03/12/2007	-	-	8,3	8,7	9,4	35	-	-	31	31	31
16/01/2007	-	-	7,0	7,1	6,6	-	-	-	26	26	26
23/01/2007	-	-	7,4	7,6	8,0	-	-	-	23	23	23

Tabela A.1.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)					OD (mg/L)			Vazão(m ³ /d)	
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2	L1	L2
18/06/2007	332	392	352	336	308	8,3	2,2	5,3	3,0	1,5
21/06/2007	-	-	348	336	320	9,0	3,1	8,4	3,0	1,5
26/06/2007	296	404	348	356	308	10,2	4,1	21,4	3,0	1,5
28/06/2007	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	1,5
03/07/2007	328	400	344	-	-	6,7	5,2	15,8	3,0	1,5
05/07/2007	-	-	-	-	-	-	-	-	3,0	1,5
10/07/2007	392	364	344	344	296	2,7	1,9	4,5	3,0	1,5
12/07/2007	-	-	416	392	384	1,2	1,3	6,8	3,0	1,5
17/07/2007	172	416	416	376	372	8,2	1,4	11,6	3,0	1,5
19/07/2007	-	-	404	376	344	2,9	4,5	8,2	3,0	1,5
23/07/2007	400	432	384	348	336	3,4	3,5	7,2	3,0	1,5
26/07/2007	-	-	372	348	320	0,0	0,8	8,3	3,0	1,5
02/08/2007	-	-	372	336	324	7,6	18,6	5,9	3,0	1,5
06/08/2007	-	-	368	352	316	7,7	6,9	17,8	3,0	1,5
08/08/2007	308	420	360	356	300	11,1	10,7	18,8	3,0	1,5
28/08/2007	-	-	432	352	332	0,0	22,9	20,1	3,0	1,5
30/08/2007	-	-	440	348	340	0,9	8,1	19,4	3,0	1,5
18/09/2007	360	464	440	384	344	0,0	14,3	22,0	3,0	1,5
22/10/2007	-	-	420	400	356	0,0	6,8	33,4	2,7	1,3
25/10/2007	-	-	396	368	324	0,0	0,0	3,3	3,0	1,6
30/10/2007	-	-	400	380	320	0,1	5,4	23,9	2,9	1,3
31/10/2007	-	-	400	380	320	0,0	5,5	10,8	2,7	1,1
06/11/2007	-	-	400	360	320	0,0	10,0	17,0	2,4	1,3
07/11/2007	360	380	360	340	280	0,3	8,8	29,3	2,9	1,7
12/11/2007	-	-	380	320	-	0,0	11,9	-	1,0	0,8
20/11/2007	-	-	380	340	260	1,6	20,8	32,3	2,9	1,5
26/11/2007	-	-	400	360	200	0,0	8,7	26,2	2,8	1,1
27/11/2007	-	-	420	380	300	0,0	1,3	28,5	3,0	1,6
28/11/2007	520	440	420	360	300	0,0	0,7	6,3	3,1	1,7
03/12/2007	-	-	420	380	320	16,8	13,4	30,4	2,9	1,5
16/01/2007	-	-	340	300	260	0,0	0,0	0,6	3,4	1,1
23/01/2007	-	-	360	360	300	0,0	0,0	1,8	3,0	1,6

Figura A.1.1: Série histórica de pH nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.2: Série histórica de alcalinidade nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.3: Série histórica de temperatura nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.4: Série histórica de OD nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.5: Série histórica - taxa de aplicação hidráulica nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

A.1.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela A.1.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		L1		L2	
	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)
19/06/07	327	86	62	-	45	-	44	-	-	-
27/06/07	267	113	46	-	33	7	76	10	-	-
11/07/07	500	87	48	15	49	5	49	4	-	-
18/07/07	271	105	65	28	56	25	35	24	-	-
24/07/07	296	63	37	20	41	5	38	14	-	-
31/08/07	-	-	50	15	30	6	46	10	-	-
20/09/07	366	126	60	27	33	11	59	16	-	-
07/11/07	333	86	61	11	41	8	56	7	-	-
28/11/07	388	97	48	17	84	23	151	15	-	-

Figura A.1.6: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DBO nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.7: Série histórica de DBO total nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.8: Série histórica de DBO filtrada nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Tabela A.1.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		L1		L2	
	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)
19/06/07	785	299	299	-	262	-	243	-		
22/06/07	-	-	283	-	1189	-	245	-		
27/06/07	411	75	262	-	187	-	168	-		
04/07/07	717	566	264	-	208	-	245	-		
11/07/07	1047	75	187	-	206	-	243	-		
13/07/07	-	-	278	-	389	-	241	-		
18/07/07	561	224	280	-	299	-	318	-		
20/07/07	-	-	224	-	187	-	112	-		
24/07/07	1245	226	226	-	226	-	151	-		
26/07/07	-	-	224	-	224	-	224	-		
07/08/07	-	-	262	-	290	-	215	-		
09/08/07	692	121	262	-	234	-	215	-		
31/08/07	-	-	271	79	206	71	262	60		
18/09/07	696	188	133	45	185	73	399	85		
07/11/07	1522	152	217	-	587	-	261	-		
28/11/07	874	194	165	58	146	19	291	47

Figura A.1.9: Série histórica- taxa de aplicação superficial de DQO nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.10: Série histórica de DQO total nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.11: Série histórica de DQO filtrada nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Tabela A.1.5: Dados de ST, STF e STV durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
19/06/07	1000	587	662	638	638	487	400	388	387	387	513	188	275	250	250
27/06/07	1025	625	687	688	725	462	388	387	400	437	563	237	300	287	288
04/07/07	975	638	712	700	700	425	362	387	425	388	550	275	325	275	313
11/07/07	1425	611	625	688	700	587	411	387	388	400	838	200	238	300	300
18/07/07	925	587	650	688	650	400	350	400	413	388	525	238	250	275	263
24/07/07	1362	638	637	625	600	437	300	300	325	287	925	338	338	300	313
07/08/07	-	-	725	800	625	-	-	413	450	388	-	-	312	350	237
31/08/07	-	-	650	650	3187	-	-	425	413	475	-	-	225	237	2712
18/09/07	882	616	666	877	815	461	409	432	462	491	421	207	234	415	324
28/11/07	911	651	646	703	740	480	401	400	408	395	431	250	246	295	345

Tabela A.1.6: Dados de SST, SSF e SSV durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
19/06/07	338	58	170	174	104	72	4	18	24	14	266	54	152	150	90
27/06/07	250	54	182	122	156	42	6	22	22	20	208	48	160	100	136
04/07/07	158	50	174	118	140	20	4	18	20	18	138	46	156	98	122
11/07/07	244	46	132	120	154	34	8	20	16	20	210	38	112	104	134
18/07/07	528	48	114	116	120	208	2	18	18	20	320	46	96	98	100
24/07/07	990	56	126	136	102	258	6	18	18	10	732	50	108	118	92
07/08/07	-	-	184	214	124	-	-	22	24	14	-	-	162	190	110
31/08/07	-	-	120	124	168	-	-	22	16	22	-	-	98	108	146
18/09/07	304	50	108	280	120	28	10	30	36	22	276	40	78	244	98
28/11/07	388	56	94	120	182	52	4	16	36	34	336	52	78	84	148

Figura A.1.12: Série histórica de ST nas lagoas L1 e L2 - Fase 01 **Figura A.1.13: Série histórica de STV nas lagoas L1 e L2 - Fase 01**

Figura A.1.14: Série histórica de SST nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.15: Série histórica de SSV nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

A.1.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela A.1.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	NTK - mgN-NTK/L					N.Amon - mgN-NH ₃ /L					Nitrito - mgN-NO ₂ /L			Nitrato - mgN-NO ₃ /L		
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2
19/06/07	56	58	55	46	42	31	49	36	28	26	-	-	-	-	-	-
22/06/07	-	-	55	46	42	-	-	35	30	24	-	-	-	0,19	0,20	0,22
27/06/07	53	62	59	50	41	33	51	38	34	24	-	-	-	0,15	0,15	0,15
04/07/07	61	61	55	38	45	36	53	41	33	27	-	-	-	0,18	0,17	0,23
11/07/07	100	62	57	49	47	67	49	40	33	26	-	-	-	0,05	0,37	0,23
13/07/07	-	-	54	53	45	-	-	40	35	28	-	-	-	-	-	-
18/07/07	62	58	38	53	44	23	48	38	34	29	-	-	-	-	-	-
20/07/07	-	-	52	47	39	-	-	38	34	27	-	-	-	-	-	-
24/07/07	114	57	55	48	36	64	48	36	29	24	-	-	-	-	-	-
26/07/07	-	-	49	44	39	-	-	35	30	26	-	-	-	-	-	-
07/08/07	-	-	54	49	39	-	-	34	27	20	0,14	0,10	1,22	-	-	-
09/08/07	52	60	54	47	35	30	46	33	27	18	0,08	0,12	0,15	-	-	-
29/08/07	-	-	-	-	-	36	49	40	16	12	0,36	0,37	0,38	-	-	-
18/09/07	49	59	50	39	35	34	52	41	24	7	0,02	0,23	0,69	0,00	0,00	0,20
22/10/07	-	-	46	39	36	-	-	35	24	14	-	-	-	-	-	-
25/10/07	-	-	45	36	43	-	-	34	23	17	-	-	-	-	-	-
30/10/07	-	-	-	-	-	-	-	31	23	16	-	-	-	-	-	-
31/10/07	-	-	41	39	26	-	-	28	20	8	-	-	-	-	-	-
06/11/07	-	-	-	-	-	-	-	31	22	11	-	-	-	-	-	-
07/11/07	53	45	47	43	35	31	38	32	13	10	-	-	-	-	-	-
12/11/07	-	-	41	30	-	-	-	29	18	-	-	-	-	-	-	-
20/11/07	-	-	-	-	-	-	-	31	20	6	-	-	-	-	-	-
26/11/07	-	-	-	-	-	-	-	32	23	6	-	-	-	-	-	-
27/11/07	-	-	-	-	-	-	-	32	25	4	-	-	-	-	-	-
28/11/07	88	36	72	35	25	35	33	34	24	7	-	-	-	-	-	-
03/11/07	-	-	44	38	27	-	-	32	21	5	-	-	-	-	-	-
16/01/07	-	-	90	65	46	-	-	43	31	21	-	-	-	-	-	-
23/01/07	-	-	44	31	22	-	-	24	17	6	-	-	-	-	-	-

Figura A.1.16: Série histórica - taxa de aplicação superficial de NTK nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.17: Série histórica de NTK nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.18: Série histórica de nitrogênio amoniacal nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Tabela A.1.8: Dados de fósforo solúvel durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	Fósforo solúvel (mg/L-PO ₄ ⁻³ /L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
19/06/07	5,06	5,74	0,87	0,49	0,69
27/06/07	4,56	6,22	0,00	0,00	0,57
04/07/07	5,66	6,52	0,00	0,00	0,00
11/07/07	10,01	7,01	0,68	0,50	0,12
18/07/07	2,23	6,37	0,08	0,20	0,15
24/07/07	6,65	6,58	0,14	0,18	0,69
07/08/07	-	-	0,17	0,26	1,24
29/08/07	5,59	6,80	3,83	2,67	0,91
18/09/07	5,11	7,34	0,34	2,88	0,13
07/11/07	5,09	5,28	0,26	0,35	1,60

Figura A.1.19: Série histórica de fósforo solúvel nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

A.1.4. Série de coliformes totais, fecais e clorofila-a

Tabela A.1.9: Dados de coliformes totais e fecais durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Total Facultativa (NMP/100mL)	L1 (NMP/100mL)	L2 (NMP/100mL)	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Fecal Facultativa (NMP/100mL)	L1 (NMP/100mL)	L2 (NMP/100mL)
27/06/07			2,40E+06	1,30E+06	2,30E+05			5,00E+05	8,00E+05	1,30E+05
04/07/07	3,00E+07	8,00E+06	4,00E+05	2,00E+05	4,00E+05	8,00E+06	5,00E+06	2,00E+05	2,00E+05	2,00E+05
29/08/07	2,20E+07	6,60E+06	9,00E+05	2,30E+04	5,00E+04	1,30E+07	1,40E+06	3,00E+05	7,00E+03	8,00E+03
07/11/07	3,61E+07	6,70E+06	6,97E+05	2,29E+05	5,72E+05	1,66E+07	3,18E+06	2,18E+05	4,75E+04	4,70E+04
29/11/07	5,25E+07	4,57E+06	6,05E+05	1,90E+05	2,30E+05	2,30E+07	2,28E+06	2,72E+05	1,30E+05	1,90E+05

Figura A.1.20: Série histórica de coliformes totais nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.21: Série histórica de coliformes fecais nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

Figura A.1.22: Série histórica de clorofila-a nas lagoas L1 e L2 - Fase 01

A.2. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 02

A.2.1. Dados de controle

Tabela A.2.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	pH						Temperatura (°C)					
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Ar	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	
30/01/2008	7,2	6,7	7,4	8,0	8,4	26	25	25	24	24	24	
07/02/2008	-	-	7,4	8,1	9,2	31	-	-	29	29	29	
13/02/2008	-	-	7,4	8,2	9,1	33	-	-	30	31	31	
27/02/2008	6,9	6,8	7,5	8,8	9,8	33	29	29	29	31	30	
13/03/2008	7,0	6,9	7,4	8,2	9,3	26	28	28	27	26	26	
19/03/2008	-	-	7,8	8,6	9,0	26	-	-	25	24	25	
26/03/2008	-	-	7,6	8,5	10,2	36	-	-	31	30	29	
27/03/2008	-	-	7,7	7,8	9,6	33	-	-	28	29	29	
02/04/2008	-	-	7,2	7,5	8,7	25	-	-	26	26	26	
03/04/2008	-	-	7,3	7,5	8,6	28	-	-	26	26	26	
08/04/2008	-	-	7,2	8,1	9,1	30	-	-	28	29	29	
09/04/2008	7,0	6,8	7,4	7,6	8,1	30	29	28	27	27	27	
16/04/2008	-	-	7,4	8,5	9,5	31	-	-	27	28	28	
17/04/2008	-	-	7,2	7,6	8,6	24	-	-	24	24	24	
06/05/2008	-	-	7,4	8,1	9,9	30	-	-	24	23	23	
07/05/2008	-	-	8,1	7,5	9,0	19	-	-	18	20	19	
13/05/2008	7,31	6,78	7,3	8,2	9,3	23	23	23	22	21	21	
14/05/2008	-	-	7,5	7,7	9,1	19	-	-	21	20	20	
20/05/2008	-	-	8,2	8,5	10,0	32	-	-	28	27	28	
27/05/2008	-	-	7,7	8,0	9,9	34	-	-	27	25	26	
29/05/2008	-	-	7,2	7,7	8,4	22	-	-	23	22	22	
03/06/2008	7,3	6,9	7,5	8,6	10,4	29	27	26	25	24	26	
05/06/2008	-	-	6,9	7,3	8,9	23	-	-	22	21	21	
10/06/2008	-	-	7,2	8,0	9,4	29	-	-	25	24	25	
12/06/2008	-	-	7,5	7,5	8,8	22	-	-	22	21	21	
17/06/2008	7,3	7,0	7,9	8,7	10,4	23	25	25	23	23	23	
18/06/2008	-	-	7,2	7,7	8,8	21	-	-	21	20	20	
24/06/2008	-	-	7,4	7,8	8,6	19	-	-	20	20	20	
25/06/2008	-	-	7,4	7,7	8,1	18	-	-	18	19	19	
01/07/2008	7,1	7,1	7,4	7,8	9,2	32	25	26	26	25	25	
02/07/2008	-	-	7,5	7,4	8,3	30	-	-	22	22	22	
08/07/2008	-	-	7,1	7,1	8,6	23	-	-	21	20	20	
24/07/2008	-	-	7,03	7,32	8,25	18	-	-	20	20	19	

Tabela A.2.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)					OD (mg/L)			Vazão(m ³ /d)	
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2	L1	L2
30/01/2008	400	320	360	320	260	0	11	16	1,7	0,9
07/02/2008	-	-	360	300	260	0,0	18	27	1,5	0,6
13/02/2008	-	-	380	280	260	0,0	14	27	1,5	0,8
27/02/2008	360	420	380	240	240	0,0	29	31	1,6	1,2
13/03/2008	340	380	360	280	260	0,0	10	21	1,6	0,8
19/03/2008	-	-	360	280	120	0,3	18	6	1,9	0,8
26/03/2008	-	-	360	280	220	2,4	9	30	1,6	0,8
27/03/2008	-	-	360	280	260	0,0	0	28	1,6	0,8
02/04/2008	-	-	420	340	260	0,1	0	0	1,6	0,9
03/04/2008	-	-	400	320	260	0,0	0	16	1,5	0,9
08/04/2008	-	-	420	340	280	0,0	13	27	1,3	0,5
09/04/2008	460	420	400	300	280	0,0	1	0	1,6	0,6
16/04/2008	-	-	420	300	280	0,0	14	32	1,4	0,8
17/04/2008	-	-	236	280	280	0,0	0	2	1,6	0,9
06/05/2008	-	-	400	340	380	0,7	8	37	1,6	0,8
07/05/2008	-	-	420	300	380	0,0	1	7	1,4	0,6
13/05/2008	400	400	440	360	300	2,53	8	28	1,6	0,8
14/05/2008	-	-	420	360	300	0	2	6	1,7	0,9
20/05/2008	-	-	400	360	300	9,36	16	34	1,4	0,8
27/05/2008	-	-	440	360	300	0	7	26	1,5	0,7
29/05/2008	-	-	460	340	220	0,0	0	1	1,7	0,8
03/06/2008	1,7	2,3	440	360	300	0,1	5	32	1,6	0,9
05/06/2008	-	-	440	360	280	0,0	1	4	1,7	1,0
10/06/2008	-	-	460	360	300	0,0	1	17	1,7	1,0
12/06/2008	-	-	420	380	340	0,0	0	3	1,6	0,8
17/06/2008	360	460	400	360	300	0,7	23	33	1,6	0,6
18/06/2008	-	-	420	360	300	0,0	3	9	1,6	0,8
24/06/2008	-	-	420	380	360	0,0	0	3	1,6	0,6
25/06/2008	-	-	420	400	320	0,0	0	5	1,7	1,0
01/07/2008	320	420	440	360	300	10,3	5	31	1,7	0,7
02/07/2008	-	-	400	380	300	1,1	0	8	1,7	0,8
08/07/2008	-	-	420	380	300	0,1	0	5	1,6	0,6
24/07/2008	-	-	420	400	320	0,2	0	1	1,5	0,9

Figura A.2.1: Série histórica de pH nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.2: Série histórica de temperaturas nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.3: Série histórica de OD nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.4: Série histórica de Alcalinidade nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.5: Série histórica de TDH nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

A.2.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela A.2.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		L1		L2	
	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)
30/01/08	389	76	32	7	63	4	40	8		
27/02/08	359	124	27	16	56	7	36	7		
13/03/08	269	87	57	19	71	10	47	11		
10/04/08	266	100	41	15	32	8	31	6		
24/04/08	335	93	64	18	56	4	38	8		
23/05/08	361	102	82	15	59	8	82	5		
04/06/08	327	64	51	9	58	4	27	2		
01/07/08	379	137	55	12	72	13	35	2

Figura A.2.6: Série histórica - taxa de aplicação de DBO nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.7: Série histórica de DBO total nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.8: Série histórica de DBO filtrada nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Tabela A.2.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		L1		L2	
	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)
30/01/08	443	434	198	57	226	38	321	30		
27/02/08	1020	316	826	392	204	147	745	139		
13/03/08	637	88	137	-	137	-	196	-		
09/04/08	505	262	187	4	150	67	206	64		
24/04/08	667	19	76	4	229	29	143	27		
23/05/08	811	459	261	32	171	22	306	32		
04/06/08	632	75	28	-	38	-	151	-		
01/07/08	867	219	99	15	229	19	316	27

Figura A.2.9: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DQO nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.10: Série histórica de DQO total nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.11: Série histórica de DQO filtrada nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Tabela A.2.5: Dados de ST, STF e STV durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
30/01/08	537	275	325	350	312	263	188	200	200	188	275	87	125	150	125
12/03/08	800	562	662	625	662	437	362	387	413	387	362	200	275	212	275
09/04/08	800	600	587	587	625	387	400	388	387	362	413	200	200	200	263
24/04/08	938	600	675	625	675	450	350	375	363	362	488	250	300	262	313
23/05/08	1029	671	657	714	716	543	486	400	471	471	486	186	257	243	244
04/06/08	910	520	580	600	640	400	290	300	320	350	510	230	280	280	290
01/07/08	1188	788	775	837	512	550	475	475	475	275	638	312	300	362	237

Tabela A.2.6: Dados de SST, SSF e SSV durante a fase 02 - lagoas piloto

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
30/01/08	250	50	126	118	128	40	10	22	20	16	210	40	104	98	112
12/03/08	272	56	126	148	180	78	8	16	14	14	194	48	110	134	166
09/04/08	248	56	84	78	122	30	6	2	12	12	218	50	82	66	110
24/04/08	122	48	166	114	196	76	4	22	12	18	46	44	144	102	178
23/05/08	313	26	118	116	190	17	20	16	22	10	297	6	102	94	180
04/06/08	267	57	213	203	280	17	13	30	7	13	250	43	183	197	267
01/07/08	234	46	80	50	130	21	2	11	4	10	213	44	69	46	120

Figura A.2.12: Série histórica de ST nas lagoas L1 e L2 - Fase 02 **Figura A.2.13: Série histórica STV nas lagoas L1 e L2 - Fase 02**

Figura A.2.14: Série histórica de SST nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.15: Série histórica de SSV nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

A.2.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela A.2.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	NTK - mgN-NTK/L					N.Amon - mgN-NH ₃ /L				
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1	L2
30/01/08	70	46	41	44	36	48	34	30	22	12
07/02/08	-	-	45	36	20	-	-	29	12	2
13/02/08	-	-	45	27	18	-	-	29	9	2
27/02/08	58	39	47	25	22	31	35	33	4	0
12/03/08	43	55	49	30	36	22	37	28	8	3
19/03/08	-	-	39	22	17	-	-	28	8	2
26/03/08	-	-	37	21	20	-	-	27	6	0
02/04/08	-	-	72	38	25	-	-	32	17	6
03/04/08	-	-	45	25	15	-	-	34	17	6
08/04/08	-	-	45	25	15	-	-	31	16	3
09/04/08	85	55	48	39	19	57	37	33	19	8
16/04/08	-	-	44	17	18	-	-	30	7	0
17/04/08	-	-	41	25	18	-	-	35	13	2
06/05/08	-	-	47	25	19	-	-	37	18	3
07/05/08	-	-	58	44	25	-	-	35	21	8
13/05/08	77	52	49	32	21	54	44	35	18	4
14/05/08	-	-	-	34	26	-	-	36	26	8
20/05/08	-	-	56	34	27	-	-	37	20	6
27/05/08	-	-	55	34	22	-	-	37	20	2
29/05/08	-	-	52	36	27	-	-	32	18	5
03/06/08	48	47	52	43	21	27	47	38	24	3
05/06/08	-	-	63	55	26	-	-	43	26	7
10/06/08	-	-	55	43	27	-	-	48	29	8
12/06/08	-	-	53	43	31	-	-	40	30	11
17/06/08	-	-	-	-	-	36	50	39	26	2
18/06/08	-	-	-	-	-	-	-	42	31	8
24/06/08	-	-	-	-	-	-	-	45	29	12
25/06/08	-	-	67	56	35	-	-	42	31	13
01/07/08	-	-	-	-	-	27	48	42	28	4
02/07/08	-	-	-	-	-	-	-	42	30	6
08/07/08	-	-	-	-	-	-	-	35	31	8
24/07/08	-	-	-	-	-	-	-	41	30	5

Figura A.2.16: Série histórica- taxa de aplicação superficial de NTK nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.17: Série histórica de NTK nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.18: Série histórica de nitrogênio amoniacal nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Tabela A.2.8: Dados de fósforo solúvel durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	Fósforo solúvel (mg/L- PO_4^{-3} /L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
30/01/08	6,19	4,66	0,00	0,00	0,00
27/02/08	4,66	5,00	0,33	0,03	1,59
12/03/08	2,15	5,07	1,18	0,00	0,26
09/04/08	5,49	5,32	0,08	0,21	0,40
04/06/08	4,13	6,42	0,08	0,12	2,34
17/06/08	4,53	6,39	0,07	0,25	1,27

Figura A.2.19: Série histórica de fósforo solúvel nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

A.2.4. Série de coliformes totais, fecais e clorofila-a

Tabela A.2.9: Dados de coliformes totais durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Total Facultativa (NMP/100mL)	L1 (NMP/100mL)	L2 (NMP/100mL)
30/01/08	6,01E+07	9,59E+06	1,27E+06	2,30E+05	2,30E+05
27/02/08	6,90E+07	1,30E+07	8,40E+05	1,80E+05	3,10E+03
13/03/08	4,36E+07	1,09E+07	1,25E+07	2,25E+05	9,08E+04
10/04/08	3,97E+07	6,00E+06	8,60E+05	1,01E+06	6,90E+05
24/04/08	6,70E+07	7,90E+06	1,02E+06	1,20E+05	2,98E+05
23/05/08	3,40E+07	2,90E+06	2,80E+05	2,50E+05	1,50E+04
04/06/08	4,40E+07	4,50E+06	1,40E+06	5,10E+04	9,10E+04

Tabela A.2.10: Dados de coliformes fecais durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Fecal Facultativa (NMP/100mL)	L1 (NMP/100mL)	L2 (NMP/100mL)
30/01/08	1,80E+07	3,88E+06	3,50E+05	4,30E+03	1,70E+04
27/02/08	1,50E+07	4,30E+06	2,60E+05	2,00E+03	-
13/03/08	1,44E+07	5,28E+06	2,99E+05	2,38E+04	1,60E+04
10/04/08	2,14E+07	1,40E+06	3,40E+05	4,10E+03	6,80E+04
24/04/08	2,60E+07	2,70E+06	3,30E+05	6,60E+04	2,10E+03
23/05/08	1,40E+07	2,00E+06	1,60E+05	7,30E+04	3,10E+03
04/06/08	1,60E+07	2,50E+06	6,80E+05	1,60E+04	4,20E+04

Figura A.2.20: Série histórica de coliformes totais nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.2.21: Série histórica de coliformes fecais nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Tabela A.2.11: Dados de clorofila-a durante a fase 02 - lagoas piloto.

Data	Clorofila-a (µg/L)		
	Facultativa	L-1	L2
27/02/08	435	818	745
12/03/08	769	1329	887
27/03/08	573	956	2350
09/04/08	277	698	1306
24/04/08	1064	1119	3115

Figura A.2.22: Série histórica de clorofila-a nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

A.3. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 03

A.3.1. Dados de controle

Tabela A.3.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	pH					Temperatura (°C)					
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Ar	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
23/07/2008			7,1	8,0	9,8	30			26	24	25
24/07/2008			7,0	7,3	8,3	18			20	20	19
30/07/2008			7,5	7,4	8,8	22			24	24	25
06/08/2008			7,3	8,2	10,0	31			27	26	28
07/08/2008			7,3	7,3	8,3	22			22	23	23
12/08/2008	7,1	9,9	7,5	7,9	10,0	28	27	27	27	29	28
14/08/2008			7,6	7,7	8,9	21			21	21	21
26/08/2008			7,6	8,6	10,2	36			28	28	28
28/08/2008			7,5	8,0	8,6	21			21	21	21
02/09/2008			7,7	9,3	9,8	33			26	27	27
04/09/2008			7,3	8,2	8,7	24			22	22	21
10/09/2008			7,6	8,3	7,8	27			26	25	25
18/09/2008			7,7	8,9	9,0	27			24	25	24
23/09/2008	7,2	7,0	7,38	8,92	9,0	25	24	24	25	23	23
30/09/2008			8,3	9,1	9,4	32			25	25	24
14/10/2008	7,2	7,4	8,0	9,6	9,8	32			31	31	31
16/10/2008			7,4	8,5	9,0	29			27	26	26
21/10/2008			7,8	8,7	9,8	29			26	26	26
28/10/2008			7,9	8,2	8,5	37			30	31	30
30/10/2008			7,9	8,2	8,1	23					
04/11/2008			7,8	8,6	9,7	36			30	31	30
05/11/2008			7,8	8,2	8,1	25			29	25	25
11/11/2008	7,3	7,2	8,0	8,5	9,1	33			29	28	28
18/11/2008			8,8	9,3	11,0	35			31	31	31
19/11/2008			7,9	8,3	9,0	23			25	25	24
20/11/2008			7,9	8,4	9,6	19			25	25	27
25/11/2008	7,2	6,9	7,6	9,4	10,9	35	29	29	29	30	31
04/12/2008			7,7	9,2	8,8	32			27	27	26

Tabela A.3.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)					OD (mg/L)			Vazão(m ³ /d)	
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Facultativa	L1	L2	L1	L2
23/07/2008			460	400	300	0,2	4,8	28,0	1,0	0,8
24/07/2008			420	400	320	0,2	0,1	0,7	0,9	1,3
30/07/2008			440	420	320	0,4	0,2	5,0	0,9	0,9
06/08/2008			420	320	240	0,3	13,5	27,5	0,8	0,9
07/08/2008	380	380	380	340	360	0,2	0,3	0,8	1,0	0,6
12/08/2008	280	320	400	340	380	-	-	-	0,7	0,9
14/08/2008			420	300	300	0,0	0,3	0,6	1,0	1,0
26/08/2008			400	400	740	0,0	15,9	37,5	1,0	0,5
28/08/2008			600	360	320	0,0	0,2	0,1	1,1	1,1
02/09/2008			420	320	320	0,1	30,4	35,0	1,0	0,8
04/09/2008			420	360	320	0,0	2,3	0,2	1,1	1,1
10/09/2008			460	540	400	0,0	8,9	0,1	0,9	0,6
18/09/2008			520	340	340	0,0	14,2	14,1	1,0	0,5
23/09/2008	400	440	420	280	320	0,0	15,1	18,5	0,9	0,8
30/09/2008			380	340	340	7,1	15,6	7,0	1,0	1,0
14/10/2008			360	300	300	0,0	12,6	14,9	1,0	1,0
16/10/2008			400	330	260	0,1	10,2	2,5	0,9	0,9
21/10/2008			380	320	280	0,1	1,8	23,2	1,0	1,0
28/10/2008			400	400	300	0,1	0,1	2,9	1,1	1,0
30/10/2008			400	400	300	0,0	0,0	0,0	1,0	1,0
04/11/2008			420	320	260	0,0	7,9	23,5	1,2	1,0
05/11/2008			420	320	260	0,0	1,2	0,1	1,0	1,0
11/11/2008	340	380	360	320	300	0,0	8,7	14,4	1,0	1,0
18/11/2008			400	280	260	0,4	14,5	18,7	0,8	0,9
19/11/2008			400	300	320	0,0	1,2	3,7	1,0	0,9
20/11/2008			400	360	300	0,5	14,3	15,6	1,0	1,1
25/11/2008	300	360	300	260	220	0,1	22,8	32,4	1,0	1,0
04/12/2008			360	300	320	0,1	11,8	13,7	1,0	1,0

Figura A.3.1: Série histórica de pH nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.2: Série histórica de temperaturas nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.3: Série histórica de OD nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.3.4: Série histórica de Alcalinidade nas lagoas L1 e L2 - Fase 02

Figura A.3.5: Série histórica - taxa de aplicação hidráulica nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

A.3.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela A.3.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		L1		L2	
	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)
12/08/08	279	69	53	7	24	11	15	5		
26/08/08	292	120	82	14	44	10	88	9		
24/09/08	440	136	54	20	63	14	39	11		
16/10/08	403	135	74	16	80	10	51	10		
12/11/08	342	94	41	15	37	8	33	8		
26/11/08	386	134	63	22	63	14	8	6		
05/02/08	315	109	95	24	83	29	70	22		
12/02/08	277	59	33	9	79	19	34	22		
05/03/08	336	110	74	16	32	18	64	17

Figura A.3.6: Série histórica - taxa de aplicação de DBO nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.7: Série histórica de DBO total nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.8: Série histórica de DBO filtrada nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Tabela A.3.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		L1		L2	
	DQO Total	(mg/L)	DQO Total	(mg/L)	DQO Total	DQO Filtrada	DQO Total	DQO Filtrada	DQO Total	DQO Filtrada
12/08/08	777		680		225	47	233	39	427	39
27/08/08	1126		583		338	136	338	117	559	120
24/09/08	698		85		23	15	132	4	57	8
16/10/08	821		358		98	113	128	64	140	75
12/11/08	648		95		57	4	19	4	50	0
26/11/08	1095		324		110	61	171	95	210	69
05/02/09	1038		250		183	81	260	96	202	142
12/02/09	381		57		219	57	86	57	86	
05/03/09	620		240		320	72	230	92	230	104

Figura A.3.9: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DQO nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.10: Série histórica de DQO total nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.11: Série histórica de DQO filtrada nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Tabela A.3.5: Dados de ST, STF e STV durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
12/08/08	947	663	621	737	811	505	400	379	421	389	442	263	242	316	421
26/08/08	910	660	700	710	810	450	390	400	430	440	460	270	300	280	370
24/09/08	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
16/10/08	1037	662	750	737	775	475	413	410	400	413	563	250	340	338	362
12/11/08	900	586	600	643	643	500	400	386	414	400	400	186	214	229	243
26/11/08	960	650	650	750	988	460	410	425	450	587	500	240	225	300	400
05/02/09	1025	750	725	587	625	425	425	350	287	338	600	325	375	300	287
12/02/09	925	600	700	575	525	488	412	400	338	313	437	188	300	238	212
12/02/09	1163	650	700	563	600	500	400	375	312	312	662	250	325	250	288

Tabela A.3.6: Dados de SST, SSF e SSV durante a fase 03 - lagoas piloto

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
12/08/08	306	86	136	182	58	40	8	34	36	-	266	78	102	146	60
26/08/08	266	74	186	176	208	46	8	36	10	26	220	66	150	166	182
24/09/08	374	74	136	180	114	58	8	44	28	16	316	66	92	152	98
16/10/08	316	76	238	216	166	48	0	26	8	10	268	76	212	208	156
12/11/08	308	98	140	166	212	26	2	14	22	14	282	96	126	144	198
26/11/08	154	52	350	110	172	36	2	40	14	24	118	50	310	96	148
05/02/09	262	78	130	186	80	42	14	42	30	4	220	64	88	156	76
12/02/09	222	58	194	60	50	42	14	22	4	8	180	44	172	56	42
05/03/09	232	50	218	56	128	32	4	28	2	12	200	46	190	54	116

Figura A.3.12: Série histórica de ST nas lagoas L1 e L2 - Fase 03 **Figura A.3.13: Série histórica STV nas lagoas L1 e L2 - Fase 03**

Figura A.3.14: Série histórica de SST nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.15: Série histórica de SSV nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

A.3.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela A.3.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 01 - lagoas piloto.

Data	NTK - mgN-NTK/L					N.Amon - mgN-NH ₃ /L				
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1	L2	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1	L2
23/07/08	-	-	-	-	-	-	-	46	26	4
24/07/08	-	-	-	-	-	-	-	41	30	5
30/07/08	-	-	-	-	-	-	-	39	17	1
06/08/08	-	-	-	-	-	-	-	50	16	2
07/08/08	-	-	-	-	-	-	-	45	22	7
12/08/08	124	115	114	38	31	31	46	39	15	0
14/08/08	-	-	-	-	-	-	-	43	21	6
20/08/08	-	-	-	-	-	-	-	41	22	6
26/08/08	50	76	72	37	41	31	48	39	25	0
28/08/08	-	-	55	49	28	-	-	36	17	6
02/09/08	-	-	67	31	37	-	-	36	5	3
04/09/08	-	-	50	41	28	-	-	38	16	6
10/09/08	-	-	80	30	31	-	-	31	11	14
18/09/08	-	-	57	37	22	-	-	49	14	11
23/09/08	94	62	90	36	19	54	50	39	13	5
30/09/08	-	-	52	37	24	-	-	35	8	4
14/10/08	-	-	53	43	-	-	-	34	4	11
16/10/08	-	-	38	28	16	-	-	32	10	3
21/10/08	-	-	49	28	28	-	-	34	10	2
28/10/08	-	-	62	31	38	-	-	48	13	13
30/10/08	-	-	38	22	20	-	-	35	16	16
04/11/08	-	-	124	24	11	-	-	38	12	7
05/11/08	-	-	36	26	36	-	-	24	12	9
11/11/08	36	36	44	24	30	21	32	28	9	7
18/11/08	-	-	40	22	20	-	-	30	3	0
19/11/08	-	-	34	-	18	-	-	27	8	12
20/11/08	-	-	35	22	17	-	-	27	5	2
25/11/08	31	36	32	9	6	19	32	27	1	0
04/12/08	-	-	38	35	21	-	-	25	4	7

Figura A.3.16: Série histórica- taxa de aplicação superficial de NTK nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.17: Série histórica de NTK nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.18: Série histórica de nitrogênio amoniacal nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Tabela A.3.8: Dados de fósforo solúvel durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	Fósforo solúvel (mg/L- PO_4^{-3} /L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1	L2
07/08/08	3,94	6,42	0,04	0,03	1,33
26/08/08	4,10	7,07	0,14	0,28	1,51
23/10/08	5,91	5,89	1,92	0,77	2,16
11/11/08	4,41	5,64	0,00	0,00	0,00
25/11/08	3,57	5,89	3,77	0,42	1,14
05/02/08	2,86	4,00	0,00	1,31	1,88
12/02/08	3,94	3,62	0,89	2,73	2,51
05/03/08	2,90	4,78	0,00	1,13	0,73

Figura A.3.19: Série histórica de fósforo solúvel nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

A.3.4. Série de coliformes totais, fecais e clorofila-a

Tabela A.3.9: Dados de coliformes totais durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Total Facultativa (NMP/100mL)	L1 (NMP/100mL)	L2 (NMP/100mL)
12/08/08	7,20E+07	2,10E+07	3,80E+06	1,60E+05	9,60E+03
26/08/08	2,70E+07	1,40E+07	2,80E+05	2,50E+05	8,70E+04
23/09/08	1,08E+07	5,20E+06	1,40E+06	1,80E+05	1,70E+04
10/12/08	3,97E+07	6,50E+06	8,40E+05	7,50E+05	1,08E+05
05/02/09	7,90E+07	7,50E+06	1,70E+04	1,01E+05	9,60E+04
12/02/09	2,28E+07	9,80E+05	2,40E+05	1,01E+05	6,89E+04
05/03/09	5,75E+07	7,80E+06	4,40E+05	1,01E+05	ND

Tabela A.3.10: Dados de coliformes fecais durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Fecal Facultativa (NMP/100mL)	L1 (NMP/100mL)	L2 (NMP/100mL)
12/08/08	5,20E+06	1,40E+06	1,40E+05	1,30E+04	ND
26/08/08	1,20E+07	4,70E+06	4,10E+04	2,60E+04	8,60E+03
23/09/08	7,07E+06	2,90E+06	3,50E+05	2,90E+04	1,00E+03
10/12/08	1,93E+07	3,60E+06	2,90E+05	8,50E+03	3,10E+03
05/02/09	2,10E+07	4,30E+06	3,90E+03	2,40E+04	2,40E+03
12/02/09	1,18E+07	6,30E+05	2,01E+05	ND	5,38E+03
05/03/09	2,19E+07	2,90E+06	6,30E+04	2,10E+03	ND

Figura A.3.20: Série histórica de coliformes totais nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Figura A.3.21: Série histórica de coliformes fecais nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

Tabela A.3.11: Dados de clorofila-a durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	Clorofila-a ($\mu\text{g/L}$)		
	Facultativa	L1	L2
07/08/08	652	539	693
26/08/08	554	2577	822
23/10/08	666	1845	871
03/11/08	59	391	257
11/11/08	371	497	1153
04/12/08	167	815	342
15/02/09	1250	1251	500
05/03/09	1745	355	959

Figura A.3.22: Série histórica de clorofila-a nas lagoas L1 e L2 - Fase 03

A.4. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 04

A.4.1. Dados de controle

Tabela A.4.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	pH					Ar	Temperatura (°C)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1 (0,7-5)	L1 (0,7-10)		Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1 (0,7-5)	L1 (0,7-10)
18/03/2009	7,4	7,9	7,9	9,8	11,3	36	-	-	29	31	35
25/03/2009	-	-	7,4	-	-	-	-	-	-	-	-
02/04/2009	7,3	7,1	7,4	9,0	11,0	33	28	28	33	33	32
22/04/2009	8,1	7,4	8,4	9,2	10,7	30	29	29	29	29	29
04/06/2009	7,2	7,0	7,6	8,7	-	24	22	23	22	22	-
18/06/2009	7,2	7,0	8,2	8,2	-	22	24	23	24	24	-
25/06/2009	7,2	7,0	7,7	8,1	-	23	22	22	21	21	-
02/07/2009	7,1	6,9	8,6	8,4	-	28	-	-	28	27	-
15/07/2009	7,1	6,9	7,6	8,5	-	26	25	24	24	25	-
22/07/2009	7,2	7,1	8,0	8,5	-	29	27	27	28	28	-
13/08/2009	7,3	7,1	8,2	-	8,7	26	26	25	25	-	25
26/08/2009	7,3	7,0	7,9	-	8,4	27	24	23	24	-	22
09/09/2009	7,1	7,0	7,6	-	8,1	26	25	25	25	-	25
17/09/2009	7,4	6,9	7,6	-	8,1	26	25	24	24	-	23
23/09/2009	7,0	6,8	7,3	-	7,9	23	25	25	24	-	23
14/10/2009	7,3	7,0	8,5	-	9,6	32	27	28	30	-	31
29/10/2009	7,2	6,9	7,5	-	8,2	34	28	27	28	-	29
19/11/2009	7,2	7,2	8,6	-	9,8	36	30	29	32	-	33
03/12/2009	7,4	6,8	7,6	-	8,5	32	-	-	28	-	28

Tabela A.4.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	Bruto	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)				OD (mg/L)			Vazão(m³/d)	
		Anaeróbia	Facultativa	L1	L1	Facultativa	L1	L1	L1	L1
				(0,7-5)	(0,7-10)		(0,7-5)	(0,7-10)	(0,7-5)	(0,7-10)
18/03/2009	300	340	320	200	180	0,06	27,6	30,1	1,4	1,0
25/03/2009	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
02/04/2009	280	340	340	260	200	0,8	13,1	21,2	1,7	0,8
22/04/2009	380	400	360	280	260	0,2	6,9	8,1	2,1	1,1
04/06/2009	300	380	360	340	-	1,6	12,8	-	2,1	-
18/06/2009	300	380	340	380	-	6,2	6,7	-	2,1	-
25/06/2009	340	440	400	400	-	3,7	4,6	-	2,1	-
02/07/2009	320	420	400	400	-	6,4	7,3	-	2,1	-
15/07/2009	340	420	400	380	-	1,3	9,5	-	2,0	-
22/07/2009	320	420	400	380	-	6,8	6,8	-	2,0	-
13/08/2009	360	440	400	-	320	5,9	-	9,2	-	1,0
26/08/2009	340	400	320	-	300	4,5	-	4,7	-	1,0
09/09/2009	160	380	360	-	300	4,3	-	6,6	-	1,0
17/09/2009	340	400	380	-	280	0,6	-	8,3	-	1,1
23/09/2009	140	380	360	-	280	0,5	-	8,3	-	1,0
14/10/2009	340	400	360	-	300	9,9	-	22,5	-	1,1
29/10/2009	320	360	360	-	320	2,7	-	10,2	-	1,1
19/11/2009	320	400	340	-	260	12,0	-	22,5	-	1,1
03/12/2009	400	340	320	-	240	0,7	-	6,4	-	1,1

Figura A.4.1: Série histórica de pH nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.2: Série histórica de temperaturas nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.3: Série histórica de OD nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.4: Série histórica de Alcalinidade nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.5: Série histórica - taxa de aplicação hidráulica nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

A.4.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela A.4.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		L1(0,70-5)		L1(0,70-10)	
	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)
18/03/09	216	86	41	14	14	6	89	4
02/04/09	391	154	78	25	102	28	62	53
22/04/09	424	102	57	18	51	10	115	11
04/06/09	446	141	76	21	61	15	-	-
18/06/09	354	100	95	18	133	16	-	-
25/06/09	354	122	116	23	218	21	-	-
02/07/09	473	129	109	15	160	19	-	-
15/07/09	462	100	74	21	54	15	-	-
22/07/09	473	117	94	16	79	14	-	-
13/08/09	363	120	84	15	-	-	33	12
26/08/09	578	99	55	10	-	-	58	11
09/09/09	162	81	56	13	-	-	59	33
23/09/09	245	106	54	22	-	-	76	13
14/10/09	314	129	60	20	-	-	45	10
29/10/09	333	122	57	18	-	-	22	9
19/11/09	426	97	60	12	-	-	30	7
03/12/09	187	76	28	15	-	-	25	14

Figura A.4.6: Série histórica - taxa de aplicação de DBO nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.7: Série histórica de DBO total nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.8: Série histórica de DBO filtrada nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Tabela A.4.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		L1 (0,70-5)		L1 (0,70-10)	
	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)
18/03/09	654	183	96	35						
02/04/09	990	295	137	114	210	50				
22/04/09	640	160	256	24	104	4				
04/06/09	624	168	226	12	127	4				
18/06/09	655	173	305	4	127	25				
25/06/09	762	238	366	65	274	65				
02/07/09	740	231	388	69	373	73				
15/07/09	941	265	247	82	208	86				
22/07/09	857	190	229	30	210	30				
13/08/09	790	133	217	34					160	38
26/08/09	575	132	170	8					143	
09/09/09										
23/09/09	590	110	188	76					236	64
14/10/09	728	155	233						186	19
29/10/09	814	235	161	63					90	63
19/11/09	1118	108	382	16					98	12
03/12/09	702	413	413	50					173	46

Figura A.4.9: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DQO nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.10: Série histórica de DQO total nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.11: Série histórica de DQO filtrada nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Tabela A.4.5: Dados de ST, STF e STV durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1(0,7-5)	L1(0,7-10)	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1(0,7-5)	L1(0,7-10)	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1(0,7-5)	L1(0,7-10)
18/03/09	838	587	525	450	625	438	388	350	287	325	400	200	175	163	300
02/04/09	975	638	550	588	663	475	400	387	350	338	500	238	163	238	325
22/04/09	1125	638	700	650	788	500	387	413	425	400	625	250	287	225	388
04/06/09	900	662	725	675		500	413	450	437		400	250	275	238	
18/06/09	1012	713	800	750		488	438	425	438		525	275	375	312	
25/06/09															
02/07/09	1000	700	863	925		463	437	362	475		537	263	500	450	
15/07/09	1063	675	675	687		563	425	450	425		500	250	225	263	
22/07/09	1150	713	750	775		513	438	425	450		637	275	325	325	
13/08/09	900	675	687		688	500	463	475		463	400	212	212		225
26/08/09	1312	650	612		638	637	413	375		400	675	237	238		238
09/09/09	600	613	650		600	275	388	413		375	325	225	238		225
23/09/09	700	638	600		737	300	363	375		437	400	275	225		300
14/10/09	1062	750	737		700	488	425	425		400	575	325	313		300
28/10/09	1050	675	638		650	537	425	400		388	512	250	238		263
19/11/09	1187	725	800		700	463	375	387		388	725	350	413		312
03/12/09	1012	700	600		525	462	400	350		338	550	300	250		188

Tabela A.4.6: Dados de SST, SSF e SSV durante a fase 04 - lagoas piloto

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1(0,7-5)	L1(0,7-10)	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1(0,7-5)	L1(0,7-10)	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1(0,7-5)	L1(0,7-10)
18/03/09	386	66	98	26	200	46	8	20	24		340	58	78	32	176
02/04/09	356	62	70	100	204	56	4	16	10	18	300	58	54	90	186
22/04/09	568	92	178	92	306	104	8	18	14	36	464	84	160	78	270
04/06/09	352	54	150	96		58	14	34	24		294	40	116	72	
18/06/09	1848	68	222	96		1630	12	30	24		218	56	192	72	
25/06/09	318	74	238	292		52	12	34	34		266	62	204	258	
02/07/09	244	68	286	290		40	8	20	34		204	60	266	256	
15/07/09	338	72	118	96		64	6	16	14		274	66	102	82	
22/07/09	322	70	166	126		54	16	30	30		268	54	136	96	
13/08/09	362	44	142		84	50	4	26		10	312	40	116		74
26/08/09	294	62	108		118	52	8	12		18	242	54	96		100
09/09/09	252	54	120		62	92	10	16		-	160	44	104		64
23/09/09	428	50	82		96	154	4	14		4	274	46	68		92
14/10/09	198	52	140		120	34	6	20		14	164	46	120		106
28/10/09	270	54	80		24	38	2	12		2	232	52	68		22
19/11/09	324	62	234		142	50	8	26		10	274	54	208		132
03/12/09	278	78	98		76	52	18	14		6	226	60	84		70

Figura A.4.12: Série histórica de ST nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04 **Figura A.4.13: Série histórica STV nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04**

Figura A.4.14: Série histórica de SST nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.15: Série histórica de SSV nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

A.4.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela A.4.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	NTK - mgN-NTK/L					N.Amon - mgN-NH ₃ /L				
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1 (0,7-5)	L1 (0,7-10)	Bruto	anaeróbia	Facultativa	L1 (0,7-5)	L1 (0,7-10)
18/03/09	24,6	28,0	26,9	13,44	13,4	14,6	22,4	16,8	3,4	1,7
02/04/09	30,2	31,4	30,2	16,8	17,9	14,0	25,2	20,2	7,84	1,7
22/04/09	58,2	42,6	41,4	28,0	32,5	22,4	37,0	26,9	16,8	6,2
04/06/09	65,0	50,4	57,1	50,4	-	33,6	49,8	39,2	30,8	-
18/06/09	58,2	61,6	65,0	59,4	-	30,2	54,3	40,9	39,2	-
25/06/09	63,8	51,5	61,3	65,0	-	31,4	48,2	33,8	33,8	-
02/07/09	57,6	44,0	71,9	60,0	-	27,6	46,5	34,7	31,9	-
15/07/09	57,3	53,8	62,7	41,4	-	31,4	47,6	37,0	33,0	-
22/07/09	54,4	50,2	60,3	49,6	-	28,1	47,3	36,0	32,3	-
13/08/09	58,2	59,9	52,3	-	35,1	31,9	55,0	37,7	-	24,9
26/08/09	48,7	57,5	50,4	-	36,2	32,3	48,8	34,4	-	21,8
09/09/09	27,6	54,2	51,1	-	28,7	14,1	47,6	36,7	-	18,9
17/09/09	59,0	51,7	37,5	-	27,8	44,9	46,4	33,5	-	15,3
23/09/09	39,8	37,0	48,7	-	36,2	12,7	44,4	35,4	-	17,8
14/10/09	50,3	56,2	48,9	-	24,2	28,2	45,7	29,8	-	5,2
29/10/09	56,3	35,7	46,7	-	27,6	27,8	43,1	31,1	-	17,2
19/11/09	54,5	65,2	39,1	-	24,0	26,7	43,4	25,0	-	1,8
03/12/09	88,8	47,9	42,2	-	22,4	68,9	40,9	28,3	-	8,1

Figura A.4.16: Série histórica - taxa de aplicação superficial de NTK nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.17: Série histórica de NTK nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.18: Série histórica de nitrogênio amoniacal nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Tabela A.4.8: Dados de fósforo solúvel durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	Fósforo solúvel (mg/L- PO_4^{-3} /L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	L1 (0,7-5)	L1 (0,7-10)
18/03/09	2,8	4,1	0,0	2,7	0,2
02/04/09	2,9	4,7	0,0	0,6	0,2
22/04/09	3,0	4,5	0,1	0,3	1,7
04/06/09	9,4	0,1	0,0	0,5	
18/06/09	3,0	5,7	0,3	0,3	
25/06/09	3,3	5,7	0,2	0,5	
02/07/09	3,7	5,6	0,2	0,1	
15/07/09	4,0	5,5	0,1	1,4	
22/07/09	3,7	5,7	0,0	0,0	
13/08/09	4,0	5,7	0,0		0,0
09/09/09	1,5	4,9	0,0		1,3
23/09/09	1,7	4,9	0,8		0,6
14/10/09	4,1	5,5	0,3		1,5
28/10/09	3,6	4,9	0,9		3,6
03/12/09	6,8	4,8	1,7		3,3

Figura A.4.19: Série histórica de fósforo solúvel nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

A.4.4. Série de coliformes totais, fecais e clorofila-a

Tabela A.4.9: Dados de coliformes totais durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Total Facultativa (NMP/100mL)	L1(0,7-5) (NMP/100mL)	L1(0,7-10) (NMP/100mL)
19/03/09	8,20E+07	2,60E+07	5,00E+06	1,20E+04	
02/04/09	4,20E+07	8,80E+06	1,80E+05	2,20E+04	
23/04/09	3,60E+07	8,10E+06	4,60E+06	1,01E+05	
04/06/09	2,30E+07	6,90E+06	1,66E+06	1,01E+05	
18/06/09	8,70E+07	7,60E+06	6,10E+06	9,10E+05	
25/06/09	6,00E+07	5,90E+06	3,50E+05	2,70E+05	
02/07/09	6,30E+07	6,20E+06	3,70E+05	2,60E+05	
14/08/09	1,30E+07	3,80E+06	5,80E+05		2,20E+03
27/08/09	3,40E+07	7,70E+06	9,90E+05		2,10E+05
15/10/09	3,78E+07	9,87E+06	3,27E+05		1,00E+03
29/10/09	5,50E+07	6,30E+06	4,00E+06		1,20E+05
03/12/09	5,70E+07	2,50E+06	5,00E+05		7,90E+05

Tabela A.4.10: Dados de coliformes fecais durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	Bruto (NMP/100mL)	Anaeróbia (NMP/100mL)	Coli. Fecal Facultativa (NMP/100mL)	L1(0,7-5) (NMP/100mL)	L1(0,7-10) (NMP/100mL)
19/03/09	3,40E+06	1,20E+06	2,30E+05	5,10E+03	
02/04/09	8,80E+06	2,90E+06	9,60E+04	2,10E+02	
23/04/09	1,20E+07	2,90E+06	3,80E+05	2,20E+03	
04/06/09	9,90E+06	3,30E+06	6,80E+05	3,13E+04	
18/06/09	2,70E+06	4,10E+05	3,50E+05	4,80E+04	
25/06/09	1,20E+07	2,90E+06	1,30E+05	1,00E+05	
02/07/09	1,30E+07	3,10E+06	1,50E+05	1,20E+05	
14/08/09	7,80E+06	2,60E+06	3,90E+05		ND
27/08/09	1,08E+07	3,60E+06	5,70E+05		5,50E+04
15/10/09	1,78E+07	4,57E+06	1,48E+05		ND
29/10/09	3,40E+07	8,30E+05	6,00E+04		2,20E+04
03/12/09	3,30E+07	1,50E+06	2,00E+05		1,00E+03

Figura A.4.20: Série histórica de coliformes totais nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Figura A.4.21: Série histórica de coliformes fecais nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

Tabela A.4.11: Dados de clorofila-a durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	Clorofila-a (µg/L)		
	Facultativa	L1(0,7-5)	L1(0,7-10)
18/03/09	155,928	354,032	1488,56
02/04/09	160,328	404,968	1503,384
22/04/09	2068,4	321,032	1543,024
04/06/09	280,448	250,368	
18/06/09	2258,248	467,768	
25/06/09	2697,416	5580,52	
02/07/09	3588,288	3076,136	
15/07/09	328,784	875,832	
12/08/09	950,736		532,16
26/08/09	978,584		1009,904
23/09/09	2875,1744		1205,64
19/11/09	189,712		1046,88
03/12/09	446,016		294,04

Figura A.4.22: Série histórica de clorofila-a nas lagoas L1(0,70-5) e L1(0,70-10) - Fase 04

APÊNDICE B - MONITORAMENTO DO FILTRO PERCOLADOR

B.1. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 01

B.1.1. Dados de controle

Tabela B.1.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	pH						Temperatura (°C)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Filtro Plástico	Filtro Pedra	Ar	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Filtro Plástico	Filtro Pedra
18/06/2007	7,3	7,0	7,9	8,6	8,6	30	27	26	27	24	26
21/06/2007	-	-	7,9	8,4	8,4	30	-	-	26	23	24
26/06/2007	-	7,0	8,1			28	-	26	25		
28/06/2007	-	-	-			-	-	-	-		
03/07/2007	7,4	7,0	8,0	8,4	8,4	27	26	25	26	21	20
05/07/2007	-	-	-			-	-	-	-		
10/07/2007	7,3	6,9	8,1	8,4	8,4	27	27	27	24	21	22
12/07/2007	-	-	7,6	8,2	8,3	26	-	-	22	21	21
17/07/2007	6,9	6,7	7,3	7,7	7,7	20	22	22	21	20	20
19/07/2007	-	-	7,6			17	-	-	21	21	21
23/07/2007	7,3	6,9	7,4	8,0	7,8	21	24	23	21	16	16
26/07/2007	-	-	7,6	8,1	8,0	16	-	-	18	22	22
02/08/2007	-	-	7,9	8,1	8,0	-	-	-	23	24	24
06/08/2007	-	-	8,0	8,0	7,9	31	-	-	25		
08/08/2007	7,2	6,9	8,2	7,9	7,6	31	28	27	27	24	24
28/08/2007	-	-	7,4	8,0	8,1	29	-	-	25	26	26
30/08/2007	-	-	7,5	8,3	8,2	21	-	-	24	23	22
13/09/2007	-	-	8,2	7,7	8,0	31	-	-	27	25	24
22/10/2007	-	-	7,5	7,8	7,8	36	-	-	30	29	29
25/10/2007	-	-	7,6	7,6	7,6	21	-	-	22	22	22
30/10/2007	-	-	7,4	7,5	7,5	34	-	-	30	29	29
31/10/2007	-	-	7,4	8,0	8,0	37	-	-	29	29	29
06/11/2007	-	-	7,6	8,1	7,9	26	-	-	25	25	25
07/11/2007	7,1	6,8	7,6	8,0	7,8	31	29	27	28	27	27
12/11/2007	-	-	7,7	5,0	4,5	-	-	-	30	27	27
26/11/2007	-	-	7,8	8,4	8,1	32	-	-	29	28	28
27/11/2007	-	-	7,7	8,3	8,0	33	-	-	29	28	28
28/11/2007	7,5	6,9	7,6	8,2	8,0	27	28	27	26	25	24
03/12/2007	-	-	8,3	7,9	8,1	35	-	-	31	30	30
23/01/2008	-	-	7,4	7,8	7,5	-	-	-	23	23	23
30/01/2008	7,2	6,7	7,4	7,7	7,5	26	25,3	25,1	24	24	24
19/03/2008	-	-	7,8	7,6	7,5	26	-	-	25	24	24
02/04/2008	-	-	7,2	7,2	7,4	25	-	-	26	26	26

Tabela B.1.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)					OD (mg/L)			Vazão(m ³ /d)	
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Filtro Plástico	Filtro Pedra	Facultativa	Filtro Plástico	Filtro Pedra	Filtro Plástico	Filtro Pedra
18/06/2007	332	392	352	344	316	8,3	6,3	6,7	0	0
21/06/2007	-	-	348	320	180	9,0	6,2	6,3	0	0
26/06/2007	296	404	348	-	-	10,2	-	-	0	0
28/06/2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
03/07/2007	328	400	344	280	248	6,7	7,7	8,2	0	0
05/07/2007	-	-	-	-	-	-	-	-	0	0
10/07/2007	392	364	344	248	244	2,7	7,0	6,9	0	0
12/07/2007	-	-	416	288	264	1,2	6,9	6,6	0	0
17/07/2007	172	416	416	296	248	8,2	6,9	6,5	0	0
19/07/2007	-	-	404	244	232	2,9	6,4	5,7	0	0
23/07/2007	400	432	384	248	184	3,4	6,9	6,6	0	0
26/07/2007	-	-	372	252	188	0,0	6,0	6,0	0	0
02/08/2007	-	-	372	232	156	7,6	6,2	6,4	0	0
06/08/2007	-	-	368	-	-	7,7	-	-	0	0
08/08/2007	308	420	360	184	64	11,1	5,5	6,3	0	0
28/08/2007	-	-	432	340	248	0,0	6,4	6,9	0	0
30/08/2007	-	-	440	304	244	0,9	7,0	7,7	0	0
13/09/2007	-	-	392	224	180	18,6	5,0	5,8	0	0
22/10/2007	-	-	420	212	188	0,0	3,4	4,4	0	0
25/10/2007	-	-	396	200	144	0,0	7,3	9,0	1,1	1,4
30/10/2007	-	-	400	240	180	0,1	1,7	4,4	1,2	1,5
31/10/2007	-	-	400	240	160	0,0	3,7	5,4	1,8	1,3
06/11/2007	-	-	400	300	200	0,0	5,0	4,9	2,7	3,1
07/11/2007	360	380	360	280	180	0,3	3,7	4,9	2,6	3,3
12/11/2007	-	-	380	260	180	0,0	5,0	4,5	2,5	3,2
26/11/2007	-	-	400	320	200	0,0	5,2	5,2	2,0	2,6
27/11/2007	-	-	420	340	180	0,0	5,2	5,1	1,2	1,9
28/11/2007	520	440	420	320	160	0,0	6,8	6,4	1,4	1,7
03/12/2007	-	-	420	180	120	16,7	6,3	7,0	0,8	1,0
23/01/2008	-	-	360	240	200	0,0	6,1	5,4	1,3	1,7
30/01/2008	400	320	360	180	180	0,0	6,3	5,3	1,6	1,2
19/03/2008	-	-	360	300	160	0,3	7,2	6,6	1,7	1,2
02/04/2008	-	-	420	180	160	0,1	3,0	4,1	0,7	1,0

Figura B.1.1: Série histórica de pH no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.2: Série histórica de alcalinidade no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.3: Série histórica de temperatura no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.4: Série histórica de OD no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.5: Série histórica - taxa de aplicação hidráulica no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

B.1.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela B.1.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	Bruto		Anaerobia		Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DBO Total (mg/L)		DBO Total (mg/L)		DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)
22/06/07	-		-		155	-	176	71	153	60
13/07/07	-		-		32	20	64	32	79	30
20/07/07	-		-		34	-	23	22	52	12
27/07/07	-		-		29	18	33	15	41	12
09/08/07	398		116		61	20	46	7	82	10
29/08/07	376		106		55	15	50	10	53	10
07/11/07	333		86		61	11	39	7	30	7
28/11/07	388		97		48	17	104	19	70	27
30/01/08	389		76		32	7	72	15	64	5

Figura B.1.6: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DBO no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.7: Série histórica de DBO total no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.8: Série histórica de DBO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Tabela B.1.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)
19/06/2007	785	299	299	-	1701	-	224	-
22/06/2007	-	-	283	-	245	-	208	-
04/07/2007	717	566	264	-	226	-	189	-
11/07/2007	1047	75	187	-	168	-	168	-
13/07/2007	-	-	278	-	167	-	315	-
18/07/2007	561	224	280	-	280	-	299	-
20/07/2007	-	-	224	-	168	-	187	-
24/07/2007	1245	226	226	-	113	-	151	-
26/07/2007	-	-	224	-	150	-	206	-
07/08/2007	-	-	262	-	168	-	159	-
09/08/2007	692	121	262	-	252	-	290	-
29/08/2007	860	37	196	75	187	82	187	97
07/11/2007	1522	152	217	-	152	-	261	-
28/11/2007	874	194	165	58	136	272	136	117
30/01/2008	443	434	198	57	94	15	94	8

Figura B.1.9: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DQO no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.10: Série histórica de DQO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.11: Série histórica de DQO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Tabela B.1.5: Dados de ST, STF e STV durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
22/06/2007	-	-	662	625	613	-	-	350	387	363	-	-	313	238	250
13/07/2007	-	-	663	688	688	-	-	388	400	425	-	-	275	288	263
20/07/2007	-	-	625	638	638	-	-	425	413	425	-	-	200	225	213
26/07/2007	-	-	575	563	550	-	-	350	350	375	-	-	225	212	175
09/08/2007	1037	688	713	850	825	462	400	387	513	437	575	287	325	338	388
29/08/2007	1062	688	663	313	713	537	450	425	38	450	525	238	238	275	263
28/11/2007	911	651	646	694	754	480	401	400	450	420	431	250	246	244	334
30/01/2008	537	275	325	371	363	263	188	200	227	225	275	87	125	144	138

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

Tabela B.1.6: Dados de SST, SSF e SSV durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
22/06/2007	-	-	162	104	84	-	-	22	16	14	-	-	140	88	70
13/07/2007	-	-	132	110	116	-	-	20	20	18	-	-	112	90	98
20/07/2007	-	-	120	114	60	-	-	22	12	18	-	-	98	102	42
26/07/2007	-	-	110	42	52	-	-	18	2	2	-	-	92	40	50
09/08/2007	300	64	174	222	156	54	8	18	112	22	246	56	156	110	134
29/08/2007	356	38	96	96	88	72	-	14	28	18	284	56	82	68	70
28/11/2007	388	56	94	68	86	52	4	16	18	20	336	52	78	50	66
30/01/2008	250	50	126	82	70	40	10	22	12	6	210	40	104	70	64

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

Figura B.1.12: Série histórica de ST no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01 **Figura B.1.13: Série histórica de STV no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01**

Figura B.1.14: Série histórica de SST no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.15: Série histórica de SSV no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

B.1.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela B.1.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	NTK – mgN-NTK/L					N.Amon – mgN-NH ₃ /L					Nitrito – mgN-NO ₂ /L				Nitrato – mgN-NO ₃ /L			
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL		
19/06/07	56	58	55	46	49	31	49	36	27	35	-	-	-	-	-	-		
22/06/07	-	-	55	26	50	-	-	35	10	25	-	-	-	0,2	0,9	0,4		
04/07/07	61	61	55	28	38	36	53	41	15	22	-	-	-	0,2	0,6	0,4		
11/07/07	100	62	57	27	34	67	49	40	18	21	-	-	-	0,1	0,2	0,1		
13/07/07	-	-	54	27	35	-	-	40	16	21	-	-	-	-	-	-		
18/07/07	62	58	38	28	39	23	48	38	15	22	-	-	-	-	-	-		
20/07/07	-	-	52	27	36	-	-	38	15	23	-	-	-	-	-	-		
24/07/07	114	57	55	22	39	64	48	36	13	20	-	-	-	-	-	-		
26/07/07	-	-	49	21	32	-	-	35	12	20	-	-	-	-	-	-		
07/08/07	-	-	54	22	30	-	-	-	-	-	0,1	15,1	16,3	-	-	-		
09/08/07	52	60	54	15	31	30	46	33	13	13	0,1	16,5	27,6	-	-	-		
29/08/07	-	-	-	-	-	36	49	40	11	26	0,4	8,6	11,1	-	-	-		
22/10/07	-	-	46	11	12	-	-	35	3	6	-	7,1	14,3	-	74,1	44,1		
25/10/07	-	-	45	-	17	-	-	34	1	6	-	5,5	9,2	-	21,2	68,1		
30/10/07	-	-	41	11	26	-	-	31	3	8	-	5,2	10,3	-	-	-		
31/10/07	-	-	-	-	-	-	-	28	0	10	-	6,3	11,1	-	-	-		
06/11/07	-	-	-	-	-	-	-	31	2	21	-	4,0	8,7	-	19,1	0,0		
07/11/07	47	45	47	17	38	31	38	32	2	8	-	4,6	9,0	-	17,2	0,4		
12/11/07	-	-	-	-	-	-	-	29	4	15	-	2,5	9,1	-	13,7	0,0		
26/11/07	-	-	-	-	-	-	-	32	2	21	-	-	-	-	-	-		
27/11/07	-	-	-	-	-	-	-	32	5	10	-	3,2	8,8	-	27,0	0,5		
28/11/07	88	36	72	9	41	35	33	34	1	20	-	2,9	11,7	-	20,7	0,4		
03/12/07	-	-	44	10	13	-	-	32	0	2	-	2,0	32,9	-	24,8	3,9		
23/01/08	-	-	44	16	22	-	-	24	1	8	-	8,8	17,3	-	3,2	3,4		
30/01/08	70	46	41	13	16	48	34	30	6	6	-	5,3	18,5	-	2,8	0,3		
19/03/08	-	-	39	13	25	-	-	28	7	15	-	-	-	-	-	-		
02/04/08	-	-	72	10	11	-	-	32	3	4	-	12,4	22,9	-	1,3	0,3

Figura B.1.16: Série histórica - taxa de aplicação superficial de NTK no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.17: Série histórica de NTK no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.18: Série histórica de nitrogênio amoniacal no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.19: Série histórica de nitrito no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Figura B.1.20: Série histórica de nitrato no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

Tabela B.1.8: Dados de fósforo solúvel durante a fase 01 – filtro percolador.

Data	Fósforo solúvel (mg/L-PO4-3/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Filtro Pedra	Filtro Plástico
22/06/07	-	-	0,0	0,5	0,7
13/07/07	-	-	0,1	0,4	0,8
20/07/07	-	-	0,1	1,4	1,8
26/07/07	-	-	0,6	3,6	3,5
07/08/07	-	-	0,2	2,4	3,2
29/08/07	5,6	6,8	3,8	2,1	2,1
07/11/07	5,1	5,3	0,3	0,3	0,3
28/11/07	8,3	6,5	3,5	4,2	4,0
30/01/08	6,2	4,7	0,0	1,9	3,5

Figura B.1.21: Série histórica de fósforo solúvel no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 01

B.2. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 02

B.2.1. Dados de controle

Tabela B.2.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	pH						Temperatura (°C)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp	Ar	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp
03/04/2008	-	-	7,3	7,8	7,6	28	-	-	26	26	26
08/04/2008	-	-	7,2	7,2	7,4	30	-	-	28	28	28
09/04/2008	7,0	6,8	7,4	7,5	7,3	30	29	28	27	27	28
16/04/2008	-	-	7,4	7,8	7,7	31	-	-	27	27	27
06/05/2008	-	-	7,4	7,9	7,7	30	-	-	24	22	23
07/05/2008	-	-	8,1	7,9	8,0	19	-	-	18	18	18
13/05/2008	7,3	6,8	7,3	8,2	7,8	23	23	23	22	21	21
14/05/2008	-	-	7,5	8,0	7,9	19	-	-	21	20	20
20/05/2008	-	-	8,2	8,2	8,1	32	-	-	28	28	28
27/05/2008	-	-	7,7	7,6	7,8	34	-	-	27	26	25
29/05/2008	-	-	7,2	7,7	7,7	22	-	-	23	22	22
05/06/2008	-	-	6,9	7,2	7,2	23	-	-	22	21	21
10/06/2008	-	-	7,2	7,9	7,8	29	-	-	25	25	25
12/06/2008	-	-	7,5	7,5	8,0	22	-	-	22	21	22
17/06/2008	7,3	7,0	7,9	8,1	8,2	23	25	25	23	26	23
18/06/2008	-	-	7,2	7,5	7,5	21	-	-	21	21	20
24/06/2008	-	-	7,4	7,8	7,7	19	-	-	20	20	20
25/06/2008	-	-	7,4	7,8	7,8	18	-	-	19	19	19
01/07/2008	7,1	7,1	7,4	7,4	7,4	32	25	26	26	25	25
02/07/2008	-	-	7,5	7,2	6,9	30	-	-	22	22	22
08/07/2008	-	-	7,1	6,5	8,8	23	-	-	21	21	21
16/07/2008	-	-	7,2	8,0	7,8	19	-	-	21	21	22
17/07/2008	-	-	7,4	7,8	7,4	21	-	-	22	22	23
24/07/2008	-	-	7,0	7,4	7,6	18	-	-	20	21	20
30/07/2008	-	-	7,5	7,9	8,0	22	-	-	24	23	25
06/08/2008	-	-	7,3	7,5	7,5	31	-	-	27	27	26
07/08/2008	-	-	-	7,4	5,1	22	-	-	22	23	22
12/08/2008	7,1	6,9	7,5	7,5	7,4	28	27	27	27	28	28

Tabela B.2.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)						OD (mg/L)			Vazão(m³/d)	
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp	FpL	Fp	
03/04/2008	-	-	400	180	220	0,0	4,6	5,7	1,9	2,4	
08/04/2008	-	-	420	100	100	0,0	3,8	4,4	1,9	1,9	
09/04/2008	460	420	400	160	140	0,0	5,3	5,7	0,6	0,7	
16/04/2008	-	-	420	300	240	0,0	3,0	4,0	2,0	2,8	
06/05/2008	-	-	400	300	180	0,7	5,5	5,5	3,0	2,7	
07/05/2008	-	-	420	320	240	0,0	6,5	6,3	2,9	3,8	
13/05/2008	400	400	440	340	280	2,5	8,2	8,2	3,5	5,0	
14/05/2008	-	-	420	320	260	0,0	5,8	5,7	2,8	3,2	
20/05/2008	-	-	400	240	260	9,4	9,0	7,4	2,0	2,9	
27/05/2008	-	-	440	280	180	0,0	5,0	6,1	2,1	1,5	
29/05/2008	-	-	460	360	160	0,0	4,8	5,5	3,0	3,5	
05/06/2008	-	-	440	160	220	0,0	5,4	5,1	2,2	3,0	
10/06/2008	-	-	460	160	140	0,0	6,3	6,4	1,1	1,6	
12/06/2008	-	-	420	220	200	0,0	5,5	5,4	2,6	3,5	
17/06/2008	360	460	400	240	200	0,7	9,2	8,6	1,8	2,6	
18/06/2008	-	-	420	260	240	0,0	6,6	6,8	3,5	4,1	
24/06/2008	-	-	420	300	320	0,0	4,8	4,2	3,9	5,6	
25/06/2008	-	-	420	280	300	0,0	6,9	6,4	3,0	4,3	
01/07/2008	320	420	440	120	120	10,3	7,8	8,1	3,8	3,8	
02/07/2008	-	-	400	240	260	1,1	5,5	5,3	3,1	5,2	
08/07/2008	-	-	420	260	240	0,1	6,5	8,8	3,9	5,4	
16/07/2008	-	-	440	280	240	0,3	6,9	6,8	3,5	4,5	
17/07/2008	-	-	420	240	200	0,1	7,0	6,9	3,7	4,8	
24/07/2008	-	-	420	240	220	0,2	6,9	6,6	2,7	3,5	
30/07/2008	-	-	440	200	180	0,4	8,3	8,4	1,5	1,8	
06/08/2008	-	-	420	220	260	0,3	4,7	4,2	3,4	2,8	
07/08/2008	-	-	380	220	200	0,7	5,73	7,3	3,0	4,3	
12/08/2008	280	-	400	140	120	-	-	-	1,9	1,1

Figura B.2.1: Série histórica de pH no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.2: Série histórica de alcalinidade no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.3: Série histórica de temperatura no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.4: Série histórica de OD no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.5: Série histórica - taxa de aplicação hidráulica no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

B.2.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela B.2.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)
10/04/08	266	100	41	15	57	5	36	9
23/05/08	361	102	82	18	62	10	48	10
01/07/08	379	137	55	12	47	5	44	5
12/08/08	279	69	52	7	1	7	55	7

Figura B.2.6: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DBO no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.7: Série histórica de DBO total no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.8: Série histórica de DBO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Tabela B.2.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)
09/04/2008	505	262	187	4	131	52	168	79
23/05/2008	811	459	261	32	171	32	153	36
01/07/2008	867	219	99	15	126	15	133	19
12/08/2008	777	680	225	74	117	70	66	23

Figura B.2.9: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DQO no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.10: Série histórica de DQO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.11: Série histórica de DQO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Tabela B.2.5: Dados de sólidos totais, fixos e voláteis durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
09/04/2008	800	600	587	671	675	387	400	388	370	413	413	200	200	301	263
23/05/2008	1029	671	657	700	600	543	486	400	471	429	486	186	257	229	171
01/07/2008	1188	788	775	500	488	550	475	475	325	288	638	312	300	175	200
12/08/2008	900	630	590	510	110	480	380	360	330	40	420	250	230	180	70

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

Tabela B.2.6: Dados de sólidos totais voláteis, fixos e voláteis durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
09/04/2008	248	56	84	76	64	30	6	2	6	4	218	50	82	70	60
23/05/2008	313	26	118	98	92	17	20	16	14	18	297	6	102	84	74
01/07/2008	623	74	128	148	80	57	4	18	16	12	567	70	110	132	68
12/08/2008	306	86	136	88	14	40	8	34	36	2	266	78	102	52	16

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

Figura B.2.12: Série histórica de ST no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.13: Série histórica de STV no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.14: Série histórica de SST no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.15: Série histórica de SSV no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

B.2.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela B.2.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	NTK – mgN-NTK/L					N.Amon – mgN-NH ₃ /L					Nitrito – mgN-NO ₂ /L			Nitrato – mgN-NO ₃ /L		
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL
03/04/2008	-	-	45	15	13	-	-	34	6	6	-	10,8	19,9	-	-	-
08/04/2008	-	-	45	12	19	-	-	31	0	0	-	3,3	10,5	-	-	-
09/04/2008	85	55	48	9	8	57	37	33	0	3	-	18,3	6,5	-	-	-
16/04/2008	-	-	44	16	27	-	-	30	10	17	-	6,2	10,1	-	-	-
06/05/2008	-	-	47	13	29	-	-	37	4	20	-	2,6	8,0	-	-	-
07/05/2008	-	-	58	36	47	-	-	35	16	31	-	2,1	3,9	-	-	-
13/05/2008	-	-	49	25	29	-	-	35	16	25	-	3,0	7,0	-	-	-
14/05/2008	-	-	-	32	36	-	-	36	16	27	-	3,5	8,0	-	13,1	-
20/05/2008	-	-	56	27	24	-	-	37	12	14	-	6,5	17,5	-	4,6	-
27/05/2008	-	-	55	29	18	-	-	37	12	4	-	15,3	6,8	-	-	-
29/05/2008	-	-	52	29	34	-	-	32	7	16	-	5,9	9,5	-	5,4	-
05/06/2008	-	-	63	32	22	-	-	43	15	10	-	17,6	7,3	-	-	-
10/06/2008	-	-	55	10	11	-	-	48	1	4	-	7,7	15,2	-	-	-
12/06/2008	-	-	53	27	38	-	-	40	13	17	-	7,5	12,1	-	18,7	10,0
17/06/2008	-	-	-	-	-	36	50	39	10	12	-	9,5	14,1	-	20,8	10,9
18/06/2008	-	-	-	-	-	-	-	42	17	35	-	7,0	8,8	-	12,5	8,9
24/06/2008	-	-	-	-	-	-	-	45	23	22	-	5,5	9,2	-	10,9	5,9
25/06/2008	-	-	67	35	34	-	-	42	22	21	-	4,6	8,5	-	6,8	4,3
01/07/2008	-	-	-	-	-	27	48	42	0	0	-	1,5	2,3	-	38,2	33,2
02/07/2008	-	-	-	-	-	-	-	42	15	13	-	5,7	11,4	-	11,6	9,0
08/07/2008	-	-	-	-	-	-	-	35	22	20	-	4,1	7,7	-	10,6	7,8
16/07/2008	-	-	-	-	-	-	-	44	13	17	-	10,6	7,6	-	10,8	14,6
17/07/2008	-	-	-	-	-	-	-	35	12	14	-	7,7	6,7	-	19,6	13,1
24/07/2008	-	-	-	-	-	-	-	41	12	17	-	5,0	10,0	-	16,6	10,3
30/07/2008	-	-	-	-	-	-	-	39	0	0	-	0,8	5,0	-	21,8	16,2
06/08/2008	-	-	-	-	-	-	-	50	15	15	-	5,2	10,8	-	14,5	12,3
07/08/2008	-	-	-	-	-	-	-	45	11	15	-	2,7	6,2	-	17,3	14,1
12/08/2008	124	115	114	17	9	31	46	39	3	5	-	8,1	6,2	-	19,6	27,2

Figura B.2.16: Série histórica - taxa de aplicação superficial de NTK no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.17: Série histórica de NTK no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.18: Série histórica de nitrogênio amoniacal no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.19: Série histórica de nitrito no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.20: Série histórica de nitrato no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

Figura B.2.21: Série histórica de fósforo solúvel no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 02

B.3. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 03

B.3.1. Dados de controle

Tabela B.3.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 03 – filtro percolador.

Data	pH						Temperatura (°C)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp	Ar	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp
14/08/2008	-	-	7,6	7,6	7,8	21	-	-	21	22	22
20/08/2008	-	-	7,4	7,6	7,6	26	-	-	24	24	24
26/08/2008	-	-	7,6	7,6	7,6	36	-	-	28	29	28
28/08/2008	-	-	7,5	7,4	7,6	21	-	-	21	21	21
02/09/2008	-	-	7,5	7,7	7,8	33	-	-	26	27	27
04/09/2008	-	-	7,3	7,7	7,6	24	-	-	22	23	23
10/09/2008	-	-	7,6	8,0	7,4	27	-	-	26	26	25
18/09/2008	-	-	7,7	-	-	27	-	-	24	-	-
23/09/2008	7,4	7,0	7,2	-	-	25	24	24	25	-	-
25/06/2009	7,2	7,0	7,7	8,1	8,2	23	22	22	21	22	22
02/07/2009	7,1	7,0	8,6	8,4	8,5	28			28	27	27
15/07/2009	7,1	6,9	7,6	8,0	8,0	26	25	24	24	24	25
22/07/2009	7,2	7,1	8,0	8,2	8,1	29	27	27	28	27	27
13/08/2009	7,3	7,1	8,1	8,6	8,2	26	26	25	25	25	25
26/08/2009	7,3	6,7	7,9	8,0	8,3	27	24	23	24	23	23
09/09/2009	7,1	7,0	7,6	8,1	8,1	26	25	25	25	24	24
17/09/2009	7,4	6,9	7,6	7,9	7,9	26	25	24	24	23	23
23/09/2009	7,0	6,8	7,3	7,7	7,7	23	25	25	24	24	24

Tabela B.3.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 03 – filtro percolador.

Data	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)					OD (mg/L)			Vazão(m ³ /d)	
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp	FpL	Fp
14/08/2008	-	-	420	240	260	0,0	5,4	4,8	3,2	5,0
20/08/2008	-	-	420	240	300	0,1	5,1	4,7	4,2	6,9
26/08/2008	-	-	400	220	280	0,0	6,8	5,8	2,2	3,6
28/08/2008	-	-	600	300	260	0,0	6,3	5,2	4,3	5,6
02/09/2008	-	-	420	260	260	0,1	5,4	4,8	3,2	4,3
04/09/2008	-	-	420	400	380	0,0	7,7	7,6	4,5	6,9
10/09/2008	-	-	460	380	360	0,0	5,6	7,0	4,8	0,4
18/09/2008	-	-	520	-	-	0,0	-	-	-	-
23/09/2008	400	440	420	-	-	0,0	-	-	-	-
25/06/2009	340	440	400	340	340	3,7	4,4	5,0	5,0	6,0
02/07/2009	320	420	400	280	280	6,4	5,1	5,9	5,6	6,9
15/07/2009	340	420	400	260	240	1,3	4,3	4,7	4,3	5,0
22/07/2009	320	420	400	260	260	6,8	6,3	5,9	4,5	5,4
13/08/2009	360	440	400	360	300	5,9	5,7	5,9	3,9	5,0
26/08/2009	340	400	320	300	340	4,5	5,7	5,5	3,7	5,2
09/09/2009	160	380	360	300	260	4,3	5,8	6,1	4,5	5,0
17/09/2009	340	400	380	280	240	0,6	7,3	6,2	4,5	4,7
23/09/2009	140	380	360	260	240	0,5	6,9	7,1	5,7	4,6

Figura B.3.1: Série histórica de pH no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.2: Série histórica de alcalinidade no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.3: Série histórica de temperatura no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.4: Série histórica de OD no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.5: Série histórica - taxa de aplicação hidráulica no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

B.3.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela B.3.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 03 – filtro percolador.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)	DBO Total (mg/L)	DBO Filtrada (mg/L)
26/08/08	292	124	82	14	45	9	86	10
26/06/09	354	122	116	23	83	19	67	19
02/07/09	473	129	109	15	70	11	-	6
15/07/09	251	100	77	21	63	11	61	13
16/07/09	437	117	94	16	107	12	104	11
13/08/09	364	120	84	15	102	14	84	13
26/08/09	334	104	55	10	56	11	61	10
09/09/09	162	81	52	13	64	9	60	9
23/09/09	273	106	54	22	50	10	61	9

Figura B.3.6: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DBO no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.7: Série histórica de DBO total no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.8: Série histórica de DBO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Tabela B.3.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 03 – filtro percolador.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)
26/08/2008	1117	613	328	141	285	126	213	123
26/06/2009	762	238	366	65	270	65	248	72
02/07/2009	740	231	388	69	277	73	273	73
15/07/2009	941	265	247	82	169	63	161	43
22/07/2009	857	190	229	30	213	30	206	38
13/08/2009	790	133	217	34	225	53	225	53
26/08/2009	575	132	170	8	143	19	132	-
23/09/2009	590	110	188	76	160	64	160	64

Figura B.3.9: Série histórica - taxa de aplicação superficial de DQO no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.10: Série histórica de DQO bruta no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.11: Série histórica de DQO filtrada no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Tabela B.3.5: Dados de sólidos totais, fixos e voláteis durante a fase 02 – filtro percolador.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
26/08/2008	910	660	700	720	660	450	390	400	410	390	460	270	300	310	270
02/07/2009	800	560	690	680	570	370	350	290	340	320	430	210	400	340	250
15/07/2009	850	540	540	560	560	450	340	360	330	560	400	200	180	230	-
22/07/2009	920	570	600	650	620	410	350	340	360	370	510	220	260	290	250
13/08/2009	720	540	550	620	570	400	370	380	380	370	320	170	170	240	200
26/08/2009	1050	520	490	540	480	510	330	300	330	300	540	190	190	210	180
09/09/2009	480	490	520	550	530	220	310	330	310	340	260	180	190	240	190
23/09/2009	560	510	480	510	510	240	290	300	290	310	320	220	180	220	200

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

Tabela B.3.6: Dados de sólidos totais voláteis, fixos e voláteis durante a fase 03 – filtro percolador.

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
26/08/2008	266	74	186	152	86	46	8	36	6	16	10	220	66	150	163
27/08/2008	318	74	238	158	160	52	12	34	18	14	266	62	204	140	146
02/07/2009	244	68	286	146	144	40	8	20	12	10	204	60	266	134	134
15/07/2009	338	72	118	80	74	64	6	16	6	10	274	66	102	74	64
22/07/2009	322	70	166	156	124	54	16	30	32	28	268	54	136	124	96
13/08/2009	362	44	142	166	162	50	4	26	24	22	312	40	116	142	140
26/08/2009	294	62	108	88	70	52	8	12	12	64	242	54	96	76	6
09/09/2009	252	54	120	72	86	92	10	16	-	-	160	44	104	80	80
23/09/2009	428	50	82	64	54	154	4	14	8	2	274	46	68	56	52

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

Figura B.3.12: Série histórica de ST no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.13: Série histórica de STV no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.14: Série histórica de SST no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.15: Série histórica de SSV no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

B.3.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela B.3.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 03 - lagoas piloto.

Data	NTK – mgN-NTK/L					N.Amon – mgN-NH ₃ /L					Nitrito – mgN-NO ₂ /L			Nitrato – mgN-NO ₃ /L		
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL
14/08/2008	-	-	-	-	-	-	-	43	20	19	-	5,2	6,7	-	13,8	14,7
20/08/2008	-	-	-	-	-	-	-	41	23	16	-	4,1	7,3	-	10,5	12,4
26/08/2008	-	-	72	31	19	-	-	39	11	15	-	5,5	7,1	-	18,1	17,5
28/08/2008	-	-	55	36	37	-	-	48	22	15	-	2,7	4,3	-	12,3	12,7
02/09/2008	-	-	67	41	65	-	-	36	14	12	-	3,7	4,5	-	19,7	14,3
04/09/2008	-	-	50	41	28	-	-	38	20	20	-	2,7	3,9	-	14,8	10,6
10/09/2008	-	-	80	-	45	-	-	31	4	11	-	3,5	3,0	-	6,2	11,8
18/09/2008	-	-	57	-	-	-	-	49	-	-	-	-	-	-	-	-
23/09/2008	94	62	90	-	-	54	50	39	-	-	-	-	-	-	-	-
26/06/2009	64	52	61	49	53	31	48	34	29	31	-	3,5	3,2	-	0,4	0,0
01/07/2009	58	44	72	42	38	28	46	35	22	21	-	8,2	10,8	-	1,9	1,0
15/07/2009	57	54	63	34	30	31	48	37	17	18	-	11,8	14,2	-	6,0	4,0
22/07/2009	54	50	60	34	32	28	47	36	16	17	-	11,9	9,8	-	6,0	7,9
13/08/2009	58	60	52	41	28	32	55	38	25	35	-	5,5	2,0	-	4,0	0,9
26/08/2009	49	57	50	35	43	32	49	34	22	30	-	5,9	2,3	-	4,7	5,0
09/09/2009	28	54	51	34	38	14	48	37	19	26	-	6,9	6,7	-	5,8	2,3
17/09/2009	59	52	38	26	29	45	46	34	17	19	-	9,7	9,2	-	6,6	3,0
23/09/2009	40	37	49	28	30	13	44	35	18	19	-	8,4	7,2	-	6,2	4,0

Figura B.3.16: Série histórica - taxa de aplicação superficial de NTK do filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.17: Série histórica de NTK no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.18: Série histórica de nitrogênio amoniacal no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.19: Série histórica de nitrito no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Figura B.3.20: Série histórica de nitrato no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

Tabela B.3.8: Dados de fósforo solúvel durante a fase 03 – filtro percolador.

Data	Fósforo solúvel (mg/L-PO ₄ -3/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Filtro Pedra	Filtro Plástico
26/08/08	4,32	7,49	0,08	1,55	3,98
26/06/09	3,28	5,67	0,15	0,47	0,69
02/07/09	3,65	5,64	0,17	0,18	1,19
15/07/09	4,03	5,49	0,08	0,21	0,20
22/07/09	3,71	5,74	0,00	0,00	0,00
13/08/09	4,02	5,68	0,00	0,00	0,00
26/08/09	4,26	5,23	0,00	0,00	0,00
23/09/09	4,14	5,53	0,28	2,15	1,45

Figura B.3.21: Série histórica de fósforo solúvel no filtro com meio suporte de pedra e anel plástico – Fase 03

B.4. TABELAS E GRÁFICOS DAS SÉRIES HISTÓRICAS - FASE 04

B.4.1. Dados de controle

Tabela B.4.1: Dados de pH e temperatura durante a fase 04 – filtro percolador.

Data	pH						Temperatura (°C)					
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp	Ar	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp	
14/10/2009	7,3	7,0	8,5	7,6	7,6	32	27	28	28	27	27	
21/10/2009	7,3	7,0	7,7	7,8	7,8	32	28	27	29	28	28	
28/10/2009	7,2	6,9	7,5	7,9	7,8	34	28	27	28	27	27	
18/11/2009	7,2	7,2	8,6	8,1	7,8	36	30	29	32	31	30	
03/12/2009	7,4	6,8	7,55	8,03	7,88	32			28	28	28	

Tabela B.4.2: Dados de alcalinidade, OD e vazão durante a fase 04 – filtro percolador.

Data	Alcalinidade (mgCaCO ₃ /L)					OD (mg/L)			Vazão(m ³ /d)	
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	FpL	Fp	Facultativa	FpL	Fp	FpL	Fp
14/10/2009	340	400	360	160	180	9,9	4,2	4,6	6,3	7,3
21/10/2009	320	380	360	220	200	1,2	3,8	3,8	6,5	7,6
28/10/2009	320	360	360	260	220	2,7	5,2	5,0	6,0	7,3
18/11/2009	320	400	340	260	200	12,0	4,0	3,9	9,5	10,7
03/12/2009	400	340	320	260	240	0,7	4,5	4,3	9,5	10,4

B.4.2. Dados de matéria orgânica e sólidos

Tabela B.4.3: Dados de DBO total e filtrada durante a fase 04 – filtro percolador.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DBO Total (mg/L)	Total (mg/L)	Total (mg/L)	Filtrada (mg/L)	Total (mg/L)	Filtrada (mg/L)	Total (mg/L)	Filtrada (mg/L)
14/10/09	301	129	60	20	159	14	173	14
28/10/09	359	122	57	18	143	11	98	11
19/11/09	444	97	60	12	76	11	104	9
03/12/09	187	76	28	15	36	10	32	15

Tabela B.4.4: Dados de DQO total e filtrada durante a fase 04 – filtro percolador.

Data	Bruto	Anaerobia	Facultativa		Filtro de Pedra		Filtro de Plástico	
	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)	DQO Total (mg/L)	DQO Filtrada (mg/L)
14/10/2009	728	155	233	-	373	54	272	19
28/10/2009	814	235	161	63	141	39	180	43
19/11/2009	1000	98	149	12	176	20	147	24
03/12/2009	702	413	165	50	119	31	269	31

Tabela B.4.5: Dados de ST, STF e STV durante a fase 04 – filtro percolador.

Data	ST (mg/L)					STF (mg/L)					STV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
14/10/2009	1062	750	737	1075	975	488	425	425	475	475	575	325	313	600	500
28/10/2009	1050	675	638	713	713	537	425	400	425	438	512	250	238	288	275
19/11/2009	1187	725	800	1175	1075	463	375	387	400	425	725	350	413	775	650
13/12/2009	1012	700	600	600	587	462	400	350	338	338	550	300	250	263	250

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

Tabela B.4.6: Dados de SST, SSF e SSV durante a fase 04 – filtro percolador.

Data	SST (mg/L)					SSF (mg/L)					SSV (mg/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL
14/10/2009	198	52	140	280	236	34	6	20	30	28	164	46	120	250	208
28/10/2009	270	54	80	60	104	38	2	12	4	6	232	52	68	56	98
19/11/2009	324	62	234	190	202	50	8	26	16	22	274	54	208	174	180
13/12/2009	278	78	98	56	54	52	18	14	6	6	226	60	84	50	48

Obs.: Fp = filtro percolador preenchido com pedra britada e FpL= filtro preenchido com anel plástico.

B.4.3. Série nitrogenada e fósforo solúvel

Tabela B.4.7: Dados de NTK, nitrogênio amoniacal durante a fase 04 - lagoas piloto.

Data	NTK – mgN-NTK/L					N.Amon – mgN-NH ₃ /L					Nitrito – mgN-NO ₂ /L			Nitrato – mgN-NO ₃ /L		
	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Bruto	anaeróbia	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL	Facultativa	Fp	FpL
14/10/2009	50	56	49	38	34	28	46	30	6	5				8,1	7,8	13,6 14,8
21/10/2009	-	48	47	28	26	28	43	30	11	13				6,2	7,7	10,6 9,0
28/10/2009	56	36	47	25	31	28	43	31	13	19				8,4	9,0	ND ND
18/11/2009	55	65	39	35	31	27	43	25	7	15				5,2	7,7	
03/12/2009	89	48	42	26	31	69	41	28	16	20				2,9	5,1	

Tabela B.4.8: Dados de fósforo solúvel durante a fase 04 – filtro percolador.

Data	Fósforo solúvel (mg/L-PO ₄ -3/L)				
	Bruto	Anaeróbia	Facultativa	Filtro Pedra	Filtro Plástico
14/10/09	4,1	5,5	0,3	2,2	1,5
28/10/09	3,6	4,9	0,1	0,3	0,2
19/11/09	4,0	5,1	0,5	1,1	0,5
03/12/09	6,8	4,8	1,7	1,7	2,2

APÊNDICE C- MONITORAMENTO DA CLOROFILA-A NO FILTRO PERCOLADOR

C.1. TABELA DA SÉRIE HISTÓRICA - CLOROFILA-A

Tabela C.1: Dados de clorofila-a – filtro percolador.

Data	TAH m ³ /m ² .d	Clorofila-a (µg/L)		
		Facultativa	Fp	FpL
27/02/08	4,8	218,72	319,136	266,976
12/03/08	4,8	3004,52	2824,36	2631,976
27/03/08	12	773,52	776,856	567,816

APÊNDICE D: MONITORAMENTO DA CONCENTRAÇÃO DA RODAMINA WT DURANTE O ENSAIO HIDRODINÂMICO

D.1. TABELA DA SÉRIE HISTÓRICA – ENSAIO HIDRODINÂMICO

Tabela D.1: Concentração de Rodamina WT e dados para construção das curvas $E(t)$ e $F(t)$ – filtro percolador.

Dia	Horário	Tempo (h)	Conc ($\mu\text{g/L}$)	$C^*\Delta t$	$E(t)=C/Q$ (1/min)	$E(t)*dt$	$F(t)$
25/08/10	10:00	0	0		0	0	0
25/08/10	12:00	2	558,800	1117,600	0,092	0,1836	0,1836
25/08/10	14:00	4	440,970	881,940	0,072	0,1449	0,3284
25/08/10	16:00	6	334,800	669,600	0,055	0,1100	0,4384
25/08/10	18:00	8	343,000	686,000	0,056	0,1127	0,5511
25/08/10	20:00	10	308,000	616,000	0,051	0,1012	0,6523
25/08/10	22:00	12	251,200	502,400	0,041	0,0825	0,7348
25/08/10	00:00	14	228,800	457,600	0,038	0,0752	0,8099
26/08/10	02:00	16	115,430	230,860	0,019	0,0379	0,8479
26/08/10	04:00	18	83,880	167,760	0,014	0,0276	0,8754
26/08/10	06:00	20	64,310	128,620	0,011	0,0211	0,8965
26/08/10	08:00	22	45,210	90,420	0,007	0,0149	0,9114
26/08/10	10:00	24	46,310	92,620	0,008	0,0152	0,9266
26/08/10	12:00	26	21,540	43,080	0,004	0,0071	0,9337
26/08/10	14:00	28	17,990	35,980	0,003	0,0059	0,9396
26/08/10	16:00	30	14,830	29,660	0,002	0,0049	0,9445
26/08/10	18:00	32	14,390	28,780	0,002	0,0047	0,9492
26/08/10	20:00	34	20,280	40,560	0,003	0,0067	0,9558
26/08/10	22:00	36	20,080	40,160	0,003	0,0066	0,9624
26/08/10	00:00	38	20,080	40,160	0,003	0,0066	0,9690
26/08/10	02:00	40	16,090	32,180	0,003	0,0053	0,9743
27/08/10	04:00	42	14,240	28,480	0,002	0,0047	0,9790
27/08/10	06:00	44	16,680	33,360	0,003	0,0055	0,9845
27/08/10	08:00	46	17,360	34,720	0,003	0,0057	0,9902
27/08/10	10:00	48	9,130	18,260	0,001	0,0030	0,9932
27/08/10	12:00	50	6,990	13,980	0,001	0,0023	0,9955
27/08/10	14:00	52	5,090	10,180	0,001	0,0017	0,9971
27/08/10	16:00	54	3,830	7,660	0,001	0,0013	0,9984
27/08/10	18:00	56	4,850	9,700	0,001	0,0016	1,0000