

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO**  
**CENTRO TECNOLÓGICO**  
**PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA AMBIENTAL**

***JANINE CABRAL AVELAR***

***AVALIAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA (LD)***  
***COMO LEITO CULTIVADO E LEITO FILTRANTE***  
***NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE***  
***REATOR UASB COMPARTIMENTADO***

VITÓRIA, 2008.

***JANINE CABRAL AVELAR***

***AVALIAÇÃO DA ESCÓRIA DE ACIARIA (LD)  
COMO LEITO CULTIVADO E LEITO FILTRANTE  
NO PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE  
REATOR UASB COMPARTIMENTADO***

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre em Engenharia Ambiental.

Orientador: Prof. Dr. Sérgio Túlio Alves Cassini.

VITÓRIA, 2008.

À minha família pelo amor, apoio  
e incentivo.

## *Agradecimentos*

Agradeço sempre a Deus, o qual me ilumina na fé, esperança e caridade. Através de seu Amor e Compaixão foi possível atingir cada meta estabelecida em minha vida, concedendo-me saúde, paz e sabedoria. A Nossa Senhora, que com seu Amor de mãe me carrega em seus braços e me protege contra as adversidades.

Agradecimentos são meras expressões em relação à gratidão que sinto por meus pais: Manoel e Edna. Obrigado pai, obrigado mãe, por todo apoio, pelo carinho, pela educação e ensinamento de amor à vida, dentre muitas outras ações em meu favor. Sem presença de vocês não haveria caminho a trilhar!

As minhas irmãs Adriana e Janaina, que sempre estiveram ao meu lado com uma palavra ou gesto de afeto e incentivo.

Aos meus sobrinhos Ícaro e Julia que enchem de alegria e de amor os meus dias e o meu coração.

Ao Saulo. Principalmente na reta final, esteve sempre ao meu lado com muita alegria, carinho, paciência e compreensão.

Ao professor Sérgio Túlio pela paciência, orientação e ensinamentos.

Ao professor Ricardo Franci pela co-orientação.

Ao grupo de pesquisa do projeto CST-SLAG: Alex, Fernando, Kellinara, Pedro e Winston, pela dedicação à pesquisa e apoio nos momentos difíceis.

A Banca Examinadora: Prof. Valderi D. Leite, Prof. Florindo S. Braga e Eugênio Agrizzi pela disponibilidade em me avaliar e pelas sugestões dadas neste trabalho.

A todos os amigos do LABSAN e da ETE, Marjorye, Fernanda, Priscilla, Érika, Emília, Eduardo, Paula, Pedro, Catarina, Juliana, Renata S., Amaury, Camila, Renata I., dentre outros, que somaram muita sabedoria e muitas alegrias à minha vida.

As grandes amigas Caline e Larissa, e ao amigo Yuri por todo companheirismo, carinho e paciência. Aos amigos de perto e aos de longe, que mesmo não sendo citados, foram lembrados.

As companheiras de todos os dias Celiane, Gabrielle e Luciana, que foram minha família aqui em Vitória.

A Arcelor Mittal Tubarão e CAPES pelo apoio financeiro.

“Tudo posso naquele que me fortalece”.

Filipenses, 4:13

## *Resumo*

Esta pesquisa tem o objetivo de avaliar a escória de aciaria LD como leito fixo construído de áreas úmidas no pós-tratamento de efluentes de reator UASB. Um sistema com três tratamentos foram construídos na ETE-UFES: a) LC1 - leito cultivado com brita, areia e vegetação, usado como controle; b) LC2 - leito cultivado com escória de aciaria, areia e vegetação; c) LC3 - escória aciaria somente, sem vegetação. Os efluentes foram monitorados semanalmente pela avaliação de esgoto bruto, efluente UASB (RAC) e efluentes de LC1, LC2, LC3 pelas seguintes análises: DBO, DQO, sólidos suspensos totais (SST), fósforo total ( $P_{tot}$ ), Nitrogênio Total Kjeldahl (NTK), dureza, pH, turbidez, metais pesados e contagem microbiana, usando o meio cromogênico Collilert, métodos de acordo com APHA, 1995.

A eficiência global de remoção de matéria orgânica por  $DQO_{total}$  de 41%, 67%, 66% e 69% respectivamente, para UASB (RAC), LC1, LC2 e LC3 com fluxo de 50ml/s e 48%, 73%, 74% e 85% em relação ao fluxo de 75mL/s. A  $DBO_5$  mostrou média de remoção de 26%, 53%, 64% e 51% respectivamente, para UASB (RAC), LC1, LC2 e LC3 com fluxo de 50ml/s e 34%, 74%, 84% e 86% para o fluxo de 75mL/s. A remoção de sólidos foi ineficaz em todos os três tratamentos, mostrando acúmulo sólidos em alguns pontos o que significa que uma grande percentagem foram os sólidos dissolvidos. O LC2 e LC3 também apresentou baixíssima eficiência para a dureza e pH parâmetros devido à composição de escória do leito. A remoção de nitrogênio ocorreu em todos os LC's com eficiência de remoção variando de 30 a 44% para o fluxo de 50 mL/s e 48% para 61% para o fluxo de 75mL/s. A remoção de P foi de 31% do LC1 e 78% e 79% no LC2 e LC3, respectivamente, para um fluxo de 50ml/s. Quanto ao fluxo de 75mL/s as taxas foram de 76% para LC1, 93% e 96% para LC2 para LC3. A remoção de microrganismos também foi eficiente para os LC's, nos quais os principais resultados foram obtidos para LC3, em conformidade com a legislação brasileira para lançamento de efluentes em corpos d'água para as duas vazões experimentais, em termos de E. coli e coliformes totais. Deve-se ressaltar que todos os efluentes analisados não encontraram qualquer vestígio de metais pesados que poderiam indicar uma contaminação metálica de aço decorrente da escória do leito. Isso indica também, que a escória de aciaria poderia ser utilizado como leito fixo, sem quaisquer vestígios de contaminação do ambiente.

Palavras-chave: esgoto, leitos cultivados, escória.

## ***Abstract***

This research aims to the use of constructed wetlands or not, a simple alternative, with a view to the treatment of wastewater, through a combination of chincanas reactor the constructed wetlands. For both, were built three constructed wetlands from different configuration. CW1 was composed of crushed rock, sand and vegetation and used as controls. CW2 was composed of slag, sand and vegetation, and CW3 was composed only of slag. The analyses carried out in the effluents of the stages of treatment were: BOD<sub>5</sub>, COD<sub>t</sub>, solids, phosphorus, nitrogen, hardness, pH value, turbidity and heavy metals, made the second (APHA. 1995). The density of total coliform *E. coli* was determined by the determination of most probable number (MPN), using chromogenic substrate defined ONPG-MUG (Colilert ®), with quantification through tablet for inscriptionses. The efficiency of removal of organic matter through the analysis of DQOt are 41%, 67%, 66% and 69% respectively for RAC, CW1, CW2, CW3 in the flow of 50mL/se 48%, 73%, 74% and 85% in the flow of 75mL / s. The BOD<sub>5</sub> returned efficiency averages around 26%, 53%, 64% and 51% respectively for RAC, CW1, CW2, CW3 in the flow of 50mL/s e 34%, 74%, 84% and 86% in the flow of 75mL/s. The removal of solids was inefficient, presenting accumulation of solids in some points and indicated that most donates solid present, are dissolved. The constructed wetlands 2 and 3 also showed unsatisfactory performance parameters for the hardness and pH due to the presence of slag. In turn, the removal of nutrients has been effective in beds cultivated, with efficiencies of removing nitrogen from 30% to 44% in the flow of 50mL/s e 48% to 61% in the flow of 75mL/s. The removal of phosphorus returned rates of removal of 31% in CW1, 78% and 79% respectively in CW2 and CW3 in the flow of 50mL/s. In the flow of 75mL/s rates were 76% for CW1, 93% and 96% for CW2 to CW3. The efficiency ofCW was also perceived in the removal of microbiological contaminants, as CW3 presented results that met the existing legislation for the launching of effluents tabs on the experimental flow rates, both for total coliform as the parameter for *E. coli*. Note to be examined in the effluent were not found to indicate metal contamination of effluent by slag from steel plants, indicating that the combination of treatment systems can be an effective alternative in the removal of contaminants.

Keywords: wastewater, constructed wetlands, slag.



## *Lista de figuras*

Figura 1 – Detalhe da rizosfera e do transporte de oxigênio para as pontas das raízes.....	45
Figura 2 – Fluxograma da produção da escória de aciaria. ....	48
Figura 3 – Esquema do sistema-piloto de pós-tratamento de efluentes de Reator Anaeróbio Compartimentado. ....	52
Figura 4 – Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC). ....	53
Figura 5 – Planta baixa do RAC. ....	54
Figura 6– RAC - Corte AB.....	55
Figura 7 – RAC - Corte CD.....	55
Figura 8 – Antigo sistema RAC + Lagoa de polimento.....	56
Figura 9 – Planta baixa do sistema de tratamento de leitos cultivados. ....	56
Figura 10 – Adaptação da lagoa de polimento para leitos cultivados.....	57
Figura 11 – Esquema ilustrativo da configuração dos leitos cultivados.....	57
Figura 12 – Adaptação das plantas em casa de vegetação.....	58
Figuras 13 e 14 – Recuperação das plantas após a partida do sistema. ....	59
Figura 15 – Série histórica referente ao parâmetro $DQO_t$ no período de março de 2007 a março de 2008, com $n=23$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	63
Figura 16 – Remoção de $DQO_t$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	65
Figura 17 – Remoção de $DQO_t$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	65
Figura 18 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $DQO_t$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	66
Figura 19 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $DQO_t$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	66
Figura 20 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro $DQO_t$ nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	67

Figura 21 – Série histórica referente ao parâmetro $\text{DBO}_5$ no período de março de 2007 a março de 2008, com $n=20$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	69
Figura 22 – Remoção de $\text{DBO}_5$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	70
Figura 23 – Remoção de $\text{DBO}_5$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	70
Figura 24 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $\text{DBO}_5$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h, quanto a eficiência de remoção de matéria orgânica biodegradável.....	71
Figura 25 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $\text{DBO}_5$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h, quanto a eficiência de remoção de matéria orgânica biodegradável.....	71
Figura 26 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $\text{DBO}_5$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h, quanto a carga de saída. ....	72
Figura 27 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $\text{DBO}_5$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h, quanto a carga de saída. ....	72
Figura 28 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro $\text{DBO}_5$ nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	73
Figura 29 – Série histórica referente ao parâmetro NTK no período de março de 2007 a março de 2008, com $n=23$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	75
Figura 30 – Remoção de $\text{N-NH}_4^+$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h. ....	76
Figura 31 – Remoção de $\text{N-NH}_4^+$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. ....	76
Figura 32 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $\text{N-NH}_4^+$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	77
Figura 33 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $\text{N-NH}_4^+$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	77

Figura 34 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro NTK nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	78
Figura 35 – Série histórica referente ao parâmetro $P_{total}$ no período de março de 2007 a março de 2008, com $n=23$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	80
Figura 36 – Remoção de $P_{total}$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	81
Figura 37 – Remoção de $P_{total}$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	81
Figura 38 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $P_{TOTAL}$ no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	82
Figura 39 – Distribuição de freqüência para o parâmetro $P_{TOTAL}$ no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	82
Figura 40 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro $P_{total}$ nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	83
Figura 41 – Série histórica referente ao parâmetro coliformes totais no período de março de 2007 a março de 2008, com $n=21$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental.....	85
Figura 42 – Distribuição de freqüência para o parâmetro número de células de coliformes totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	86
Figura 43 – Distribuição de freqüência para o parâmetro número de células de coliformes totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	86
Figura 44 – Série histórica referente ao parâmetro <i>E. coli</i> no período de março de 2007 a março de 2008, com $n=21$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	88
Figura 45 – Distribuição de freqüência para o parâmetro número de células de <i>E. coli</i> no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h. ....	89

Figura 46 – Distribuição de freqüência para o parâmetro número de células de <i>E. coli</i> no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. ....	89
Figura 47 – Série histórica referente ao parâmetro sólidos suspensos totais no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	90
Figura 48 – Remoção de SST no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	91
Figura 49 – Remoção de SsT no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH de 12,5h.....	91
Figura 50 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	92
Figura 51 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	92
Figura 52 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SST nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	93
Figura 53 – Série histórica referente ao parâmetro sólidos suspensos no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	95
Figura 54 – Remoção de SS no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	96
Figura 55 – Remoção de SS no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	96
Figura 56 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SS nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	97
Figura 57 – Série histórica referente ao parâmetro sólidos dissolvidos no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	99
Figura 58 – Remoção de SD no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	100

Figura 59 – Remoção de SD no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	100
Figura 60 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SD nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	101
Figura 61 – Série histórica referente ao parâmetro dureza no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	102
Figura 62 – Remoção de dureza no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h. ....	104
Figura 63 – Remoção de dureza no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. ....	104
Figura 64 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	104
Figura 65 Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	104
Figura 66 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro dureza nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).....	106
Figura 67 – Série histórica referente ao parâmetro pH no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental. ....	108
Figura 68 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	109
Figura 69 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	109
Figura 70 – Série histórica referente ao parâmetro turbidez no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.....	110
Figura 71 – Remoção de turbidez no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h. ....	111

Figura 72 – Remoção de turbidez no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. ....	111
Figura 73 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	112
Figura 74 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.....	112
Figura 75 – Massa vegetal total obtida durante o período experimental. ....	115
Figura 76 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DQO <sub>t</sub> no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	134
Figura 77 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DQO <sub>t</sub> no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h....	134
Figura 78 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DBO <sub>5</sub> no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h. ....	135
Figura 79 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DBO <sub>5</sub> no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. ....	135
Figura 80 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro NTK no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	136
Figura 81 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro NTK no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h....	136
Figura 82 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro P <sub>total</sub> no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.....	137
Figura 83 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro P <sub>total</sub> no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h....	137
Figura 84 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro coliformes totais no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h. ....	138
Figura 85 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro coliformes totais no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. ....	138
Figura 86 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro <i>E. coli</i> no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h. ....	139
Figura 87 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro <i>E. coli</i> no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. ....	139

- Figura 88 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SST no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h..... 140
- Figura 89 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SST no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h... 140
- Figura 90 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SS no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h..... 141
- Figura 91 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SS no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h... 141
- Figura 92 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SD no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h..... 142
- Figura 93 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SD no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.... 142
- Figura 94 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro dureza no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h. 143
- Figura 95 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro dureza no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. 143
- Figura 96 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro pH no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h..... 144
- Figura 97 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro pH no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h... 144
- Figura 98 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro turbidez no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h. 145
- Figura 99 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro turbidez no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h. 145
- Figura 100 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro  $DQO_t$  nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). ..... 146
- Figura 101 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro  $DBO_5$  nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). ..... 147
- Figura 102 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro NTK nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais

aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). .....	148
Figura 103 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro $P_{total}$ nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). .....	149
Figura 104 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SST nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). .....	150
Figura 105 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SS nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). .....	151
Figura 106 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SD nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). .....	152
Figura 107 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro dureza nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria). .....	153



## *Lista de tabelas*

Tabela 1 – Processo de tratamento em ETE's em operação no Brasil.....	29
Tabela 2 – Comparação entre tipos de tratamentos biológicos.....	30
Tabela 3 – Principais tratamentos anaeróbios, associados ou não a processos aeróbios, utilizados em ETE's no Brasil.....	31
Tabela 4 - Componentes dos leitos cultivados e suas principais funções.....	33
Tabela 5 – Variações do sistema de escoamento superficial.....	35
Tabela 6 – Mecanismos de depuração de leitos cultivados para tratamento de águas residuárias. ....	36
Tabela 7 – Aceptores de elétrons típicos das reações de oxidação no tratamento de esgotos (listados em ordem decrescente de liberação de energia) ...	37
Tabela 8 – Organismos patogênicos comumente encontrados em esgotos. ....	42
Tabela 9 – Algumas espécies de macrófitas testadas para o uso em processos de tratamento de.....	44
Tabela 10 – Composição química da escória de aciaria (% em peso).....	51
Tabela 11 – Composição dos leitos cultivados.....	58
Tabela 12 – Resumo de metodologias das análises físico-químicas. ....	60
Tabela 13 – Comparações entre afluente e efluente em pesquisas com sistemas de tratamento de esgotos realizadas no Núcleo água (UFES).....	64
Tabela 14 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de matéria orgânica.....	68
Tabela 15 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de nitrogênio.....	79
Tabela 16 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de fósforo.....	84
Tabela 17 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de coliformes totais.....	87
Tabela 18 – Resultados obtidos nas análises de metais. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente), ALD (abaixo do limite de detecção do aparelho- abaixo de $10^{-6}$ ).....	113

Tabela 19 – Resultados médios obtidos nas análises físico-químicas, com n= 16, exceto para DBO cujo n= 13. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente). .....	128
Tabela 20 – Eficiências médias obtidas nas análises físico-químicas, com n= 16, exceto para DBO cujo n= 13. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente), ALD (abaixo do limite de detecção do aparelho- abaixo de $10^{-6}$ ). .....	129
Tabela 21 – Resultados médios obtidos nas análises físico-químicas, com n= 7. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente). .....	130
Tabela 22 – Eficiências médias obtidas nas análises físico-químicas, com n=7. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente), ALD (abaixo do limite de detecção do aparelho- abaixo de $10^{-6}$ ) .....	131
Tabela 23 – Resultados obtidos nas análises microbiológicas, com n= 14. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente).....	132
Tabela 24 – Resultados obtidos nas análises microbiológicas, com n= 7. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente).....	133

## *Lista de siglas*

ABM	Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais
CONDEMA	Conselho Municipal de Meio Ambiente
CONAMA	Conselho Nacional do Meio Ambiente
DBO	Demanda Bioquímica de Oxigênio
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ES	Espírito Santo
ETE	Estação de Tratamento de Esgotos
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
INMET	Instituto Nacional de Meteorologia
LABSAN	Laboratório de Saneamento da UFES
RAC	Reator Anaeróbio Compartimentado
LC1	Leito cultivado 1
LC2	Leito cultivado 2
LC3	Leito 3
n	Número de amostras
NBR	Norma Brasileira
NMP/100 ml	Número mais provável por 100 mililitros
OD	Oxigênio Dissolvido
pH	Potencial Hidrogeniônico
PNAD	Pesquisa Nacional por amostra de Domicílio
PROSAB	Programa de Pesquisa em Saneamento Básico
SD	Sólidos Dissolvidos
SST	Sólidos Suspensos Totais
ST	Sólidos Totais
UFES	Universidade Federal do Espírito Santo
UNT	Unidade Nefelométrica de Turbidez
USEPA	United States Environmental Protection Agency

# Sumário

<b>1. INTRODUÇÃO</b> .....	<b>24</b>
<b>2. OBJETIVOS</b> .....	<b>25</b>
2.1 OBJETIVO GERAL .....	25
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS .....	25
<b>3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>26</b>
3.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS .....	26
3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO EM SISTEMAS ANAERÓBIOS .....	27
3.2.1 Tipos de tratamento de esgoto.....	28
3.2.2 Processos de tratamento e pós-tratamento de sistemas anaeróbios.....	29
3.2.3 Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC).....	32
3.3 LEITOS CULTIVADOS OU “CONSTRUCTED WETLANDS”.....	32
3.3.1 Classificação dos sistemas de leitos cultivados .....	34
3.3.2 Remoção de nutrientes em Leitos Cultivados .....	36
3.3.3 Remoção de matéria orgânica .....	36
3.3.4 Retenção e remoção de sólidos.....	38
3.3.5 Remoção da matéria nitrogenada .....	38
3.3.6 Remoção de fósforo .....	40
3.3.7 Retenção de metais pesados.....	40
3.3.8 Remoção de microrganismos patogênicos .....	41
3.3.9 A influência dos fatores abióticos nos leitos cultivados .....	43
3.3.10As Macrófitas .....	43
3.3.11 <i>Thypha angustifolia</i> L. (taboa).....	45
3.3.12 <i>Eleocharis</i> sp.....	46
3.4 ESCÓRIA DE ACIARIA (“SLAG”).....	46
3.4.1 Processo de produção de aço e geração de escória de aciaria.....	47
3.4.2 Classificação físico-química do “slag” .....	48
3.4.3 Estudos de avaliação de riscos.....	49
3.4.4 Utilização da escória de aciaria no tratamento de águas residuárias .....	50

3.4.5	Caracterização da escória de aciaria .....	50
<b>4.</b>	<b>MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>52</b>
4.1	CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA.....	52
4.2	Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC).....	53
4.3	CONTRUÇÃO DOS LEITOS.....	55
4.4	A VEGETAÇÃO.....	58
4.5	O MONITORAMENTO .....	59
4.5.1	Processo de amostragem .....	59
4.5.2	Técnicas laboratoriais .....	60
4.6	ANÁLISE DA MASSA VEGETAL .....	61
4.7	A ANÁLISE ESTATÍSTICA.....	61
<b>5.</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>62</b>
5.1	DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA O PARÂMETRO DQO .....	62
5.1.1	Dados obtidos para o parâmetro DQO.....	62
5.1.2	Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro DQO.....	66
5.2	DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA O PARÂMETRO DBO <sub>5</sub> .....	68
5.2.1	Dados obtidos para o parâmetro DBO <sub>5</sub> .....	69
5.2.2	Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro DBO .....	72
5.3	DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO NTK.....	75
5.3.1	Dados obtidos para o parâmetro NTK.....	75
5.3.2	Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro NTK.....	77
5.4	DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO P <sub>TOTAL</sub> .....	79
5.4.1	Dados obtidos para o parâmetro P <sub>total</sub> .....	80
5.4.2	Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro P <sub>total</sub> .....	83

5.5 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO COLIFORMES TOTAIS.....	85
5.5.1 Dados obtidos para o parâmetro coliformes totais .....	85
5.6 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO <i>E.coli</i> .....	87
5.6.1 Dados obtidos para o parâmetro <i>E. coli</i> .....	87
5.7 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO ST ...	89
5.7.1 Dados obtidos para o parâmetro ST .....	90
5.7.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro ST .....	92
5.8 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO SS ...	94
5.8.1 Dados obtidos para o parâmetro SS .....	94
5.8.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro SS .....	97
5.9 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO SD...	98
5.9.1 Dados obtidos para o parâmetro SD .....	98
5.9.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro SD .....	100
5.10 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO DUREZA.....	102
5.10.1 Dados obtidos para o parâmetro dureza .....	102
5.10.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro dureza .....	105
5.11 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO PH.	107
5.11.1 Dados obtidos para o parâmetro pH .....	107
5.12 DESEMPENHO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO TURBIDEZ .....	109
5.12.1 Dados obtidos para o parâmetro turbidez .....	109
5.13 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO METAIS.....	112
5.13.1 Dados obtidos para o parâmetro metais .....	112
5.14 ANÁLISE DO SEDIMENTO .....	114
5.15 INFLUÊNCIA DA BIOMASSA .....	114

<b>6. CONCLUSÕES.....</b>	<b>116</b>
<b>7. RECOMENDAÇÕES .....</b>	<b>120</b>
<b>8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>121</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO A.....</b>	<b>128</b>
<b>ANEXO B.....</b>	<b>130</b>
<b>ANEXO C.....</b>	<b>132</b>
<b>ANEXO D.....</b>	<b>133</b>
<b>ANEXO E.....</b>	<b>134</b>
<b>ANEXO F.....</b>	<b>146</b>

# ***1. INTRODUÇÃO***

A disposição adequada de resíduos sejam eles líquidos ou sólidos ainda constitui um problema no Brasil. O crescimento desordenado da população e das indústrias, a falta de controle do governo e o baixo conhecimento da população sobre o tema piora ainda mais este quadro.

No estado do Espírito Santo as indústrias siderúrgicas representam uma parcela significativa na geração de resíduos, como a escória de aciaria, atualmente acumulados visto que sua produção é muito maior que a capacidade de reaproveitamento do mesmo. Inúmeras pesquisas buscam aplicações para este co-produto. A presente pesquisa utiliza escória de aciaria como meio suporte em leitos cultivados, visto que a realidade brasileira no âmbito do saneamento aponta uma necessidade no desenvolvimento de tecnologias de baixo custo e simples manejo, visando ações concretas e necessárias para este setor.

Estudos realizados por Bastian & Hammer (1993) demonstram o aumento na pesquisa e utilização de leitos cultivados devido à baixa demanda energética requerida e ao menor uso de processos químicos, além de não produzir lodo e não utilizar substâncias químicas adicionais. Assim sendo, os leitos cultivados constituem uma alternativa simples, e podem ser implantados em pequenas comunidades, equivalente a 2.000 habitantes, com vistas ao tratamento de águas residuárias, como sistema de pós-tratamento.

Para a construção dos leitos cultivados, foi utilizada escória de aciaria — também denominada “slag” — como meio suporte em substituição à brita, priorizando o desenvolvimento sustentável por meio da utilização de um co-produto da siderurgia, reduzindo a retirada de um recurso natural.

---



## ***2. OBJETIVOS***

### 2.1 OBJETIVO GERAL

Esta pesquisa tem como objetivo avaliar um sistema de pós-tratamento de efluente sanitário proveniente de Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC), utilizando Leitos Cultivados (LC) modificados.

### 2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliação da remoção de matéria orgânica no sistema de pós-tratamento, comparando a eficiência de cada leito cultivado de acordo com a sua composição;
  - Análise da remoção de nutrientes do sistema de pós-tratamento, tendo em vista as diferentes configurações dos leitos cultivados;
  - Avaliação da remoção de patógenos nos sistemas de tratamento (RAC) e pós-tratamento (leitos cultivados);
  - Análise dos parâmetros turbidez, sólidos suspensos totais, pH, dureza e alguns metais pesados, estes ditos complementares para a análise do sistema de pós- tratamento de efluentes domésticos em sistemas anaeróbios com presença de escória de aciaria no leito filtrante;
  - Avaliação da influência da vegetação na eficiência do sistema de pós-tratamento em leitos cultivados.
-

### ***3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA***

#### **3.1 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO DE ÁGUAS RESIDUÁRIAS**

No Brasil, a situação do saneamento ambiental, no seu contexto mais abrangente — abastecimento de água, esgotamento sanitário, resíduos sólidos, drenagem urbana e controle de vetores — revela um quadro bastante precário, contudo se por um lado a cobertura por acesso aos serviços na área urbana apresenta uma situação razoável, o mesmo não se verifica na área rural.

De acordo com o BNDES, no Brasil, 49% do esgoto produzido é coletado através de rede e somente 10% do esgoto total é tratado. O resultado é que as Regiões Metropolitanas e grandes cidades concentram grandes volumes de esgoto coletado que é despejado sem tratamento nos rios e mares que servem de corpos receptores. Em consequência a poluição das águas que cercam nossas maiores áreas urbanas é bastante elevada, dificultando e encarecendo, cada vez mais, a própria captação de água para o abastecimento.

Para evitar problemas como o descrito anteriormente, recomenda-se o tratamento prévio do esgoto. A escolha do tipo de tratamento depende das condições mínimas estabelecidas para a qualidade da água dos mananciais receptores, função de sua utilização. Em qualquer projeto de ETE é fundamental o estudo das características do esgoto a ser tratado e da qualidade do efluente que se deseja lançar no corpo receptor. Os principais parâmetros a serem estudados são vazão, pH e temperatura, demanda bioquímica de oxigênio - DBO, demanda química de oxigênio - DQO, toxicidade e teor de sólidos em suspensão ou sólidos suspensos totais - SST.

As tecnologias de tratamento de efluentes nada mais são que o aperfeiçoamento do processo de depuração da natureza, buscando reduzir seu tempo de duração e aumentar sua capacidade de absorção, com consumo mínimo de recursos em instalações e operação e obter o melhor resultado em termos de qualidade do efluente lançado, sem deixar de considerar a dimensão da população a ser atendida. Os sistemas existentes podem ser classificados, basicamente, em dois grandes grupos: tecnologias de sistemas simplificados ou mecanizados e processos aeróbios ou anaeróbios.

---

Pesquisas realizadas no setor, principalmente pelo PROSAB (Programa de Pesquisa em Saneamento Básico), algumas tecnologias de tratamento são consideradas consolidadas. Dentre elas estão inúmeros tipos de tratamentos anaeróbios, devido a menor produção de lodo e gasto energético reduzido.

### 3.2 TRATAMENTO DE ESGOTO EM SISTEMAS ANAERÓBIOS

O esgoto sanitário pode ser definido como a junção de águas residuárias de uso doméstico, comercial, institucional e industrial. Em algumas localidades, outra parcela contribuinte do esgoto sanitário são as águas pluviais. Segundo Von Sperling (2005) a composição do esgoto é basicamente água, com aproximadamente 99,9% do total, e apenas 0,1% representam os outros componentes como matéria orgânica e inorgânica, sólidos dissolvidos e em suspensão e microrganismos.

A disposição de esgotos brutos ainda é uma realidade em corpos receptores no Brasil. Essa disposição inadequada gera problemas ambientais graves e conseqüências quanto à qualidade de vida e preservação dos recursos naturais. Para mudar esse quadro, muitas pesquisas em desenvolvimento objetivam adequar o esgoto de forma que o mesmo adquira características necessárias que atendam a legislação vigente, possibilitando seu despejo em mananciais e outros corpos receptores. Para Van Haandel & Lettinga (1994) a atenuação da carga de matéria orgânica, retirada do excesso de nutrientes e contaminantes é o que se pode denominar tratamento de esgotos.

Sabe-se que o ambiente tem a capacidade de tratar as águas residuárias por meio de reações bioquímicas realizadas por microrganismos presentes no meio, desde que sua capacidade de tratamento seja respeitada. Com a alta produção de águas residuárias e dejetos em geral, não há como manter o equilíbrio do sistema sem que a carga de poluentes seja reduzida. Objetivando reproduzir as reações do ambiente, as estações de tratamento utilizam processos biológicos para atenuação da carga poluidora.

Sabe-se que o processo de tratamento de esgoto realizado em estações de tratamento de esgotos (ETEs) consiste na montagem de um sistema visando à retirada das características indesejadas, de forma otimizada, reduzindo custos e tempo. Várias etapas são necessárias para alcançar essa meta. Essas etapas

---

variam de acordo com as características e a quantidade do efluente tratado, a capacidade de autodepuração do corpo receptor, além de custos e operação do sistema. As principais etapas do tratamento são: primária, secundária e terciária.

O tratamento primário engloba a retirada de sólidos grosseiros, óleos e graxas ou outro componente que possa prejudicar as etapas posteriores. Geralmente utilizam-se grades, caixas retentoras de areia, peneiras e decantadores primários para tal etapa; o tratamento secundário acha-se voltado para a etapa biológica do sistema, na qual prioriza a retirada de compostos carbonáceos por meio da manutenção metabólica das bactérias, que aproveitam os nutrientes para reprodução e manutenção da biomassa, sendo realizada em aerobiose ou anaerobiose. Para estações de tratamento geralmente são utilizados processos anaeróbios, pois a formação de biomassa é menor quando comparada ao processo aeróbio (ANDRADE NETO, 1997; CAMPOS, 1994).

Apesar da retirada de compostos orgânicos no tratamento secundário, ainda encontra-se presente no efluente grande quantidade de nutrientes, principalmente nitrogênio e fósforo, causadores do processo de eutrofização. A alternativa para o problema é o tratamento terciário, normalmente baseado em processos biológicos como também ocorre no tratamento secundário, mas que pode ser realizado utilizando tratamento químico, por exemplo, o sulfato de alumínio. Ao término dessa fase, ainda é pendente a remoção de organismos patogênicos (VON SPERLING, 2005).

### 3.2.1 Tipos de tratamento de esgoto

Boller (1997) esclarece que em se tratando de estações de tratamento de esgoto de pequeno porte, características como simplicidade, confiabilidade e economia são fundamentais ao processo de escolha pela tecnologia de tratamento.

Souza (2005) afirma que em comparação com as grandes estações, o projeto de estações de pequeno porte, independente do nível de tratamento e do destino final do efluente, deve respeitar aspectos básicos, como: a variação de vazão afluente, a variação de carga de poluentes afluente, a escassez de operadores habilitados, os baixos custos de operação e manutenção, a sustentabilidade do sistema, a flexibilidade quanto a expansões e aprimoramentos futuros e a interação positiva com as comunidades próximas.

---

Nota-se que, para as pequenas estações, a variedade de opções tecnológicas é muito maior que para estações de maior porte, abrangendo desde os simples tanques sépticos aos sofisticados mecanismos de remoção de nutrientes.

Atualmente as principais formas de tratamento de esgoto são baseadas na retirada de matéria orgânica, seja na forma dissolvida ou em suspensão, utilizando para tanto o metabolismo bacteriano, no qual os microrganismos por meio de reações químicas transformam a matéria orgânica em nutrientes para seu crescimento e reprodução, e liberam água e dióxido de carbono. No caso de anaerobiose, outro produto metabólico é metano (VON SPERLING, 2005).

Dentre as possíveis opções de tratamento de esgotos para estações de pequeno porte, algumas são descritas por Souza (2005) como as principais opções tecnológicas aplicadas no Brasil, conforme se pode observar na tabela 1.

Tabela 1 – Processo de tratamento em ETE's em operação no Brasil.

Fonte: (Adaptado de O SANEAMENTO (2002) por SOUZA (2005).

<b>Processo de Tratamento</b>	<b>Número de localidades no Brasil</b>
<b>Filtração biológica</b>	<b>331</b>
<b>Lodos ativados</b>	<b>227</b>
<b>Reatores anaeróbios</b>	<b>297</b>
<b>Valos de oxidação</b>	<b>28</b>
<b>Lagoas anaeróbias</b>	<b>312</b>
<b>Lagoas aeróbias</b>	<b>136</b>
<b>Lagoas aeradas</b>	<b>61</b>
<b>Lagoas facultativas</b>	<b>375</b>
<b>Lagoas de maturação</b>	<b>75</b>
<b>Tanques sépticos</b>	<b>171</b>

### 3.2.2 Processos de tratamento e pós-tratamento de sistemas anaeróbios

A importância dos microrganismos é historicamente reconhecida pela humanidade, bem como a utilização para produção de alimentos é bastante antiga e de grande valor, contudo, no que diz respeito tratamento de esgoto, pode-se considerar que é uma alternativa relativamente recente, tendo pouco mais de um século de utilização. Neste item serão apresentados os conceitos envolvidos e as principais etapas do processo anaeróbio, o qual privilegia processos catabólicos, ou seja, de desassimilação. Para tanto, buscou-se diversos trabalhos de revisões bibliográficas

sobre o processo anaeróbio, tais como: Van Haandel e Lettinga (1994); e Speece (1983).

De acordo com Van Haandel e Lettinga (1994) esse processo é complexo e pode ser dividido em quatro etapas: hidrólise, acidogênese, acetogênese e metanogênese. Para Speece (1983) os principais fatores controladores do processo são pH, temperatura, disponibilidade de nutrientes e ausência de compostos tóxicos. Já para Povinelli (1994), a digestão anaeróbia é um processo de estabilização da matéria orgânica biodegradável, que ocorre na ausência de oxigênio, realizado em várias etapas por diversas espécies de bactérias. Abaixo, na tabela 2, estão relacionadas as principais vantagens e desvantagens do processo em questão.

Tabela 2 – Comparação entre tipos de tratamentos biológicos.

Fonte: Adaptado de VON SAPERLING (2005).

<b>Tratamento Anaeróbio</b>	
<b>Vantagens</b>	<b>Desvantagens</b>
Menor produção de lodo	Longo período de partida do sistema
Possibilidade de recuperação e utilização do gás metano	Sensibilidade a mudanças ambientais
Baixo consumo energético	Possível emissão de odores desagradáveis

Nos últimos anos, diversos pesquisadores (PHILIPPI e SEZERINO, 2004; VON SAPERLING, 2005) observaram que as associações do tipo anaeróbio + aeróbio poderiam constituir-se em uma tecnologia eficiente na remoção de matéria orgânica. Em ambientes alagados, como brejos e mangues, esses processos ocorrem naturalmente, visto que as plantas desenvolvem papel prioritário na inserção de O<sub>2</sub> por meio da região da rizosfera. Esses pesquisadores reproduziram o processo utilizando leitos cultivados, também denominados “wetlands” construídos, alagados construídos ou terras úmidas. Os principais tipos de tratamento anaeróbio, associados ou não a processos aeróbios, utilizados em estações de tratamento de esgotos (ETEs) no Brasil e suas eficiências de remoção dos principais poluentes estão relacionados na tabela 3.

Tabela 3 – Principais tratamentos anaeróbios, associados ou não a processos aeróbios, utilizados em ETE's no Brasil.

Fonte: Adaptado de VON SPERLING (2005).

Sistemas	Qualidade média do efluente					Eficiência média de remoção				
	DQO (mg/L)	DBO <sub>5</sub> (mg/L)	SS (mg/L)	P <sub>TOTAL</sub> (mg/L)	CF (NMP/100 mL)	DQO (%)	DBO <sub>5</sub> (%)	SS (%)	P <sub>TOTAL</sub> (%L)	CF (unid. log)
Tanque séptico	400-450	200-250	100-150	> 4	10 <sup>7</sup> -10 <sup>8</sup>	25-35	30-35	55-65	< 35	< 1
Tanque séptico + filtro anaeróbio	100-200	40-80	30-60	> 4	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	70-80	80-85	80-90	< 35	1-2
Lagoa facultativa	120-200	50-80	60-90	> 4	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	65-80	75-85	70-80	< 35	1-2
Lagoa anaeróbia + Lagoa facultativa	120-200	50-80	60-90	> 4	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	65-80	75-85	70-80	< 35	1-2
Escoamento superficial	100-150	30-70	20-60	> 4	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	75-85	80-90	80-93	< 35	2-3
Leitos cultivados	100-150	30-70	20-40	> 4	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	75-85	80-90	87-93	< 35	3-4
UASB + biofiltro aerado submerso	60-150	20-50	20-40	> 4	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	75-88	83-93	87-93	< 35	1-2
UASB + filtro anaeróbio	100-200	40-80	30-60	> 4	10 <sup>6</sup> -10 <sup>7</sup>	70-80	75-87	80-90	< 35	1-2
UASB + escoamento superficial	90-180	30-70	20-60	> 4	10 <sup>4</sup> -10 <sup>6</sup>	70-85	77-90	80-93	< 35	2-3
UASB + lagoa de polimento	100-150	40-70	50-80	> 4	10 <sup>2</sup> -10 <sup>4</sup>	70-83	77-87	73-83	> 50	3-5

### 3.2.3 Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC)

O Reator Anaeróbio Compartimentado é uma unidade de tratamento baseado na utilização de microrganismos, que por meio de seu metabolismo degradam matéria orgânica. Possui configuração simples, com divisões internas que buscam aumentar o tempo de detenção hidráulica possibilitando maior contato entre a biomassa e o efluente. A compartimentação presente possibilita a exploração da separação das fases da digestão anaeróbia (GROBICKI & STUCKEY, 1991).

Iza *et al.* (1991) esclarece que o conceito dos reatores anaeróbios para tratamento de esgotos é baseado em três aspectos fundamentais: o acúmulo de biomassa no interior do reator, o contato entre a biomassa e o efluente a ser tratado, e intensificação da atividade microbológica.

Segundo Barros e Campos (1992) o RAC tem como princípio de funcionamento a introdução do efluente junto ao fundo das câmaras do reator visando explorar o efeito favorável dos reatores anaeróbios de manta de lodo e a compartimentação do reator, podendo-se explorar a separação das fases da digestão anaeróbia.

### 3.3 LEITOS CULTIVADOS OU “CONSTRUCTED WETLANDS”

Dentre as soluções simplificadas propostas para o tratamento de águas residuárias, ricas em matéria orgânica, distingue-se a disposição em leitos cultivados por ser forma viável, simples e barata para o seu tratamento. De acordo com Philippi e Sezerino (2004), neste tipo de tratamento as fontes de energia não são as mesmas dos sistemas convencionais, nos quais as mais comuns são eletricidade, carvão ou gás (no caso de usinas térmicas). Já nos sistemas naturais, embora a quantidade energia requerida seja a mesma, as fontes são energias renováveis como radiação, cinética de ventos, energia química das águas e gradiente hidráulico.

Pertinente é observar, levando-se em consideração o regime hidrológico, que leitos cultivados é um termo que se refere a sistemas inundados ou saturados por águas subterrâneas ou superficiais em frequência e duração suficientes para manter as condições do meio predominantemente saturadas (USEPA, 1988). Nestes sistemas predominam interações entre processos (químicos, físicos e biológicos) e agentes (plantas, solo, animais, luz solar e outros), cujo objetivo é reciclar a matéria orgânica

---



e os nutrientes, além da disponibilização dos mesmos para os agentes supracitados (PHILIPPI e SEZERINO, 2004).

Esses sistemas têm como os principais componentes o meio suporte, que pode ser solo, areia, brita, ou outro material, bem como espécies vegetais características de áreas alagadas, e ainda a fauna associada a estes elementos, que são os principais responsáveis pela remoção dos contaminantes da água residuária, além do regime hidráulico (VALENTIM, 2003). Igualmente, a associação das plantas com os microrganismos é outra importante atuação da vegetação que consiste em produzir ambientes aeróbios próximos a região da rizosfera. Região esta na qual também ocorre o tratamento biológico aeróbio do efluente (CUNHA, 2006). No leito denominado LC3, presente neste trabalho, não ocorre a interação das plantas com o sistema, visto que o leito não é vegetado.

A título de esclarecimento, a tabela 4 mostra as principais informações sobre os componentes de leitos cultivados.

Tabela 4 - Componentes dos leitos cultivados e suas principais funções.  
Fonte: Adaptado de PHILIPPI e SEZERINO (2004).

Solo	Plantas	Regime Hidráulico	Fauna
Atua como suporte físico para as plantas	Produzem o carbono capaz de manter as comunidades microbianas heterotróficas	Determina a saturação do solo	Composta por bactérias, protozoários, fungos e animais
Disponibiliza maior área superficial reativa	Aumenta a área de contato e aderência do biofilme por meio de raízes, caule e rizomas	Determina a via bioquímica predominante no processo: aeróbia, anaeróbia ou anóxica	Promove a manutenção das condições de vida no meio (destaca-se a circulação de nutrientes)
Serve como meio de aderência para população microbiana	Impede a colmatação do solo	Indica as condições de oxigenação	Promove simbiose com outros organismos
Promove a remoção de compostos orgânicos e inorgânicos por processos físicos e químicos	Transportam oxigênio até as raízes promovendo condições aeróbias	É uma ferramenta mundial de classificação dos wetlands, sejam naturais ou construídos	Os organismos quimioautotróficos associam-se a remoção de matéria orgânica e transformações de nitrogênio

Embora neste trabalho, em especial, será utilizado como meio suporte a escória de aciaria (“slag”), um resíduo da produção do aço proveniente da empresa Arcelor

Mittal Tubarão em substituição à brita, promovendo conseqüentemente o desenvolvimento sustentável, visto que poderá reduzir a extração de um recurso mineral, além de promover a utilização de um resíduo sólido. Necessário se faz uma distinção básica — a partir do grau de controle dos processos naturais — entre os leitos cultivados e as várzeas naturais, em outras palavras, os leitos cultivados operam com vazão afluyente controlada e relativamente estável, pois se trata de um sistema de tratamento, em contraste com a grande variabilidade da vazão encontrada nos ambientes naturais. Como resultado, os organismos que vivem nos leitos cultivados são mais susceptíveis às variações de vazão, da concentração de sólidos suspensos totais (SST), da demanda bioquímica de oxigênio (DBO) e de outros poluentes que, por vezes, apresentam valores superiores aos encontrados nas condições naturais (USEPA, 1999).

Segundo Philippi e Sezerino (2004) a utilização de plantas aquáticas no tratamento de esgotos é bastante antiga, já eram utilizadas pelos Astecas no passado. Porém, o uso das terras úmidas naturais para fins de depuração de esgotos é bem recente, ou seja, a partir do século XX. A esse respeito, Shutes (2001) afirma que o uso efetivo de sistemas alagados para o tratamento de águas residuárias ocorreu a partir da década de 40, enquanto Salati (1999) e Cunha (2006) informam que, no Brasil, esse recurso só passou a ser usado a partir de 1982. Segundo Freitas (2005) tais sistemas são largamente utilizados nos EUA, Europa, Austrália e África, no tratamento de águas residuárias de diversas origens.

### 3.3.1 Classificação dos sistemas de leitos cultivados

Os sistemas alagados podem ser classificados quanto a sua natureza, quanto aos sistemas de escoamento e quanto ao fluxo proporcionado à água residuária. Quanto à natureza, são divididos em sistemas alagados naturais e construídos. Os alagados naturais são áreas de várzea nas quais o esgoto é disposto diretamente, não havendo nenhum tipo de controle, promovendo a depuração biológica e servindo de destino final. Os alagados construídos promovem o tratamento controlado, visto que a utilização de cada componente do sistema é adequada ao efluente a ser tratado e às características finais de disposição. Subdivisões dentro deste grupo fazem parte do sistema de classificação. São elas: sistemas de lâmina livre ou escoamento

---

superficial e sistemas de escoamento sub-superficial, caso em estudo na presente pesquisa.

Os sistemas de escoamento superficial consistem de um reservatório construído no solo que servirá de suporte para o desenvolvimento radicular das macrófitas. Neste sistema predominam algas filamentosas ou macrófitas aquáticas. Em áreas mais profundas do meio suporte, predominam organismos anaeróbios e ausência de luz (IWA SPECIALIST GROUP ON USE OF MACROPHYTES, 2000). De acordo com a predominância do tipo de macrófitas, o sistema é subdividido de acordo com a Tabela 5.

Tabela 5 – Variações do sistema de escoamento superficial.  
Fonte: Adaptado de PHILIPPI e SEZERINO (2004).

<b>Variações do Sistema</b>	<b>Tipos de Macrófitas</b>
Escoamento superficial com macrófitas emergentes	Macrófitas cujos caules, folhas e flores estendem-se acima do nível da massa líquida. Ex: <i>Juncus</i> spp. e <i>Typha</i> spp.
Escoamento superficial com macrófitas flutuantes	Desenvolvem-se plantas vasculares flutuantes, tolerantes a condições de saturação do líquido. Ex: <i>Eichhornia crassipes</i> e <i>Lemna</i> spp.
Escoamento superficial com macrófitas de folhas flutuantes e solo enraizado	Apresentam parte aérea flutuante, mantendo-se enraizada a um meio suporte. Ex: <i>Nelumbo</i> spp e <i>Nupphar</i> spp.
Escoamento superficial com substrato flutuante	Macrófitas emergentes capazes de formar uma espécie de substrato flutuante composto de tecidos mortos, provenientes das próprias macrófitas, que se acumulam formando um emaranhado de matéria orgânica. Ex: <i>Typha</i> spp.
Escoamento superficial com macrófitas submersas	Utiliza tipos específicos de macrófitas que se encontram imersas na massa líquida, não estando necessariamente enraizadas no sedimento de fundo.

Os sistemas de escoamento sub-superficial, também denominado filtros plantados com macrófitas, são sistemas constituídos de meio suporte (brita, areia, cascalho, dentre outros) no qual o efluente é percolado e tratado, sendo utilizado como tecnologia de controle de poluição. Estes se classificam em filtros com macrófitas de fluxo horizontal, vertical ou híbrido. Nos filtros de fluxo horizontal o efluente é disposto na zona de entrada (parte inicial do leito) e percola até a zona de saída (parte final do leito) impulsionada por uma declividade de fundo definida no projeto. Nos filtros de fluxo vertical o sistema é inundado percolando verticalmente, sendo

coletado no fundo. Já os filtros híbridos consistem na associação em série dos anteriores.

### 3.3.2 Remoção de nutrientes em Leitos Cultivados

A depuração promovida pelos leitos cultivados utiliza processos físicos, químicos e biológicos para que os diversos constituintes sejam retirados da massa líquida. Para tanto, os mecanismos citados na tabela 6 são comumente encontrados na maioria das configurações de leitos cultivados.

Tabela 6 – Mecanismos de depuração de leitos cultivados para tratamento de águas residuárias. Fonte: (Adaptado de COOPER et al. (1996) por PHILIPPI e SEZERINO (1999)).

<b>Constituintes dos Esgotos</b>	<b>Mecanismos de Remoção</b>
Sólidos Suspensos	Sedimentação Filtração
Material Orgânico Solúvel	Degradação microbiológica – aeróbia Degradação microbiológica – anaeróbia
Nitrogênio	Amonificação seguido de nitrificação e denitrificação microbiana Retirada pela planta Adsorção Volatilização da amônia
Fósforo	Adsorção Retirada pela planta
Metais	Complexação Precipitação Retirada pela planta Oxidação/Redução microbiana
Patógenos	Sedimentação Filtração Predação

### 3.3.3 Remoção de matéria orgânica

A depuração da matéria carbonácea ocorre de forma aeróbia e anaeróbia, de acordo com os aceptores de elétrons disponíveis no meio, através de microrganismos que necessitam de uma fonte de carbono e energia para manutenção do seu metabolismo e reprodução. Experimentalmente, a taxa de depuração pode ser aferida utilizando a DBO (Demanda bioquímica de Oxigênio) e a DQO (Demanda Química de Oxigênio).

A degradação pode ocorrer em duas vias, aeróbia e anaeróbia, de acordo com a configuração estabelecida em cada leito cultivado e com os aceptores de elétrons presentes na massa líquida, predominando uma das vias em relação à outra, não impedindo que ambas ocorram simultaneamente. Os principais aceptores de elétrons estão descritos abaixo, na tabela 7.

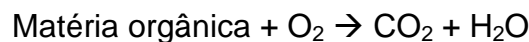
Tabela 7 – Aceptores de elétrons típicos das reações de oxidação no tratamento de esgotos (listados em ordem decrescente de liberação de energia)

Fonte: Von Sperling, 1996.

Condições	Aceptor de elétrons	Forma do aceptor após a reação	Processo
Aeróbias	Oxigênio (O <sub>2</sub> )	H <sub>2</sub> O	Metabolismo aeróbio
Anóxicas	Nitrato (NO <sup>3-</sup> )	Nitrogênio gasoso (N <sub>2</sub> )	Redução de nitratos (denitrificação)
Anaeróbias	Sulfato (SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> )	Sulfeto (H <sub>2</sub> S)	Redução de sulfatos
	Dióxido de carbono (CO <sub>2</sub> )	Metano (CH <sub>4</sub> )	Metanogênese

### Degradação aeróbia

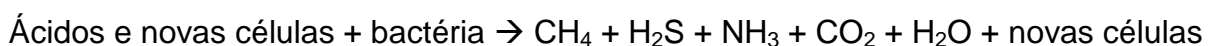
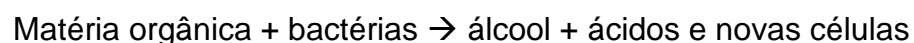
Baseia-se na seguinte reação realizada por bactérias aeróbias heterotróficas:



Entretanto, a degradação da matéria carbonácea nitrogenada também pode ser realizada por bactérias autotróficas aeróbias, as ditas bactérias nitrificantes, consistindo no processo de amonificação seguido de nitrificação. Contudo, o processo predominante na degradação do material carbonáceo é realizado pelas bactérias aeróbias heterotróficas.

### Degradação anaeróbia

Baseia-se em reações realizadas por bactérias facultativas ou anaeróbias obrigatórias, ocorrendo em dois estágios:



Vale salientar que a degradação anaeróbia é mais lenta quando comparada à aeróbia. Todavia, na ausência de oxigênio, ela torna-se predominante e responsável pela redução da DBO.

#### 3.3.4 Retenção e remoção de sólidos

A quantidade de matéria sólida relaciona-se diretamente com poluentes presentes no meio, portanto a redução da quantidade de SST (Sólidos Solúveis Totais) relaciona-se com a depuração do efluente a ser tratado. Para tanto, processos como sedimentação, precipitação, filtração e incorporação de sólidos ao biofilme estão bastantes presentes em leitos cultivados. Outras práticas indiretas podem ser encontradas em leitos cultivados, como a colmatação, artifício decorrente dos fatores citados abaixo (PHILIPPI e SEZERINO, 2004 *apud* PLATZER e MAUCH, 1997):

- i- Acúmulo de sólidos orgânicos e inorgânicos na superfície do material filtrante;
- ii- Maior produção de biomassa;
- iii- Precipitação química e deposição nos poros do meio suporte.

As raízes das macrófitas também desempenham importante papel na retenção de sólidos, diminuindo os espaços na massa sólida devido ao seu crescimento, com conseqüente formação de poros.

#### 3.3.5 Remoção da matéria nitrogenada

Um importante constituinte do esgoto é o nitrogênio, encontrado sob várias formas, variando de compostos orgânicos (aminoácidos, uréia, ácidos úricos, purinas e pirimidinas) a compostos inorgânicos em diferentes estados de oxidação (amônia, nitrito, nitrato, óxido nítrico, óxido nitroso e nitrogênio gasoso). As transformações químicas, as quais o elemento nitrogênio está sujeito, podem ser conseqüência de processos físico-químicos ou biológicos.

Em leitos cultivados, o principal mecanismo de remoção de nitrogênio orgânico é a seqüência de reações de amonificação, nitrificação e denitrificação. Após a conversão do nitrogênio, a remoção do mesmo em leitos cultivados pode ocorrer por

---

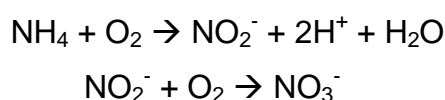
microrganismos e macrófitas como fonte de nutrientes e pela adsorção do material filtrante (IWA SPECIALIST GROUP ON USE OF MACROPHYTES, 2000).

### Amonificação

Processo no qual o N-orgânico é convertido em N-inorgânico. A reação é influenciada pela temperatura, pH, disponibilidade de oxigênio, relação C/N residual, nutrientes, condições do meio suporte (textura e estrutura). Dentre os fatores acima citados, destacam-se a disponibilidade de oxigênio visto que as taxas de conversão do N-orgânico à amônia são mais rápidas em condições aeróbias; o pH, pois em faixas neutras favorecem o aparecimento de amônio e dióxido de carbono (IWA SPECIALIST GROUP ON USE OF MACROPHYTES, 2000).

### Nitrificação

Define-se como uma oxidação biológica da amônia a nitrato sob condições aeróbias, mediada por microrganismos, realizada em duas fases abaixo descritas (IWA SPECIALIST GROUP ON USE OF MACROPHYTES, 2000).



Este mecanismo é influenciado por parâmetros como pH, alcalinidade, temperatura e disponibilidade de oxigênio (COOPER et al., 1990).

### Denitrificação

Processo no qual bactérias quimioheterotróficas reduzem o nitrato a óxido nítrico, óxido nitroso e nitrogênio gasoso. Para tanto é necessária condição anóxica, disponibilizando o oxigênio de fontes como o nitrato, nitrito, fosfato ou sulfato. Portanto, a presença de oxigênio dissolvido pode ser um fator de inibição.

---

### 3.3.6 Remoção de fósforo

Nutriente presente no esgoto cujas fontes variam de excretas humanas, detergentes e produtos sintéticos e compostos utilizados no tratamento de água. As moléculas em que o elemento pode ser observado são encontradas tanto na forma orgânica (presente em lipídios, proteínas e aminoácidos) quanto na forma inorgânica (ortofosfatos e polifosfatos). A ocorrência de fósforo em águas naturais e em águas residuárias se dá quase que exclusivamente na forma de fosfato ( $\text{PO}_4^{3-}$ ). (APHA; AWWA & WPCF, 1992). Eles são encontrados em solução, em partículas ou detritos, ou em tecidos de organismos aquáticos (bactérias, fungos, algas, micro-invertebrados, macrófitas); fosfatos também estão presentes em sedimentos no fundo de corpos de água e em lodos biológicos, tanto sob forma inorgânica precipitada como incorporados a compostos orgânicos, formando complexos organofosforados refratários (APHA *et al.*, 1992).

Em leitos cultivados a remoção do nutriente é realizada por processos físicos, químicos e biológicos decorrentes principalmente dos mecanismos de precipitação, sedimentação, remoção e adsorção. Para tanto, as macrófitas e microrganismos tem papel relevantes, pois utilizam o macronutriente em seu metabolismo (PHILIPPI e SEZERINO, 2004). O fósforo entra nos leitos com o fluxo de alimentação e por deposição atmosférica; sai dos leitos com o fluxo de saída e por liberação gasosa de  $\text{PH}_3$  (KADLEC e KNIGHT, 1996). Ele pode se tornar disponível no leito através de ligação química ou difusão da solução.

### 3.3.7 Retenção de metais pesados

Os elementos químicos denominados “metais pesados” são motivo de muita preocupação. Grande parte dos metais presentes nos esgotos são importantes para crescimento de microrganismos sendo utilizados como micronutrientes. Entretanto, alguns micronutrientes como Cu, Se e Zn são tóxicos quando presentes em altas concentrações no meio (DeBUSK, 1999).

A natureza química e a biodisponibilidade de um metal, pode modificar-se por meio da oxidação ou redução; porém, sua natureza elementar continua a mesma. Além disso, em face da sua natureza tóxica, também não são passíveis de tratamento por

---



degradação biológica, ao contrário do que ocorre com os contaminantes orgânicos. Por este motivo, os metais têm grande persistência no meio ambiente.

O atual desenvolvimento de tecnologias busca empregar sistemas com macrófitas para que ocorra acumulação de metais em seus tecidos, retendo-os, impedindo acúmulo na cadeia alimentar e difusão pela água (PHILIPPI e SEZERINO, 2004).

Mecanismos físicos, químicos e físico-químicos de retenção de metais nos sedimentos incluem filtração, imobilização por precipitação oxidativa, sedimentação de metais particulados, adsorção por troca catiônica, complexação com matéria orgânica e redução de sulfato. Precipitação de óxidos de metal, seguido de oxidação microbológica, é um dos mecanismos mais importantes em leitos cultivados (YE et al., 2001). Metais como Cr e Cu também podem ser ligados a argila e óxidos de manganês, alumínio e ferro (DeBUSK, 1999).

A extração de metais pesados pelas raízes é de papel secundário em leitos cultivados, uma vez que somente pequena quantidade de metal pode ser removida por este mecanismo. No entanto, as plantas criam ambiente na zona radicular que pode proporcionar a imobilização de metais por processos oxidativos e redutivos (WHITING & TERRY, 1999; DUNBABIN & BOWMER, 1992 apud YE et al., 2001).

Vários metais, como Ca, Cu, Ni, Pb e Zn formam combinações quase insolúveis com os sulfetos em condições anaeróbias. Outros, como Cr, Cu, Pb e Zn, formam complexos químicos fortes com a matéria orgânica presente na água ou no solo (DeBUSK, 1999).

### 3.3.8 Remoção de microrganismos patogênicos

Muitos organismos são encontrados nos esgotos, dentre eles, os principais são bactérias, protozoários, helmintos, vírus e algas. Dentre os organismos patogênicos encontrados nos esgotos, os mais comumente encontrados estão relacionados na tabela 8.

Tabela 8 – Organismos patogênicos comumente encontrados em esgotos.  
 Fonte: Adaptado de FERNANDES (1997).

<b>Organismos</b>	<b>Doenças</b>
<i>Ascaris, Enterobius</i>	Verminose
<i>Bacillus anthracis</i>	Antrax
<i>Brucella</i>	Brucelose
<i>Entamoeba histolytica</i>	Disenteria
<i>Leptospira iceteohaemorrhagie</i>	Leptospirose
<i>Mycobacterium tuberculosis</i>	Tuberculose
<i>Salmonella</i>	Intoxicação alimentar
<i>Salmonella paratiphy</i>	Febre paratifóide
<i>Schistosoma</i>	Equistossomose
<i>Shigella</i>	Desenteria bacilar
<i>Taenia</i>	Solitária
Vírus	Poliomielite, hepatite

As bactérias constituem o grupo mais importante, pois são responsáveis pela decomposição e estabilização da matéria orgânica. Porém a presença de alguns destes organismos nem sempre indicam uma forma de poluição. Um exemplo são as bactérias do grupo coliforme, usualmente adotadas com indicadores de poluição devido a sua presença no trato intestinal de animais homeotérmicos, por possuírem resistência similar a de bactérias patogênicas e serem de simples detecção (ALMEIDA E ALMEIDA, 2005).

Os microorganismos patogênicos presentes nas águas residuárias são eliminados através de significativo decaimento natural e das condições ambientais desfavoráveis a que são expostos nos leitos cultivados (temperatura, pH e substâncias químicas desfavoráveis), através de adsorção e filtração pelo meio suporte e sedimentação (REED, 1988; KADLEC e KNIGHT, 1996).

Os sistemas de leitos cultivados destacam-se pela adequação de fatores físicos, químicos e biológicos que atuam na remoção de organismos patogênicos. Os fatores físicos abrangem a filtração, exposição aos raios ultravioletas, temperatura e sedimentação. Os fatores químicos abrangem oxidação, pH, exposição aos biocidas excretados pelas raízes de algumas plantas e adsorção. Os biológicos compreendem predação, competição, ataque por bactérias e vírus, além de morte natural.

Rivera *et al.* (1995) e Soto *et al.* (1999) obtiveram experimentalmente resultados que indicam que filtros plantados têm maior eficiência em relação a filtros sem plantas para remoção de organismos patogênicos.

### 3.3.9 A influência dos fatores abióticos nos leitos cultivados

Os principais fatores abióticos de importância para os processos biológicos nos leitos cultivados são temperatura, concentração de oxigênio dissolvido e pH.

A temperatura do efluente nos leitos gira em torno da média diária de temperatura do ar, devido aos ganhos através da energia solar e perdas através de energia evaporativa. A influência garante que em baixas temperaturas ocorre o aumento da solubilidade do oxigênio, favorecendo os processos aeróbios, porém diminuem a atividade microbiana.

A concentração de oxigênio nos leitos cultivados relaciona-se com a temperatura, sais dissolvidos, atividades biológicas e meio suporte. O oxigênio pode penetrar nos leitos através das plantas ou da atmosfera (KADLEC e KNIGHT, 1996).

Em adição ao controle de vários processos biológicos, o pH é também um determinante de várias reações químicas importantes. Não há evidências de flutuações diurnas de pH em áreas de alagados contendo vegetação emergente densa. As substâncias orgânicas geradas dentro dos leitos através do ciclo de crescimento, morte e decomposição são a origem da sua acidificação natural. (KADLEC e KNIGHT, 1996).

### 3.3.10 As Macrófitas

As regiões alagadas são habitadas por diferentes tipos de plantas adaptadas para o crescimento na água e em solos saturados, cujas denominações são as mais diversas como hidrófitas, macrófitas aquáticas, hidrófitas vasculares, plantas aquáticas e plantas aquáticas vasculares (GUNTENSPERGEN *et al.*, 1988). De modo geral, o termo macrófitas é o utilizado para os sistemas de leitos cultivados por diversos pesquisadores no mundo todo (VALENTIM, 1999). Segundo McGhee (1991) adaptado por Almeida (2007), pode-se tratar o esgoto para torná-lo água utilizável para fins diversos. As plantas, quando utilizadas no tratamento de esgoto representa uma tecnologia emergente, eficiente, estética e de baixos custos

---

energéticos, revelando-se uma boa alternativa aos sistemas convencionais (Viczevski & Marchesini 2002, Presznuk *et al.* 2003, Almeida *et al.* 2005).

Estas plantas estão divididas em três categorias (VALENTIM, 1999): 1) Flutuantes: podem estar fixadas ou não ao fundo e sua folhagem principal flutua a superfície da água; 2) Submergentes: crescem sob a água e podem estar fixas por raízes; 3) Emergentes: sua folhagem principal está em contato com o ar e as suas raízes estão fixadas ao solo.

Várias são as espécies testadas para o uso em processos de tratamento de águas residuárias, sendo as mais utilizadas apresentadas na Tabela 9.

Tabela 9 – Algumas espécies de macrófitas testadas para o uso em processos de tratamento de águas residuárias.

Fonte: (Adaptado de GUNTENSPERGEN *et al.* (1988) por VALENTIM, 1999).

<b>Plantas Emergentes</b>	<b>Plantas Submergentes</b>	<b>Plantas Flutuantes</b>
<i>Scirpus</i> sp.	<i>Elodea nuttallii</i>	<i>Lemna</i> sp.
<i>Phragmites australis</i>	<i>Egeria densa</i>	<i>Spirodela</i> sp.
<i>Typha</i> sp.	<i>Ceratophyllum demersum</i>	<i>Eichhornia crassipes</i>
<i>Canna flaccida</i>		<i>Wolffia arrhiza</i>
<i>Eleocharis</i> sp.		<i>Azolla Caroliniana</i>
<i>Juncus</i> sp.		

Nos leitos cultivados ocorrem interações físicas, químicas e biológicas que propiciam o tratamento devido à presença do meio suporte, das comunidades bacterianas e das macrófitas, com destaque para as bactérias que podem realizar o processos degradativos por três formas distintas, sendo por processos anaeróbios, anóxicos e aeróbios. Nos leitos cultivados, por estarem preenchidos por água, predominam as condições anaeróbias. Porém, para possibilitar o processo aeróbio, a transferência de oxigênio ocorre por transferência pela raiz; difusão do oxigênio no meio durante a percolação do efluente; e convecção do oxigênio atmosférico por diferença de pressão (MAZZOLA, 2003).

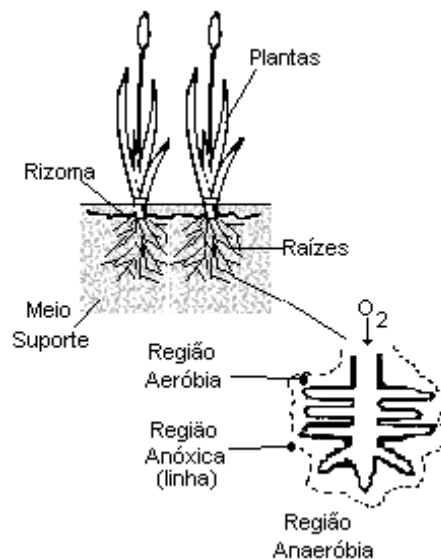


Figura 1 – Detalhe da rizosfera e do transporte de oxigênio para as pontas das raízes.  
Fonte: Adaptado de GUNTENSPERGEN et al.(1988).

A influência das plantas para a retirada de metais também é relevante por meio do processo de fitorremediação. O mesmo engloba a fitoextração, fitoadsorção, fitoestabilização e rizorremediação, respectivamente a absorção e acumulação dos metais nos tecidos das plantas, imobilização dos metais nas raízes, liberação de compostos capazes de imobilizar os metais e a estimulação da biorremediação pela ação de fungos e outros microrganismos (SALT *et al.*,1998).

Para este trabalho, foram escolhidos dois gêneros de macrófitas. São eles: *Typha sp.* e *Eleocharis sp.* A escolha levou em consideração a adaptação ao clima e a facilidade de obtenção de suas mudas, visto que foram retiradas de um ambiente alagado presente no campus da Universidade Federal do Espírito Santo.

### 3.3.11 *Typha angustifolia* L. (taboa)

Macrófita pertencente à ordem Pandanales, ordem de monocotiledôneas, família Typhaceae, apresentando folhas lineares, com bainha bem desenvolvida e não tendo caule lenhoso. Além da Typhaceae, nesta ordem há outras 2 famílias: Pandanaceae e Sparganiaceae.(JOLY, 1979).

De acordo com Almeida (2007), adaptado de Lorenzi (1982), a taboa é descrita como uma planta herbácea perene, ereta, de rizomas rasteiros, caule cilíndrico, com folhas de 2 m ou mais de comprimento e 15 mm a 25 mm de largura. Sua inflorescência ocorre, mais ou menos, na altura das folhas, com longo pedúnculo

provido de folhas caulinas e longa espiga terminal. As flores são masculinas no ápice e femininas na base. A planta propaga-se por sementes ou vegetativamente através de rizomas. Além disso, é uma planta que tem elevados índices de saturação luminosa e suporta altas temperaturas (GUNTENSPERGEN et al., 1988).

### 3.3.12 *Eleocharis* sp

Macrófita pertencente à ordem Cyperales, sendo que esta possui só uma família com as características desta ordem: a Cyperaceae. (JOLY, 1979)

O gênero *Eleocharis* possui, aproximadamente, 250 espécies, usualmente aquáticas e anfíbias, distribuídas por todo o globo e com grande concentração de espécies na América. O gênero caracteriza-se pela ausência de lâminas foliares, com as atividades fotossintéticas transferidas para o colmo (GIL, 2004 apud SVENSON, 1929). A identificação das espécies é muitas vezes difícil, pois sua distinção está geralmente no aquênio que, todavia é muito pequeno. Detalhes importantes para a taxonomia estão na bainha foliar e na base do colmo (KISSMANN, 1993). As *Eleocharis* são hidrófitas, geralmente emergentes e raramente submersas, correndo em alagados, cachoeiras, lagoas, lagos, margens de rios, restingas e solos úmidos de locais abertos (FARIA, 1998). Abundância em água e luz é fundamental para a existência e bom funcionamento das espécies de *Eleocharis*.

Lorenzi (1982) também caracterizou a macrófita do gênero *Eleocharis* sp. que é conhecida popularmente por junco-manso e junco fino. Apresenta como características ser uma planta perene, herbácea, robusto-rizomatosa, ereta, entouceirada, de caule oco e seccionado por dentro (visível por fora), medindo 30-60 cm de altura, com reprodução por sementes e rizomas. Suas folhas são reduzidas a bainhas, com a boca ligeiramente engrossada nos bordos. Possui inflorescências terminais, em espiguetas oblongas, de coloração marrom, assentadas no ápice dos caules, medindo 10-15 mm de comprimento e 2-3 mm de largura.

## 3.4 ESCÓRIA DE ACIARIA (“SLAG”)

Neste tópico serão abordados conceitos básicos sobre a escória de aciaria, como a geração deste co-produto, o enquadramento segundo a classificação da NBR 10004/2004 (em vigor na presente data), formas de utilização e possíveis impactos.

---

Entretanto, não constituirá um estudo aprofundado, visto que a caracterização da escória não é o foco deste trabalho.

De acordo com a ABN (Associação Brasileira de Metalurgia e Materiais), a escória de é um co-produto das aciarias e não um resíduo sólido devido ao valor econômico agregado ao mesmo e a sua utilização como alternativa na substituição de agregados naturais como brita e areia, além de ser usada como matéria-prima ou insumo nas indústrias. Apesar da escória gerada na produção do aço apresentar diferentes composições químicas e possuírem grande heterogeneidade, o que dificulta seu estudo, a mesma já é empregada em vários âmbitos. Como exemplos têm-se os lastros ferroviários, agregados na pavimentação de rodovias, artefatos de concreto, produção de cimentos, dentre outros, gerando efeitos positivos ao meio ambiente, seja pela da substituição de minerais naturais não metálicos cuja extração impacta o meio ambiente, como: brita, areia, calcário e rocha fosfática, como também pela conservação destes recursos naturais.

#### 3.4.1 Processo de produção de aço e geração de escória de aciaria

A escória de aciaria é um subproduto do processo de produção do aço. Portanto, faz-se necessário conhecer o processo de fabricação do mesmo.

O processo de fabricação do aço tem como matérias-primas principais o minério de ferro, carvão e cal, e subdivide-se em quatro etapas distintas.

Na etapa de preparação da carga ocorre a produção de sinter e coque. O sinter consiste em aglomerar minério de ferro (finos) utilizando cal e finos de coque. O coque, por sua vez, é processado na coqueria através da destilação do carvão mineral (CST, 2008).

Na etapa de redução, as matérias-primas vão para o alto forno, onde o oxigênio aquecido a uma temperatura de aproximadamente 1000 °C é insuflado, produzindo reações químicas que reduzem o minério de ferro e produz o ferro-gusa (CST, 2008).

É na etapa de refino que o aço líquido é obtido decorrente da transformação do ferro-gusa (líquido ou sólido) e sucatas ferrosas e não-ferrosas. Nesta etapa também é obtida a escória proveniente da retirada de carbono e impurezas do ferro-gusa.

A última etapa é a de laminação, na qual lingotes e blocos são processados para gerar inúmeros produtos siderúrgicos (CST, 2008).

---

Todo processo descrito anteriormente pode ser visto no fluxograma da figura 2.

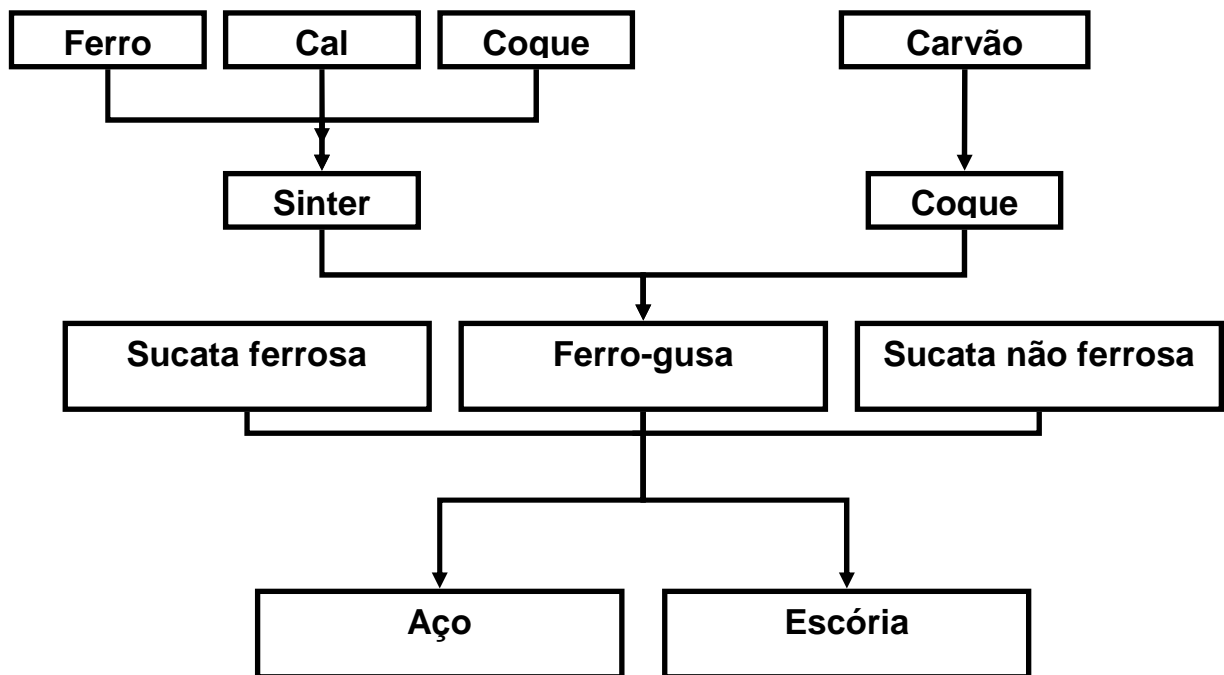


Figura 2 – Fluxograma da produção da escória de aciaria.  
Fonte: Adaptado de VANCINI (2005).

Segundo ARAÚJO (1997), Existem alguns tipos de processos de fabricação do aço, que são designados de acordo com o tipo de forno utilizado no processo (LD, EAF, Siemens-Martin, entre outros) e a natureza da escória de aciaria (ácida ou básica). No presente estudo, a escória utilizada é do tipo LD ou BOF, ou seja, utilizam fornos a oxigênio.

### 3.4.2 Classificação físico-química do “slag”

A Escória de Aciaria da Arcelor Mittal Tubarão é classificada segundo a Norma da ABNT NBR 10.004/2004 – Resíduos Sólidos – Classificação, como resíduo classe II A – Resíduo Não Inerte, conforme laudo de classificação de resíduo. LC 001/05, emitido pela CETREL S.A. em 13/01/2005.

Esta Norma tem por objetivo classificar os resíduos sólidos quanto aos seus riscos potenciais ao meio ambiente e à saúde pública, para que possam ser gerenciados adequadamente. (Ver NBR 10.004/2004).

A caracterização físico-química realizada pela empresa CETREL S.A., além de incluir os critérios da nova NBR 10.004/2004 (Laudo LC 001/05), teve com base



também o *Standard Method for Examination of Water and Wastewater*, 20ª edição de 1998 e metodologia Cetrel e análises cromatográficas através da metodologia EPA-8270 de 1996. Apenas o parâmetro fluoreto apresentou-se acima do valor legislado. O laudo de Classificação de Resíduo LC 001/05 emitido pela CETREL S.A. em 13/01/2005, também classifica a Escória de Aciaria LD da CST como resíduo não corrosivo, conforme critérios estabelecidos pelo NBR 10.004/2004.

A Escória de Aciaria da CST também foi caracterizada recentemente em estudos desenvolvidos junto a TECAM Ambiental. A análise de caracterização físico- química na Norma da ABNT NBR 10.004/87, vigente quando da elaboração dos estudos, classificou a Escória de Aciaria da CST como resíduo classe II – Não Inerte, uma vez que apenas o parâmetro Dureza apresentou-se acima do valor legislado, conforme laudo TECAM Ambiental nº 8379/2004.

Conforme definido por esta Norma, os resíduos classe II – Não Inertes, são aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I – perigosos – ou de resíduos classe III – inertes.

### 3.4.3 Estudos de avaliação de riscos

Estudo para avaliação dos riscos para a saúde humana e ecológicos apresentados pelo uso das escórias da siderurgia no meio ambiente, realizada pela empresa americana Exponent (Proctor et al. 2000), demonstra que a natureza alcalina da escória (pH de aproximadamente 11 para o lixiviado de água) permite que a mesma seja utilizada para neutralizar o lançamento de efluentes industriais e de drenagem ácidas de minas, bem como suplementar o pH em solos agrícolas. O pH elevado é uma razão da mobilidade (ou seja, lixiviabilidade) reduzida dos metais na escória, e é uma consideração importante para as aplicações de escória nos corpos de água superficiais e subterrâneos com volume de diluição limitado, ou na sua proximidade (Proctor et al. 2000).

As aplicações de escória em pequenos corpos de água ou próximos a eles, cujo volume de diluição é pequeno, devem ser avaliadas segundo critérios técnicos a fim de que não sejam alteradas as condições naturais da vida aquática e de forma que essa aplicação não cause impactos prejudiciais pela possível elevação do pH. Entretanto na aplicação em ambientes aquáticos tais como rios, lagos e cursos de

---

água que promovam uma diluição de pelo menos mil vezes, não é de se esperar que esta venha a promover impactos à vida aquática ou a qualidade da água.

#### 3.4.4 Utilização da escória de aciaria no tratamento de águas residuárias

A aplicação da escória de aciaria no tratamento de águas residuárias foram trabalhos propostos anteriormente, já encontrados na literatura, e descritos por Shilton (2006) e Drizo (2006). Ambos os trabalhos destacam a remoção de fósforo pela escória de aciaria devido à capacidade de absorção do nutriente pelo material, e precipitação do nutriente facilitada pelas condições físico-químicas criadas pela escória.

Na concepção do tratamento de águas residuárias utilizando leitos cultivados, a seleção dos componentes do leito é de crucial importância. Dentre eles está o meio suporte. O uso da escória de aciaria fez-se uma opção atrativa devido à utilização de um co-produto da siderurgia, além de minimizar os impactos ambientais decorrentes da retirada de recursos minerais.

De acordo com os trabalhos supracitados, a escória destaca-se como meio suporte para o tratamento de águas residuárias, pois o material possui grande capacidade na remoção de fósforo decorrente, principalmente, dos mecanismos de absorção e precipitação.

#### 3.4.5 Caracterização da escória de aciaria

O presente trabalho não objetivou a caracterização da escória de aciaria utilizada nesta pesquisa. Vale lembrar que uma escória de aciaria pode apresentar uma composição mineralógica bastante complexa. Isto é função das reações que podem ocorrer dentre os diversos constituintes utilizados na obtenção do aço e das próprias características do processamento. Além disso, o material encontra-se devidamente caracterizado na literatura.

A caracterização do material quanto à toxicidade devido a metais e não-metais da escória de aciaria do tipo LD, conforme a NBR 10004/2004, foi realizada Vancini (2005), no presente Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental da UFES.

---

De acordo com o estudo realizado pelo autor supracitado, a escória do tipo LD foi considerada não-tóxica, pois apresentou valores médios de concentrações inferiores aos limites da NBR 10004/2004. Contudo, sob o aspecto de inerticidade, ao menos 50% das amostras do processo LD apresentaram, no mínimo, um parâmetro com valor médio de concentração superior aos limites da NBR 10004/2004, caracterizando o material como não-inerte.

Intorne (2006), utilizando a escória de aciaria do tipo LD, caracterizou o material quanto à determinação de seus constituintes cristalinos, bem como análise da composição química para determinação dos óxidos majoritários por meio de ensaios de difração de raios-X (DRX), e concluiu que as fases cristalinas predominantemente formadas de Ca e Fe. As fases ricas em Ca são a calcita e silicato de cálcio. Já o Fe está presente na forma de magnetita ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) e wustita ( $\text{FeO}$ ). O autor também identificou o MgO em sua forma livre – periclásio.

De acordo com Intorne (2006), a composição química da escória de aciaria é predominantemente formada por compostos de Ca, Fe, Mg e Si. O Ca está presente a forma de silicatos complexos e também como carbonato. O Mg está, na sua maior parte, presente como óxido livre. Já o Fe encontra-se nas formas reduzidas de óxidos como wustita –  $\text{FeO}$  e magnetita –  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ , como mostra a tabela 12. Os resultados da composição química da escória de aciaria ainda identificaram traços de K, V, Ni, Cu, Zn, Nb, Rh, I.

Tabela 10 – Composição química da escória de aciaria (% em peso).  
Adaptado de INTORNE (2006)

CaO	Fe <sub>total</sub>	SiO <sub>2</sub>	MnO	SO <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	SrO	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	MgO	PF
45,10	23,62	10,29	5,40	0,54	0,34	0,18	2,90	1,81	10,33	12,96

## 4. MATERIAL E MÉTODOS

### 4.1 CONTEXTUALIZAÇÃO DA PESQUISA

A presente pesquisa utiliza a estação de tratamento de esgoto composta pela associação em série de um reator anaeróbio compartimentado, denominado RAC, e leitos cultivados com composições distintas (figura 2). Localizada no parque experimental do Núcleo Água – Núcleo de Bioengenharia Aplicada ao Saneamento da Universidade Federal do Espírito Santo – UFES, no Campus Universitário de Goiabeiras – Vitória, e foi desenvolvida em duas etapas: a primeira entre os meses de março de 2007 a agosto de 2007 e a segunda etapa entre os meses de dezembro de 2007 a março de 2008.

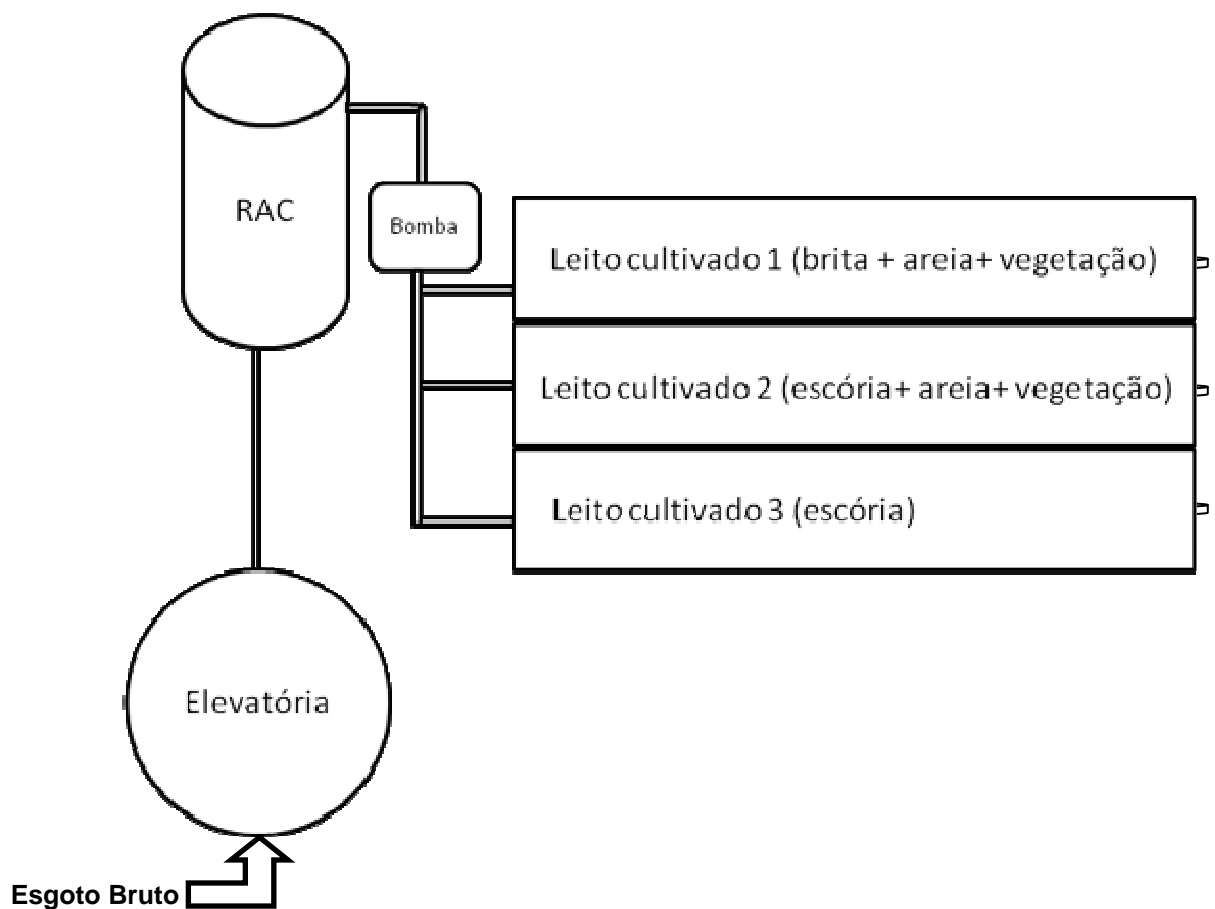


Figura 3 – Esquema do sistema-piloto de pós-tratamento de efluentes de Reator Anaeróbio Compartimentado.

#### 4.2 Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC)

O RAC possui seção circular de 1,60 m de diâmetro, altura total de 3,58 m e volume total de 7,20 m<sup>3</sup> e foi executado em fibra de vidro. Trata-se de um reator constituído por um compartimento interno e outro externo, que consistem nas zonas de digestão e sedimentação, respectivamente. A zona de digestão possui seção circular (tubo interno) de 0,80 m de diâmetro, altura útil de 2,30 m e volume útil de 1,16 m<sup>3</sup>. A zona de sedimentação possui seção em forma de coroa circular (anel externo), cujos diâmetros externo e interno medem, respectivamente, 1,60m e 0,80m, possui altura útil de 2,30 m e volume útil de 3,46 m<sup>3</sup> (Figura 4), como descrito por Souza (2005). As Figuras 5, 6 e 7 ilustram o RAC e suas principais dimensões e características geométricas.



Figura 4 – Reator Anaeróbio Compartimentado (RAC).

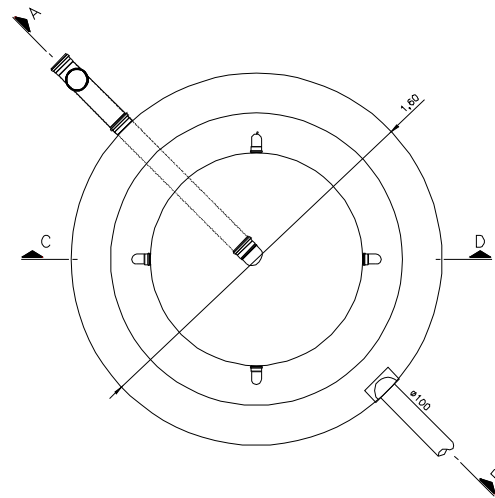


Figura 5 – Planta baixa do RAC.

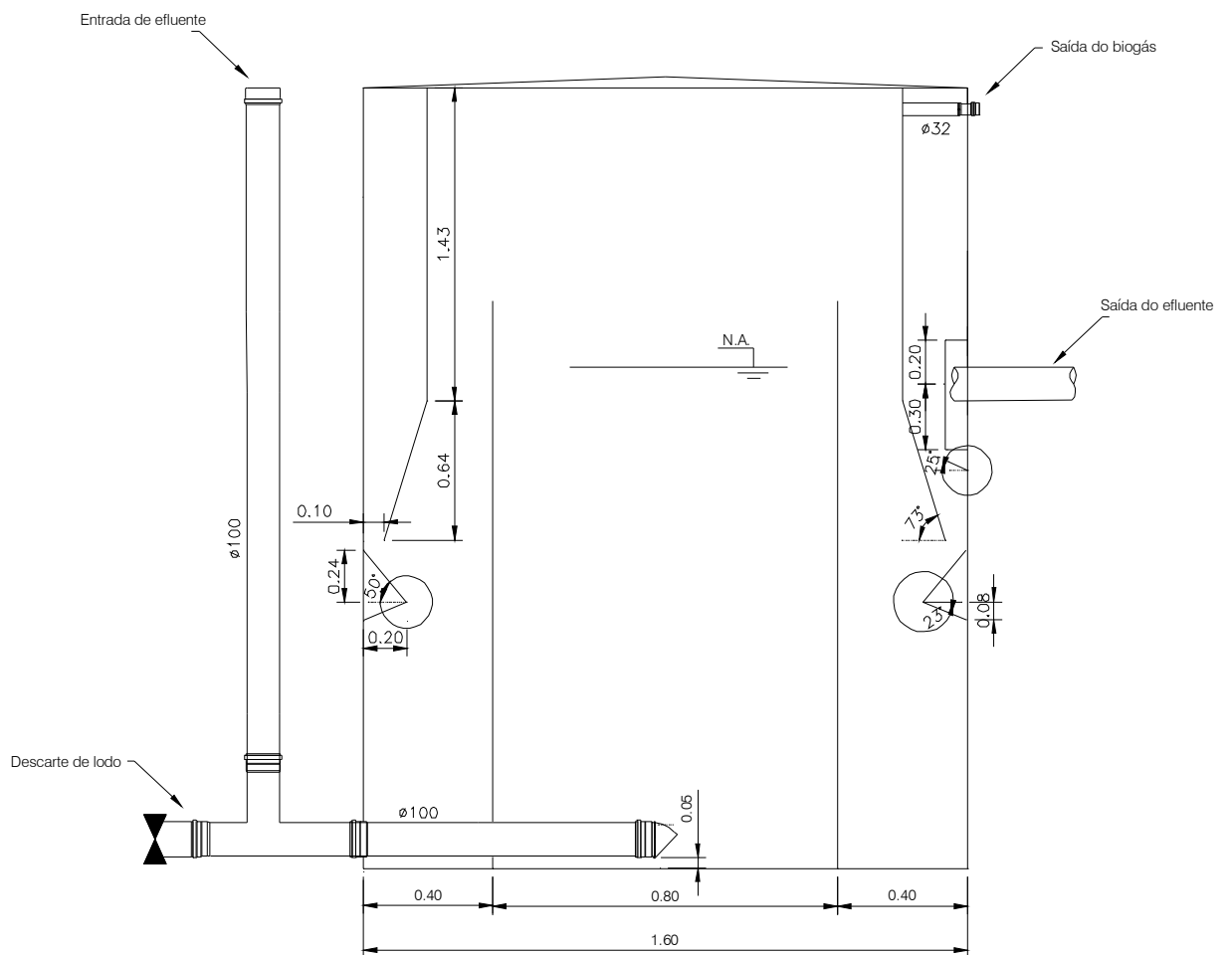


Figura 6– RAC - Corte AB

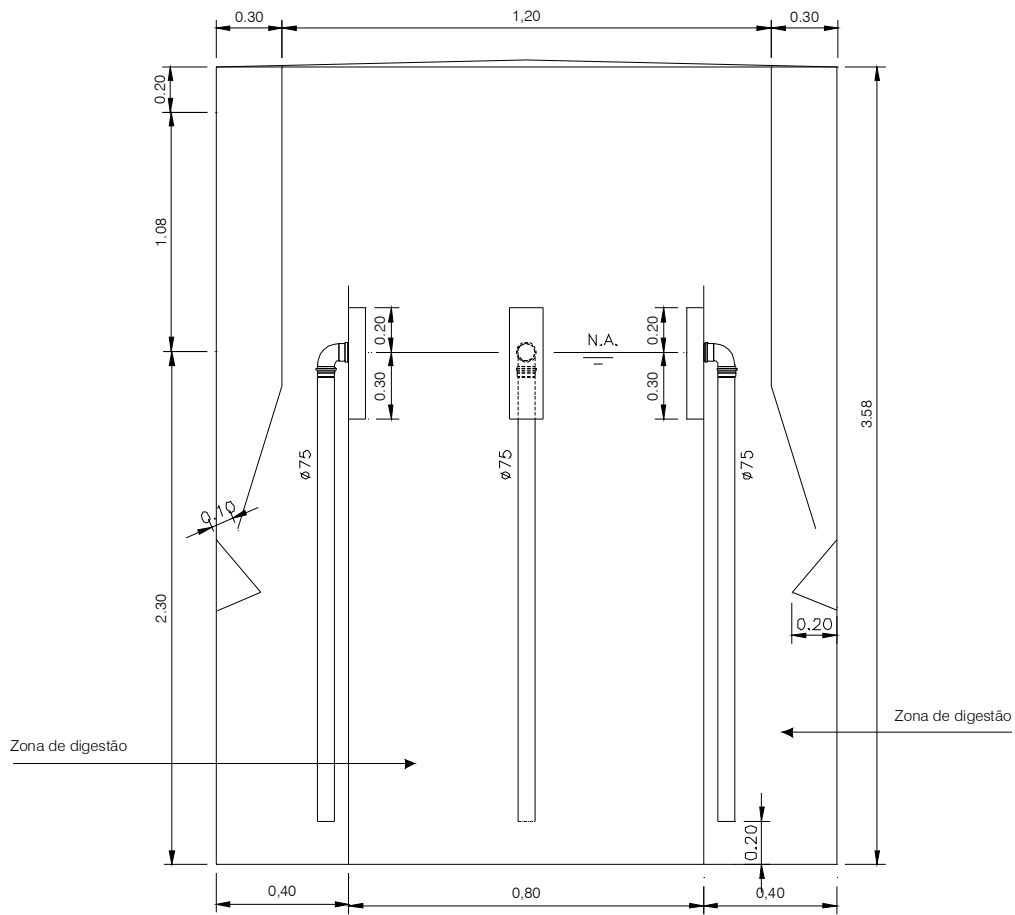


Figura 7 – RAC - Corte CD

### 4.3 CONTRUÇÃO DOS LEITOS

A construção do sistema de tratamento utilizou uma forma adaptada da antiga lagoa de polimento (figura 8) existente no espaço ETE-UFES.



Figura 8 – Antigo sistema RAC + Lagoa de polimento.

A adaptação consistiu na obtenção de 3 leitos, sendo 2 destes cultivados (LC1 e LC2) e um não-cultivado(LC3), obedecendo o declive de 0,10m da entrada para a saída, direcionando o fluxo do afluente . Observa-se que a sigla para o terceiro leito manteve certa continuidade com os demais visando melhor compreensão para fins didáticos. Os leitos foram construídos em paralelo, cada um com volume total de  $7,2 \text{ m}^3$  ( $8,0 \times 0,75 \times 1,20$ ) e volume útil de  $3,3525 \text{ m}^3$  para LC1 e LC2 e  $3,450 \text{ m}^3$  para LC3, considerando os volumes de vazios da areia, brita e escória, respectivamente de 39,5%, 46% e 46%. Cada leito foi devidamente impermeabilizado (Figuras 9 e 10).



Figura 9 – Planta baixa do sistema de tratamento de leitos cultivados.





Figura 10 – Adaptação da lagoa de polimento para leitos cultivados.

Na distância de 0,25 m dos pontos iniciais e finais de cada leito cultivado, foram inseridas placas de fibra de vidro. As placas iniciais (1,250m x 0,55 m) garantiam que o efluente inserido no leito penetrasse pela parte inferior do leito, enquanto que as planas finais (1,25 m x 0,65 m) permitiam a saída do efluente tratado apenas pela parte superior do leito. Este sistema possibilitou a configuração e a manutenção do fluxo sub-superficial, como indicado pela figura 11. Todas as placas foram impermeabilizadas junto às paredes e ao fundo do leito.

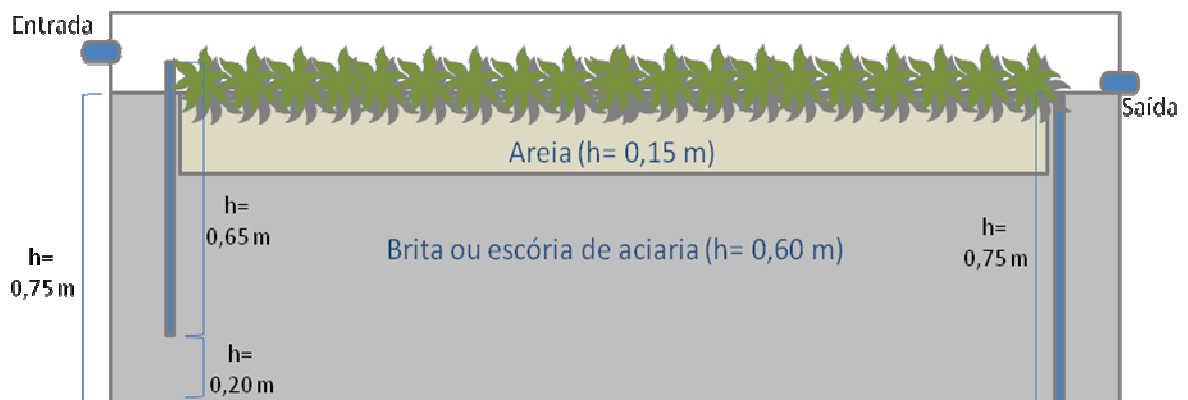


Figura 11 – Esquema ilustrativo da configuração dos leitos cultivados.

Os leitos cultivados foram preenchidos com diferentes materiais de composição do meio suporte objetivando tratamentos distintos. Os diferentes tratamentos deste trabalho estão descritos abaixo na tabela 10. Nos leitos cultivados 1 e 2, o componente de maior granulometria ocupou uma altura de 0,60 m e o de menor granulometria preencheu uma altura de 0,15 m. No LC3 toda altura (0,75 m) foi preenchida com o componente de maior granulometria.

Tabela 11 – Composição dos leitos cultivados.

Tratamentos	Composição dos leitos	Vegetação
Leito Cultivado 1	Brita 2 ( $D_{10} = 32,0$ mm) + Areia média	Presente
Leito Cultivado 2	Escória de aciaria ( $D_{10} = 32,0$ mm) + Areia média	Presente
Leito 3	Escória de aciaria ( $D_{10} = 32,0$ mm)	Ausente

#### 4.4 A VEGETAÇÃO

Nos leitos 1 e 2, após o preenchimento total, as plantas foram transplantadas para estes leitos de acordo com a densidade de 5 plantas por  $m^2$ . As plantas foram obtidas de uma área alagada próximo ao mangue da UFES, consistindo principalmente nos gêneros *Typha sp.* e *Eleocharis sp.*, conhecidas popularmente como taboa e junco e previamente crescidas em vaso com volume de 6 L preenchidos com areia conforme ilustrado na figura 8. Os mesmos foram colocados em casa de vegetação, adubados com N-P-K (10-10-10) de acordo com sugestão do fabricante. A irrigação ocorria duas vezes ao dia, pela manhã e ao fim da tarde.



Figura 12 – Adaptação das plantas em casa de vegetação.

Ao final do período de adaptação, ocorreu a transferência da vegetação para os leitos 1 e 2, visto que a leito 3 não é vegetado. A princípio as plantas não estavam em boas condições, realidade que veio a mudar na semana seguinte a transferência (Figuras 13 e 14).



Figuras 13 e 14 – Recuperação das plantas após a partida do sistema.

#### 4.5 O MONITORAMENTO

Após a construção do sistema RAC + leitos e a partida do sistema com o efluente derivado do RAC, iniciou-se a fase de monitoramento, em de março de 2007. O esgoto é bombeado da elevatória e levado até o RAC. Após o tratamento primário, o efluente é coletado utilizando a caixa de passagem, de onde é retirado por meio de bomba dosadora de cabeçotes independentes com regulagem de fluxo. Na primeira fase do tratamento cada linha recebeu  $4,32\text{m}^3/\text{d}$  ou  $50\text{mL}/\text{s}$ . Na segunda fase, cada uma das linhas de tratamento recebeu  $6,48\text{m}^3/\text{d}$  ou  $75\text{mL}/\text{s}$ . Os leitos possuem saída independente das quais foram retirados o efluente final.

Em caso de problemas técnicos e conseqüentes interrupções nas análises, os resultados considerados foram os de uma segunda análise após a interrupção, visto que a primeira análise era utilizada para fins de teste e comparação ao período anterior à interrupção e posteriormente descartada.

##### 4.5.1 Processo de amostragem

O processo de amostragem foi realizado por meio de coletas de amostras simples nos diversos pontos de coleta, com freqüência semanal na primeira etapa de monitoramento, e duas vezes por semana na segunda etapa do monitoramento, sempre realizado no período entre 8 e 10 horas da manhã. Entretanto, para o parâmetro metais pesados, foram realizadas sete análises na primeira etapa de monitoramento e cinco análises para a segunda etapa do monitoramento. Os pontos de coleta delimitados para este monitoramento foram: afluente ao reator anaeróbio

---

(coletado na saída da elevatória - esgoto bruto), efluente ao reator anaeróbio compartimentado (coletado na saída do RAC - tratamento primário) e efluente dos leitos 1, 2 e 3 (tratamento secundário).

#### 4.5.2 Técnicas laboratoriais

Os principais parâmetros de análise o monitoramento foram  $DBO_5$ ,  $DQO_t$ , SST,  $P_{total}$ , NTK, dureza, pH, turbidez e metais pesados, realizados segundo (APHA, 1995), encontram-se referenciadas na tabela 11. A densidade de coliformes totais e *E. coli* foi determinada em 24 horas respectivamente pelo desenvolvimento de coloração amarela e observação de fluorescência, através da determinação do número mais provável (NMP), utilizando-se Substrato Cromogênico definido ONPG-MUG (Colilert<sup>®</sup>), com quantificação por meio de cartelas.

Tabela 12 – Resumo de metodologias das análises físico-químicas.  
Adaptado de SOUZA (2005)

PARÂMETROS	MÉTODOS	REFERÊNCIA
DQO (total)	Oxidação por dicromato de potássio em meio ácido	STANDARD METHODS 5220 D, 1995
$DBO_5$	Método respirométrico	STANDARD METHODS 5210 D, 1995
Turbidez	Método nefelométrico	STANDARD METHODS 2130 B, 1995
SST	Método gravimétrico	STANDARD METHODS 2540, 1995
pH	Método eletrométrico	STANDARD METHODS 4500-H <sup>+</sup> B, 1995
$P_t$	Método do ácido ascórbico pela oxidação em meio ácido	STANDARD METHODS 4500 P, 1995
Dureza	Método titulométrico	STANDARD METHODS 2340 C, 1995
Metais	Método de absorção atômica	STANDARD METHODS 3110, 1995
NTK	Método Semi-Micro Kjeldahl	STANDARD METHODS 4500, 1995

Durante o período experimental notou-se o acúmulo de material sólido na tubulação de saída dos leitos 2 e 3. Este material gerou redução da eficiência de saída do efluente da tubulação, necessitando ser removido. Nesta remoção foi coletada uma

amostra para análise com objetivo de confirmar a composição do material decantado. Para tanto, utilizou-se o EDX.

O EDX (Energy Dispersive X-Ray), ou seja, O espectrômetro de fluorescência de raios-X por energia dispersiva é um instrumento que determina quantitativamente os elementos presentes em uma determinada amostra. Isto é possível através da aplicação de raios-X na superfície da amostra e a posterior análise dos fluorescentes raios-X emitidos. Para está análise foi realizada com base em óxidos utilizando o aparelho modelo SHIMADZU – 720.

#### 4.6 ANÁLISE DA MASSA VEGETAL

Durante o período experimental foram realizadas aleatoriamente duas podas, uma em cada etapa de monitoramento, visando a comparação entre a massa vegetal total entre os leitos cultivados 1 e 2, cuja diferença está no meio suporte utilizado, sendo LC1 composto por brita e LC2 composto por escória de aciaria.

Cada poda consistiu no desbaste da cobertura vegetal, padronizada a 0,2m de altura em relação ao substrato. Os valores absolutos obtidos pelas massas aferidas em cada uma das podas foram somados e comparados.

#### 4.7 A ANÁLISE ESTATÍSTICA

A análise estatística dos resultados foi realizada utilizando o pacote estatístico R versão 2.6.2.

Os desempenhos dos tratamentos do reator anaeróbio compartimentado (RAC) e dos leitos (LC) foram analisados de acordo com a comparação dos resultados obtidos nas fases do monitoramento. Tal comparação foi realizada através do teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney*. Trata-se de um teste não paramétrico que tem por objetivo testar a equivalência de duas populações, ou seja, verificar se apresentam a mesma distribuição de probabilidade. Para o teste descrito, considerou-se a probabilidade de 5% de erro.

---

## ***5. RESULTADOS E DISCUSSÃO***

Neste item discute-se o desempenho das etapas dos tratamentos propostos. Para tanto, utilizou-se amostras simples realizadas durante o período de monitoramento.

Os resultados obtidos foram referentes aos parâmetros DQO<sub>t</sub>, DBO<sub>5</sub>, ST, SS, SD, dureza, pH, turbidez, NTK, P<sub>total</sub>, coliformes totais, E. coli, além dos metais alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn), cádmio (Cd) e chumbo (Pb), sendo que os dois últimos só foram analisados na primeira fase de monitoramento, ou seja, na vazão de 50mL/s.

Os resultados são representados respectivamente pelos gráficos de dispersão das séries históricas e diagramas em caixas (“boxplots”), que representam as tendências centrais e a dispersão das amostras. Além destes, estarão presentes gráficos de dispersão para análise das eficiências dos leitos de acordo com as cargas aplicadas.

### **5.1 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA O PARÂMETRO DQO**

Aferir a quantidade de matéria orgânica presente nos esgotos é de primordial importância, pois este componente gera poluição das águas no momento do descarte de efluentes, como por exemplo, o consumo do oxigênio dissolvido devido ao metabolismo de microrganismos em corpos d’água. Para tanto, um dos principais métodos de medição dá-se por meio do parâmetro DQO (demanda química de oxigênio). O parâmetro DQO informa o consumo de oxigênio dissolvido em função da oxidação química da matéria orgânica, sendo assim dito indireto quanto à medição da quantidade de matéria orgânica.

#### **5.1.1 Dados obtidos para o parâmetro DQO**

As séries históricas dos resultados referentes às amostras simples obtidos no parâmetro DQO<sub>t</sub> da vazão de 50mL/s e 75mL/s encontram-se descritas na figura 15.

---

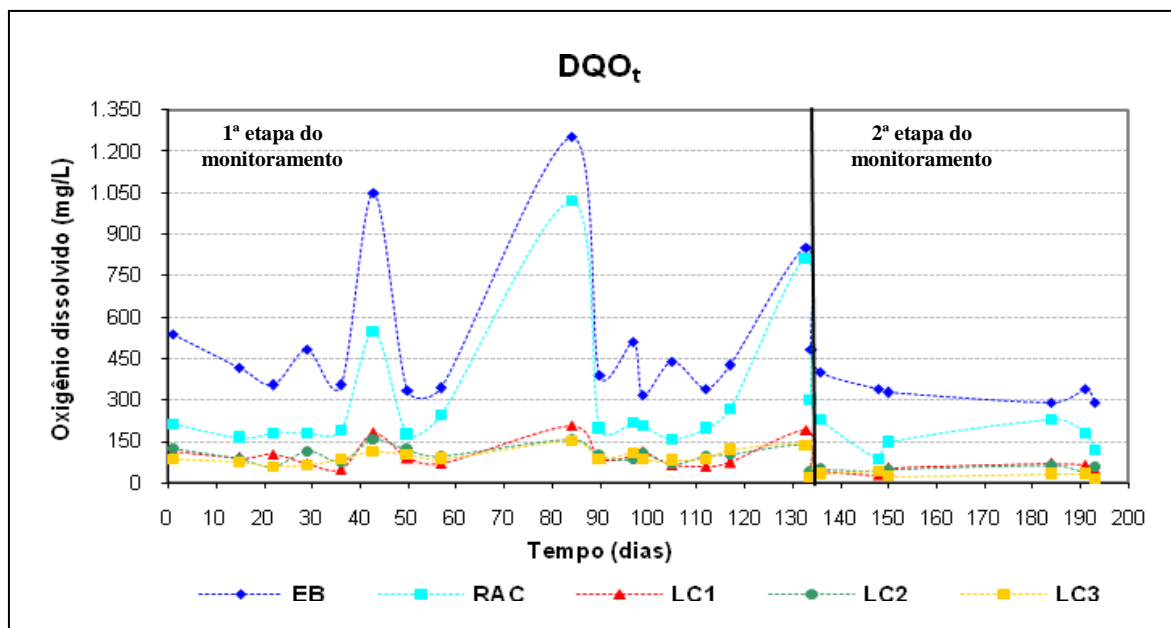


Figura 15 – Série histórica referente ao parâmetro DQO<sub>t</sub> no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

Os resultados obtidos na primeira fase do monitoramento ( $Q=50\text{mL/s}$ ) apresentaram-se com grande variabilidade de entrada no sistema. Este fato pode estar associado a inúmeros fatores, dentre eles a diluição do esgoto bruto pelas chuvas e a modificação de hábitos da população de acordo com o clima. Outro fator a ser considerado é o armazenamento do esgoto na elevatória, localizada no Núcleo Água (UFES). Sabendo-se que o esgoto utilizado no presente trabalho e em outros trabalhos anteriores é proveniente do bairro adjacente ao campus, foi necessária a construção de uma elevatória para recepção do mesmo. Porém, por motivos técnicos e devido a incidentes com a rede, inúmeras vezes foram cessadas a recepção do efluente. Desta forma, podem ter ocorrido reações diversas na tubulação e na elevatória em consequência do armazenamento temporário que provocaram variações no esgoto bruto.

O mesmo comportamento pôde ser observado no RAC. Apesar de apresentar 41% de eficiência de remoção em relação ao afluente do sistema, o RAC não conseguiu amortecer as grandes variações apresentadas pelo esgoto bruto, ou seja, acompanhando seu comportamento variável. Contudo, Souza (2005), utilizando as instalações do Núcleo Água, obteve valores médios do esgoto bruto próximos ao obtido neste trabalho, como pode ser observado no resumo estatístico de ambos os sistemas presentes na tabela 13.

Tabela 13 – Comparações entre afluente e efluente em pesquisas com sistemas de tratamento de esgotos realizadas no Núcleo água (UFES).

	Esgoto Bruto			RAC		
	nº de amostras	Média (mg O <sub>2</sub> /L)	Desvio padrão	nº de amostras	Média (mg O <sub>2</sub> /L)	Desvio padrão
Presente trabalho	16	524	279	16	311	257
Souza (2005)	20	525	111	20	223	20

Apesar da grande variabilidade apresentada pelo esgoto bruto e pelo efluente do RAC, os leitos apresentaram comportamento relativamente constante, demonstrando amortecimento da carga proveniente do pré-tratamento realizado pelo RAC. Este resultado pode estar associado ao tempo de detenção hidráulica (TDH) de cada etapa do tratamento. O RAC apresentou TDH de 7,5 h, enquanto nos leitos estes valores foram de aproximadamente 19 h.

Os resultados obtidos na segunda etapa do tratamento ( $Q=75\text{mL/s}$ ) foram mais constantes. Todavia, estes resultados foram obtidos em intervalos de tempo mais curtos, sendo feitas duas análises semanais. Além disso, o monitoramento foi realizado num período de sessenta dias, havendo interrupção da recepção do esgoto entre o intervalo de 20 a 50 dias.

Notou-se que a menor variação também pode relacionar-se a capacidade de carga do sistema, indicando que na primeira etapa do monitoramento o sistema estava trabalhando abaixo da faixa limite, ou seja, com baixa capacidade de carga associada. No momento em que foi elevada a carga no sistema (segunda etapa do monitoramento), ocorreu melhora responsiva.

As séries históricas apresentaram os dados obtidos. Visando melhor observação do desempenho do sistema de tratamento proposto, os mesmos foram descritos de forma distinta, observadas nas figuras 16 e 17.



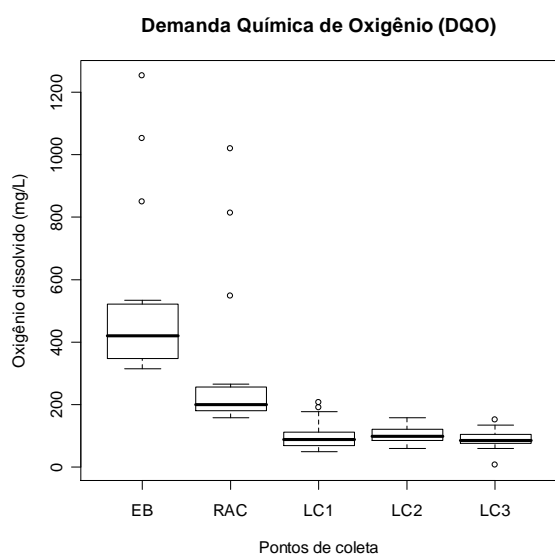


Figura 16 – Remoção de  $DQO_t$  no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

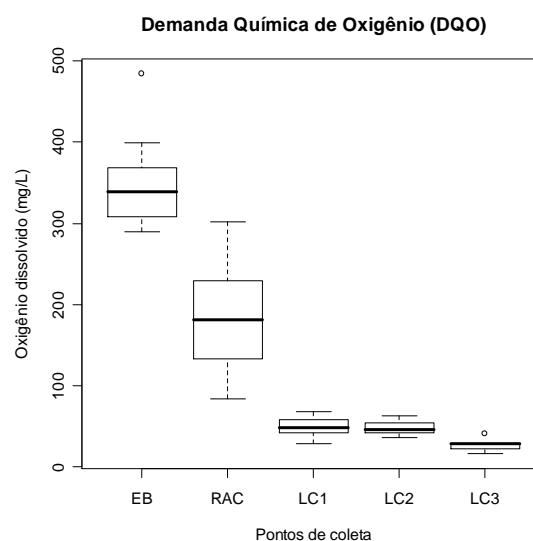


Figura 17 – Remoção de  $DQO_t$  no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

Sabe-se que as características do efluente anaeróbio produzido pelo RAC não apresentam, grandes diferenças em relação às características do efluente anaeróbio produzido em outros reatores UASB com diferentes configurações. Os dados referentes a primeira e segunda fases do monitoramento indicam remoção satisfatória de matéria orgânica no RAC, com eficiência de 41% e 48% respectivamente, em relação ao esgoto bruto. Contudo, o desempenho do RAC não atingiu as expectativas do tratamento. Este fator pode estar relacionado com problemas hidrodinâmicos referentes à criação de caminhos preferenciais, o que causa menor contato do afluente com a população microbiana. Outro possível fator causador da redução da eficiência do RAC pode ser o problema da inconstância das vazões, relacionada às inúmeras paradas do sistema devido a falta do esgoto bruto, como descrito anteriormente.

Os leitos, para ambas as vazões utilizadas, apresentaram resultados mais representativos do que o RAC. Em relação aos resultados apresentados pelo mesmo, na primeira etapa do monitoramento, os leitos 1, 2 e 3 exibiram eficiências médias de 67%, 66% e 69% respectivamente, não sendo estatisticamente diferentes entre si. Na segunda fase do monitoramento esse resultado foi de 73%, 74% e 85%, para os leitos 1, 2 e 3 respectivamente. Porém notou-se um desempenho diferenciado para LC3, apresentando diferença significativa em relação a LC1 e LC2, indicando melhor eficiência de remoção em relação aos outros LCs.

Os resultados médios obtidos para os leitos foram de 103mg/L, 105mg/L e 95mg/L, na primeira vazão experimental e de 49mg/L, 48mg/L e 27mg/L na segunda vazão experimental respectivamente para LC1, LC2 e LC3. De acordo com o COMDEMA 91 – 02, na segunda etapa do monitoramento, todos os leitos atenderiam a legislação, que delimita a concentração de 90mg/L de DQO para o lançamento de efluentes considerando os valores médios apresentados.

Analisando a distribuição das concentrações observadas nas análises, nota-se que LC3 apresentou em torno de 60% dos seus valores abaixo de 90mg/L na primeira vazão experimental e que este valor subiu para 100% na segunda vazão experimental, como mostram as figuras 18 e 19.

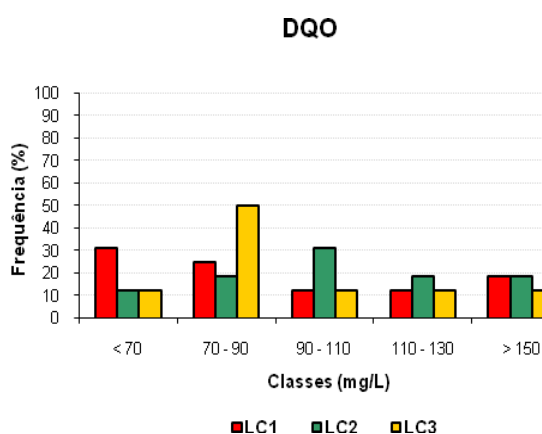


Figura 18 – Distribuição de freqüência para o parâmetro  $DQO_t$  no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

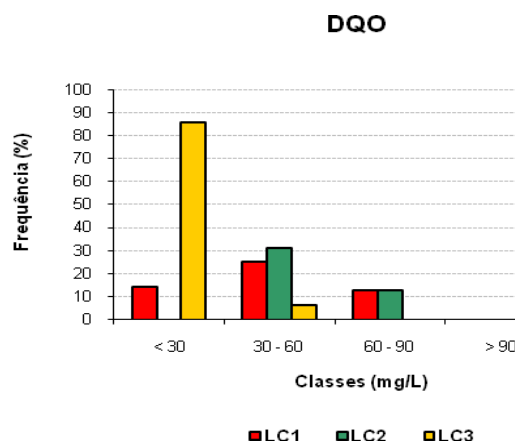


Figura 19 – Distribuição de freqüência para o parâmetro  $DQO_t$  no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

### 5.1.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro DQO

O presente trabalho objetivou a comparação entre leitos de configuração distinta, com variação na composição do meio suporte e na carga aplicada. Abaixo, na figura 22, encontram-se os resultados obtidos nesta pesquisa.

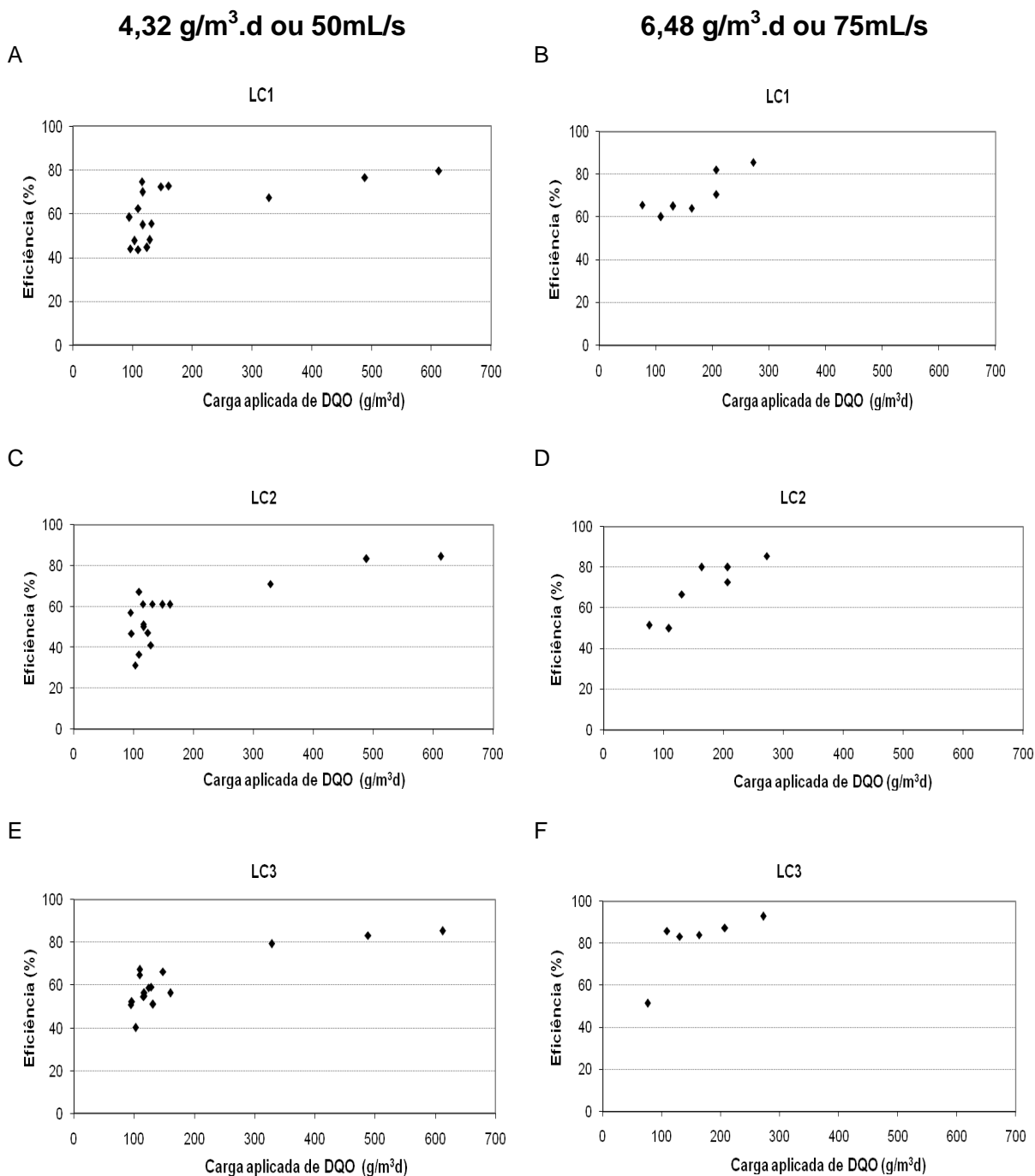


Figura 20 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro DQO<sub>t</sub> nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

Em geral, os gráficos apresentaram uma tendência de melhora na eficiência de remoção com o aumento da carga aplicada nos leitos. Nota-se que em cargas mais baixas, em torno de 100 a 200 g/m<sup>3</sup>.d, ocorreu maior variabilidade nas eficiências de remoção, e com o aumento das cargas aplicadas a remoção tendeu a aumentar. Contudo, a partir de certa carga aplicada, a eficiência de remoção passa a ser contínua. A explicação pode estar associada à porcentagem de DQO refratária

dentro da  $DQO_{total}$ . A  $DQO$  refratária equivale a aproximadamente 10% da  $DQO_{total}$ , sendo a parcela que não é degradada.

Apesar das diferenças dos leitos na primeira etapa do monitoramento não serem significativas, o LC3 obteve a maior eficiência de remoção de matéria orgânica. Entretanto, na segunda etapa do monitoramento, o LC3 apresentou diferença significativa em relação aos demais, indicando que a carga aplicada de  $6,48 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$  foi mais apropriada ao funcionamento do sistema de tratamento.

Outros autores utilizaram em suas pesquisas sistemas de tratamento de esgotos semelhantes ao utilizado neste trabalho e seus resultados encontram-se descritos na tabela 14.

Tabela 14 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de matéria orgânica.

Autores	Volume do LC ( $\text{m}^3$ )	Material do LC	Tipo de vegetação	TDH (h)	Efluente do LC (mg/L)	Eficiência de remoção do LC (%)
Mazzola (2003)	2,0	Brita 2	<i>Typha sp.</i> e <i>Eleocharis sp.</i>	24,0	96	33,8
Sousa et al (2005)	2,3	Areia + cascalho	<i>Juncus spp</i>	168,0	60	72,7
Brasil et al (2005)	7,2	Brita 0	<i>Typha sp.</i>	45,6	35	87,0
			<i>Typha sp.</i>	91,2	25	90,0
Collaço e Roston (2006)	10,0	Brita 3	<i>Typha sp.</i>	48	97	71,2
		Pneus picados	<i>Typha sp.</i>	48	146	57,5
Presente trabalho	7,2	Escória de aciaria + Areia	<i>Typha sp.</i> e <i>Eleocharis sp.</i>	12,4	49	74,0

## 5.2 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA O PARÂMETRO $DBO_5$

O parâmetro  $DBO_5$  (demanda bioquímica de oxigênio), assim como o parâmetro descrito no item 5.1, está relacionado à quantidade de matéria orgânica presente em

corpos d'água. Entretanto, este parâmetro destina-se a uma parcela mais específica da matéria orgânica: a fração biodegradável.

DBO<sub>5</sub> é assim chamada devido à convenção metodológica que define como padrão que à temperatura de 20°C, num volume determinado, é aferida a concentração inicial e final de oxigênio dissolvido buscando determinar a quantidade de oxigênio consumido pelo metabolismo bacteriano.

### 5.2.1 Dados obtidos para o parâmetro DBO<sub>5</sub>

Encontram-se descritos nas figuras 23 e 24 os resultados dos monitoramentos do parâmetro DBO<sub>5</sub> da primeira e segunda fase desta pesquisa. O panorama geral está descrito na figura 21.

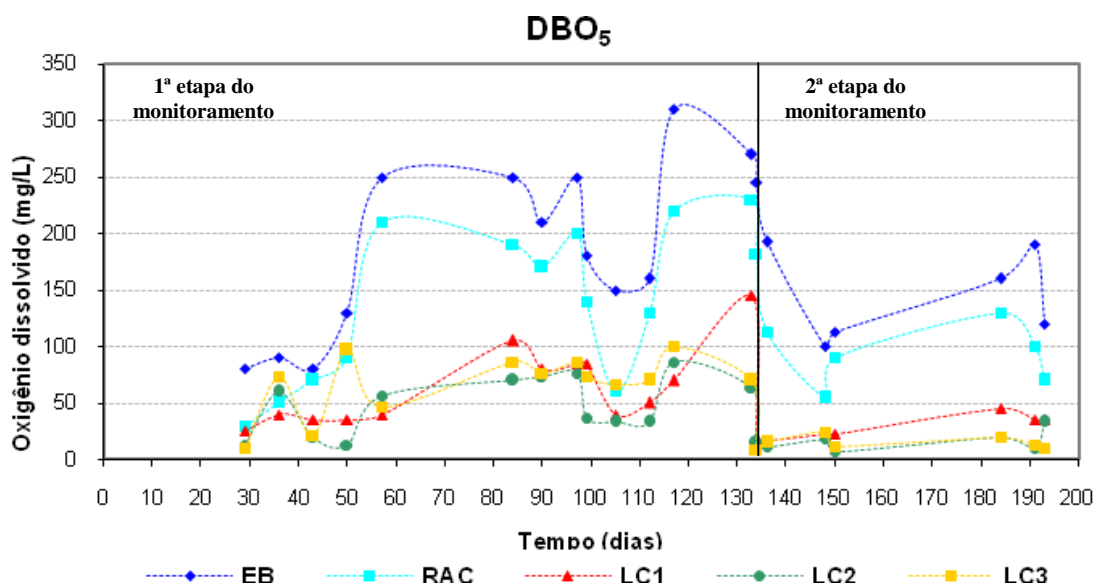


Figura 21 – Série histórica referente ao parâmetro DBO<sub>5</sub> no período de março de 2007 a março de 2008, com n=20. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

A primeira fase do monitoramento apresentou variabilidade bastante acentuada, em especial o esgoto bruto e o RAC. Não obstante, essa variação foi percebida nos leitões, apesar do processo de acentuação realizado pelos mesmos. Um fato notório relacionado aos picos de DBO<sub>5</sub> é a detecção de período de chuvas nos dias anteriores as análises. De acordo com o INMET (Instituto Nacional de Meteorologia) nos dias anteriores a algumas análises ocorreu aumento no índice pluviométrico, o que pode ter acarretado o aumento da DBO<sub>5</sub> devido ao processo de lixiviação de

material orgânico para a rede de esgotos, como folhas, restos de comida, dentre outros materiais presentes em grande quantidade no lixo domiciliar.

Assim como no parâmetro  $DQO_t$ , o RAC seguiu as tendências de variação impostas pelo esgoto bruto. O mesmo não ocorreu com os leitos cultivados, que permaneceram menos variáveis, amortecendo as variações do seu afluente.

As figuras 22 e 23 informam o comportamento do parâmetro em questão e permitem uma análise mais clara da remoção de  $DBO_5$  no sistema de tratamento descrito neste.

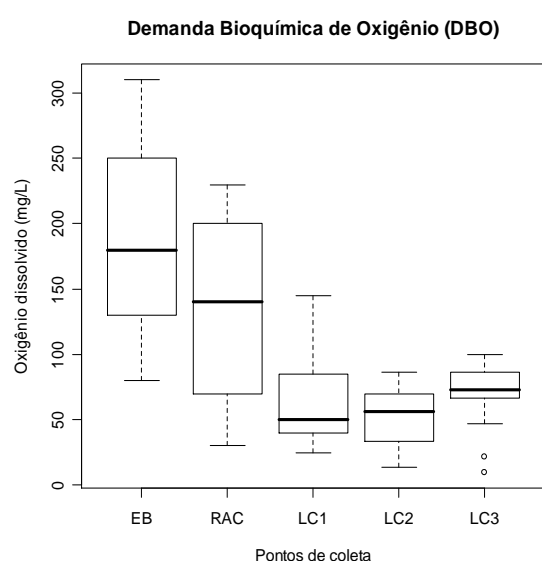


Figura 22 – Remoção de  $DBO_5$  no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

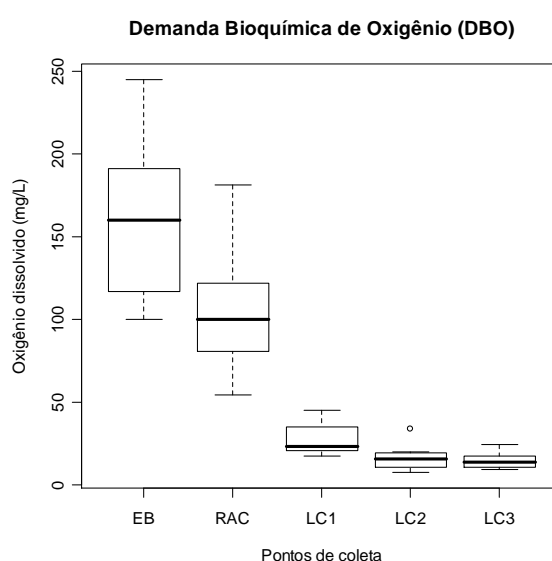


Figura 23 – Remoção de  $DBO_5$  no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

A figura 26 sugere que não houve diferença significativa entre o afluente e o efluente do RAC, o que indica um funcionamento inadequado do reator, com eficiência média de remoção de 26%. Os fatores que podem estar relacionados ao mau funcionamento do RAC foram descritos no item 5.1. Já os leitos podem ser considerados estatisticamente diferentes do efluente do RAC, ou seja, admite-se que os leitos removeram matéria orgânica do material sob tratamento, considerando suas eficiências médias respectivamente para LC1, LC2 e LC3 de 53%, 64% e 51%. Entretanto, apesar das médias dos resultados indicarem maior eficiência de remoção para LC2, estatisticamente todos os leitos comportaram-se de forma semelhante.

A figura 27 apresenta resultados distintos em relação à figura 24. Nota-se que na vazão de 75mL/s obteve-se maior eficiência entre as etapas do tratamento. Neste

caso o RAC removeu matéria orgânica na proporção de 34% em relação ao esgoto bruto. Os leitos apresentaram comportamentos diferenciados, sendo LC1 representativo diante do RAC, com 74% de remoção de matéria orgânica, porém menos eficaz que os demais, LC2 e LC3, que obtiveram respostas de 84% e 86% respectivamente, sendo considerados igualmente eficazes. No caso dos leitos 2 e 3, a composição do leito é predominantemente de escória de aciaria. Contrariando as expectativas, devido ao pH elevado do efluente, os melhores desempenhos foram nos leitos com presença de escória de aciaria, indicando que o pH não afetou de forma decisiva a população microbiana, indicando que a mesma passou por um processo bem sucedido de aclimação.

A legislação vigente (COMDEMA 02-1991) admite para o parâmetro  $DBO_5$  para o tratamento de efluentes uma carga inferior a 60mg/L, contudo internacionalmente adota-se a remoção mínima de 90%. As figuras 24, 25, 26 e 27 indicam o comportamento dos resultados no período de análise para as vazões aplicadas.

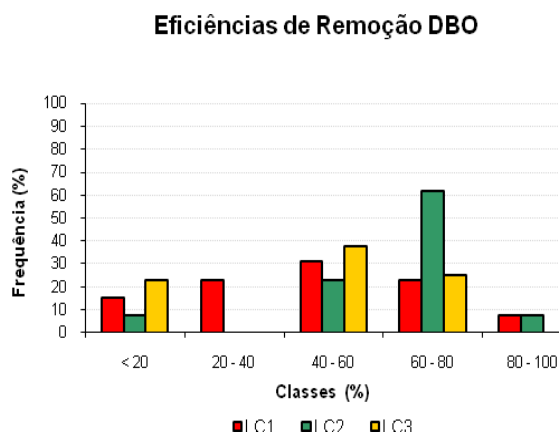


Figura 24 – Distribuição de freqüência para o parâmetro  $DBO_5$  no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h, quanto a eficiência de remoção de matéria orgânica biodegradável.

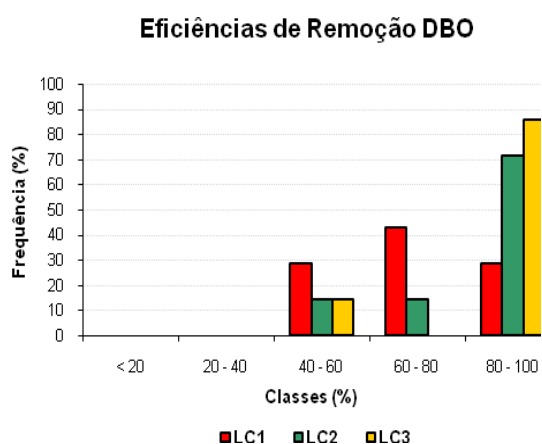


Figura 25 – Distribuição de freqüência para o parâmetro  $DBO_5$  no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h, quanto a eficiência de remoção de matéria orgânica biodegradável.

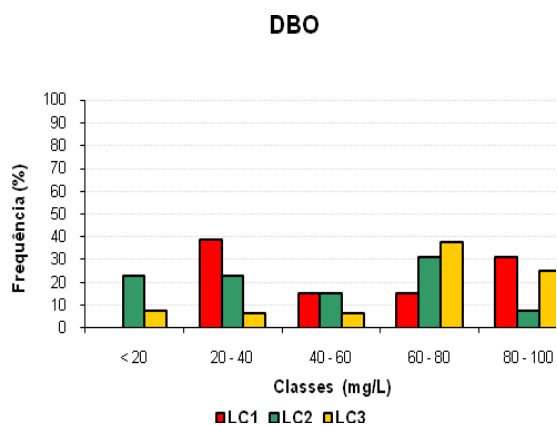


Figura 26 – Distribuição de frequência para o parâmetro  $DBO_5$  no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h, quanto a carga de saída.

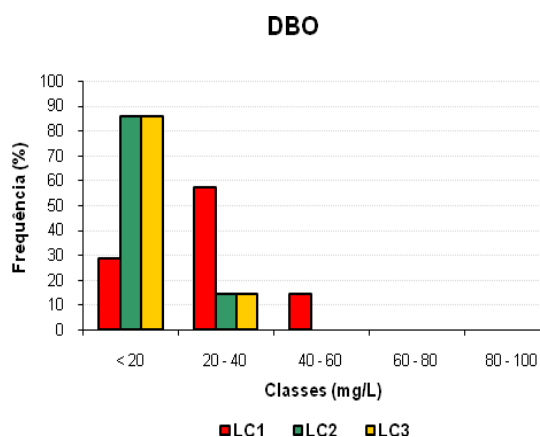


Figura 27 – Distribuição de frequência para o parâmetro  $DBO_5$  no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h, quanto a carga de saída.

A figura 24 indica que menos de 10% das amostragens realizadas para LC1 e LC2 no primeiro período experimental obtiveram eficiência de remoção superior a 90%, enquanto LC3 não obteve resultados adequados de remoção no mesmo período. Contudo, quando analisamos de acordo com a carga de saída (Figura 26), nota-se que aproximadamente 60% das amostragens de LC1 e LC2 estavam abaixo de 60mg/L, visto que LC3 obteve em torno de 30% das amostragens abaixo do valor acima citado.

No segundo período experimental, os resultados apresentaram-se de forma distinta. As eficiências de remoção foram superiores em LC2 e LC3 em torno de 70% e 85% respectivamente, enquanto LC1 apresentou apenas 30% das amostras dentro do padrão. Seguindo o comportamento do primeiro período experimental, a interpretação dos resultados quanto à carga de saída foram mais favoráveis, visto que 100% das amostras de LC1, LC2 e LC3 atenderam ao padrão estabelecido.

### 5.2.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro DBO

Neste trabalho o principal objetivo é a discussão entre as diferenças apresentadas pelos leitos estudados. Cada leito cultivado desenvolveu respostas aos incentivos do meio, de acordo com as suas características construtivas. Buscando avaliar o comportamento de cada leito, viabiliza-se na figura 28 a avaliação da eficiência dos leitos pesquisados e suas variações de carga.



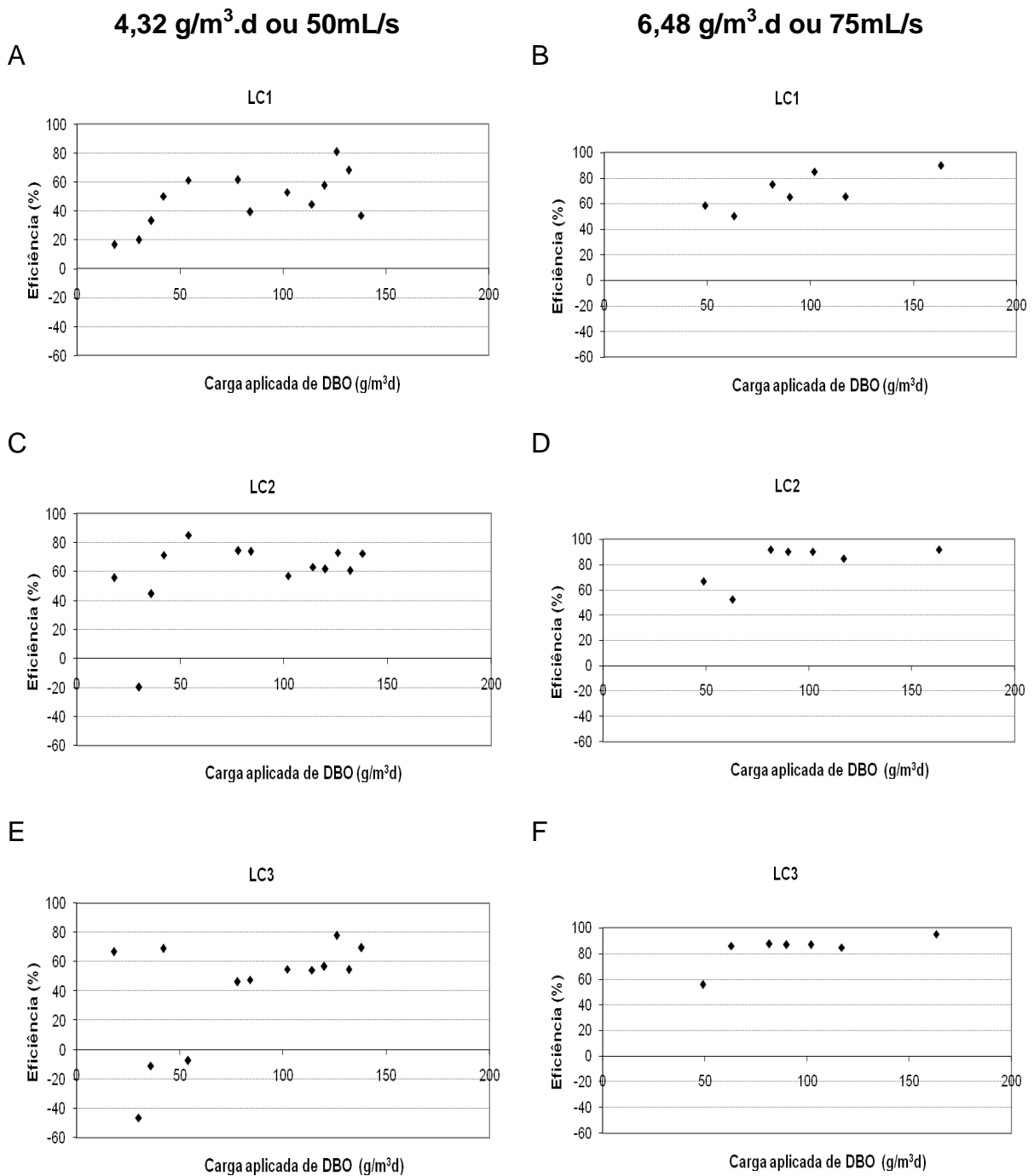


Figura 28 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro DBO<sub>5</sub> nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

A partir da comparação entre os leitos 1, 2 e 3, considerando a aplicação de carga de 4,32g/m<sup>3</sup>.d, observou-se uma considerável variabilidade de resultados, principalmente nos leitos com escória.

No LC1 nota-se que cargas inferiores a  $50 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$  apresentaram eficiências mais baixas, em torno de 10% a 50%. Com o aumento da carga aplicada, as eficiências tenderam a aumentar, variando de 30% a 90%.

O LC2 demonstrou um comportamento similar, no qual cargas inferiores a  $50 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$  obtiveram resultados muito variáveis, desde ineficiência de 20% até eficiência de 80%. Contudo, com o aumento das cargas o leito demonstrou maior estabilidade com eficiências entre 50 e 90%.

Os resultados das análises de LC3 foram próximos aos de LC2, com grandes diferenças nas eficiências para cargas até próximo de  $50 \text{ g/m}^3 \cdot \text{d}$  e uma forte tendência a estabilidade para valores de carga superiores ao citado anteriormente.

O conjunto de resultados dos leitos indica que cargas mais elevadas foram estabilizadas de forma mais eficaz pelos leitos, confirmando indícios observados em outros parâmetros analisados.

No decorrer do experimento realizado neste trabalho, em decorrência dos resultados apresentados na primeira etapa do monitoramento, uma nova vazão foi avaliada. Esta foi de  $75 \text{ mL/s}$ , ou seja, um incremento de 50% em relação à primeira vazão avaliada. Decorrente do aumento da vazão aumentou a carga de matéria orgânica aplicada nos leitos.

Em resposta a alteração, os leitos 1, 2 e 3 reduziram a variação de eficiência, alcançando valores de 40% a 100%. Em destaque, encontra-se o LC3, no qual a grande maioria dos pontos esteve acima de 80%.

Nos leitos cuja composição era de escória de aciaria, os resultados foram superiores ao leito composto por brita, o que indica influência da escória no tratamento do efluente sanitário possivelmente devido a possível formação de compostos secundários a partir do óxido de cálcio ( $\text{CaO}$ ) presente no efluente.

Os relatos de diversas pesquisas apontam a eficiência da retirada de  $\text{DBO}_5$  em leitos cultivados entre 74,0% (Gersberg *et al*) e 99,4% (Viczeviski & Marchesini, 2002), indicando que o sistema desenvolvido nesta pesquisa obteve resultados inferiores aos demais, 56% em média, provavelmente relacionados aos problemas técnicos do sistema de tratamento implementado aqui, apresentados no item 5.1.

---

### 5.3 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO NTK

O Nitrogênio é componente muito importante pertinente ao tratamento de água e efluentes. Dentro do seu ciclo, pode ser encontrado sob a forma de nitrogênio molecular ( $N_2$ ), nitrogênio orgânico (forma variável), amônia livre ( $NH_3$ ), íon amônio ( $NH_4^+$ ), íon nitrito ( $NO_2^-$ ) e íon nitrato ( $NO_3^-$ ).

O parâmetro NTK (Nitrogênio Total Kjeldahl) é o indicador da quantidade de nitrogênio orgânico e amônia presente no efluente, metodologia escolhida para este trabalho, pois é a mais apropriada para efluentes domésticos, cuja composição é predominantemente feita por nitrogênio orgânico e amônia.

#### 5.3.1 Dados obtidos para o parâmetro NTK

Nas figuras 33 e 34 estão descritos os resultados obtidos por meio do parâmetro NTK, para a primeira etapa do monitoramento, referente à vazão de 50mL/s, e a segunda etapa do monitoramento, referente à vazão de 75mL/s. O panorama geral do monitoramento está descrito na figura 29.

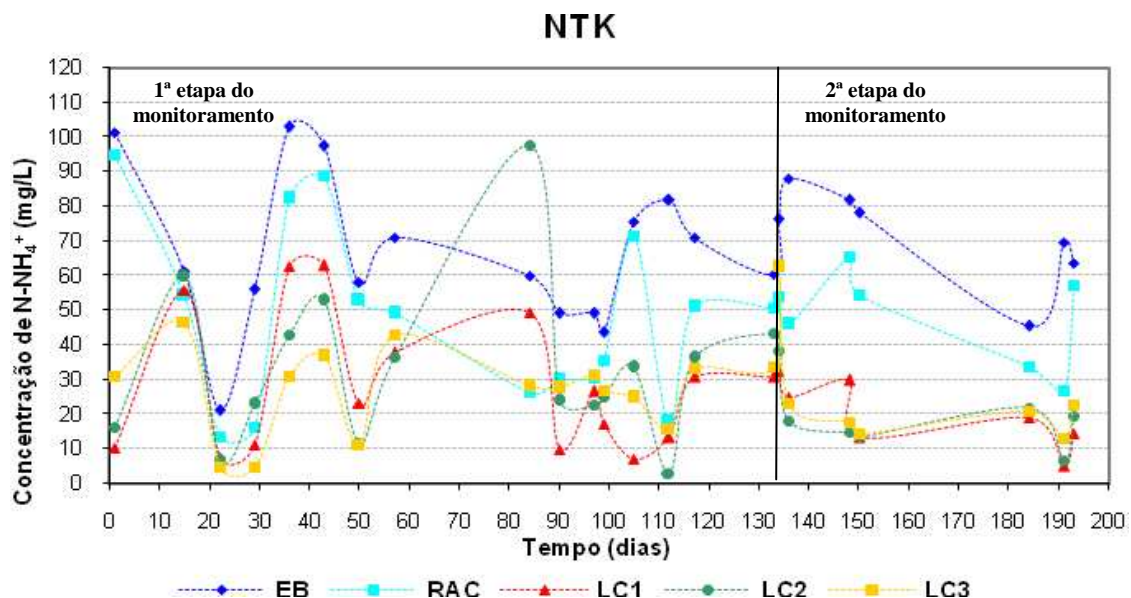


Figura 29 – Série histórica referente ao parâmetro NTK no período de março de 2007 a março de 2008, com  $n=23$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

A característica marcante do período de atuação da vazão experimental de 50mL/s é a grande variabilidade dos valores em todos os pontos de coleta. Este fenômeno não foi tão acentuado na vazão experimental de 75mL/s.

A primeira etapa do monitoramento apresentou os seguintes valores médios: 66mg/L, 48mg/L, 28mg/L, 33mg/L e 27mg/L respectivamente para EB, RAC, LC1, LC2 e LC3, indicando redução da concentração em ambas as fases do sistema de tratamento (RAC e leitos). A redução na concentração de nitrogênio também pôde ser percebido na segunda etapa do monitoramento, cujos valores médios para EB, RAC, LC1, LC2 e LC3 foram respectivamente 72mg/L, 48mg/L, 20mg/L, 19mg/L e 25mg/L.

As figuras 30 e 31 ilustram de forma mais clara a tendência de remoção descrita acima.

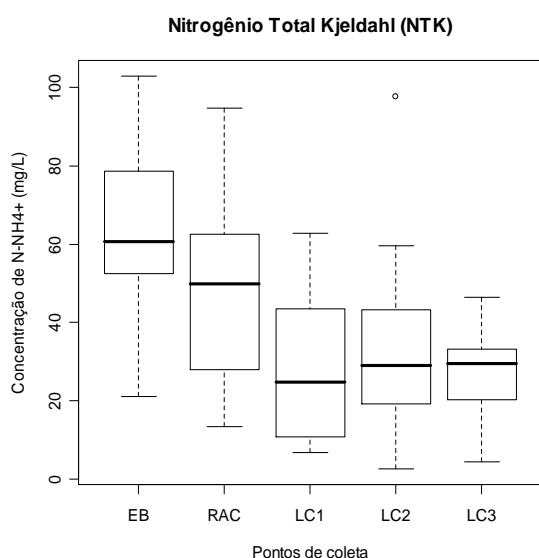


Figura 30 – Remoção de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

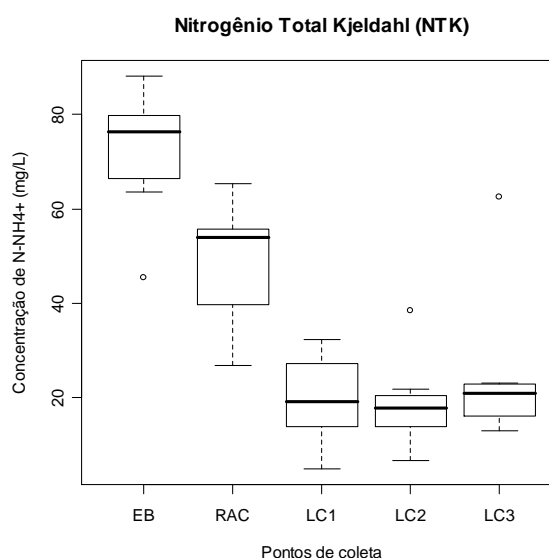


Figura 31 – Remoção de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

A eficiência de remoção de nitrogênio do sistema de tratamento descrito na presente pesquisa obteve melhor desempenho na segunda etapa do monitoramento, cuja vazão experimental foi de 75mL/s, com resultados em torno de 33% para RAC, 59% para LC1, 61% para LC2 e 48% para LC3, enquanto na vazão de 50mL/s os resultados obtidos foram de 28% para RAC, 40% para LC1, 30% para LC2 e 44% para LC3. Em ambos os períodos, que não houve diferença significativa entre os leitos.

O COMDEMA 02-1991 determina para lançamento de efluentes o valor máximo de 10mg/L de nitrogênio amoniacal. As figuras 32 e 33 mostram os valores obtidos nas amostragens realizadas nos dois períodos de monitoramento.

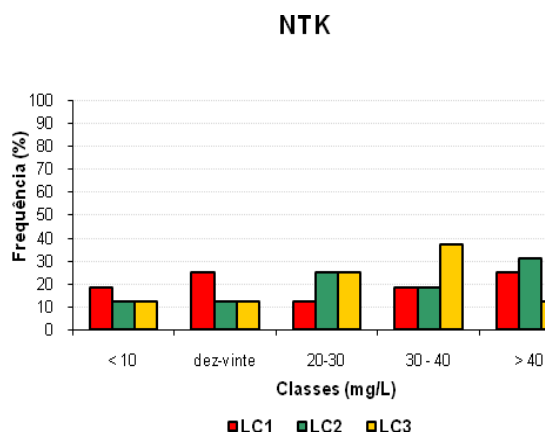


Figura 32 – Distribuição de freqüência para o parâmetro  $N-NH_4^+$  no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

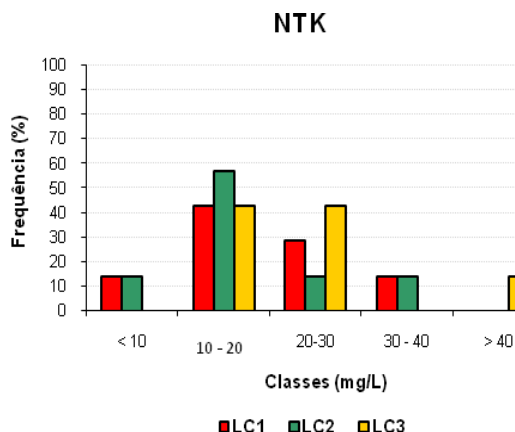


Figura 33 – Distribuição de freqüência para o parâmetro  $N-NH_4^+$  no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

As figuras apontam que na primeira etapa experimental, aproximadamente 20% das amostras provenientes de LC1 atenderam ao padrão determinado pela legislação, enquanto em LC2 e LC3 apenas 10% dos resultados estavam enquadrados no mesmo padrão. Na segunda fase experimental LC1 e LC2 obtiveram em torno de 10% dos seus valores abaixo de 10mg/L e LC3 não teve valores inferiores a 10mg/L.

### 5.3.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro NTK

Visando avaliar o comportamento dos leitos, estão presentes na figura 34 os gráficos de eficiência em relação à carga aplicada de cada leito cultivado em ambas as vazões.

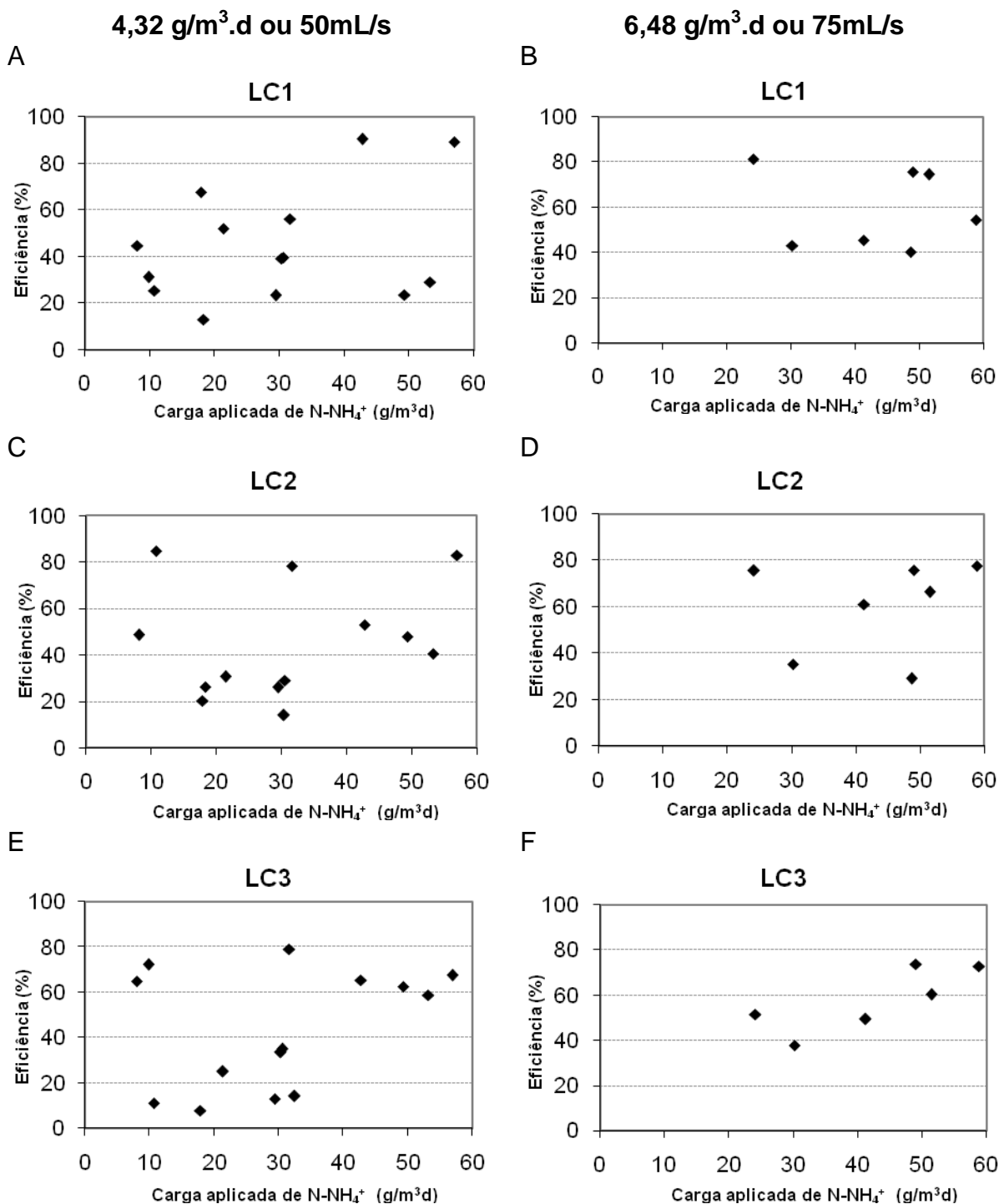


Figura 34 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro NTK nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

Nota-se uma variabilidade generalizada nos gráficos representados na figura 40. Acredita-se que a irregularidade apresentada pelos leitos está diretamente associada ao fenômeno de evapotranspiração, no qual as plantas retiram maior quantidade de água através de suas raízes, visando o controle térmico e redução do estresse causado pelo as plantas. Este fenômeno, predominante em temperaturas

mais elevadas, retira a água e cria um efeito concentrador, gerando variabilidade nas concentrações de nitrogênio monitoradas no experimento. Outro fator associado a remoção de nitrogênio é o pH, visto que em elevado pH, a nitrogênio é liberado sob a forma de amônia livre.

Apesar da variação, os valores médios obtidos no presente trabalho, quando comparado a outros autores, são ditos satisfatórios. Essa observação faz-se por meio da tabela 15.

Tabela 15 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de nitrogênio.

<b>Autores</b>	<b>Volume do LC (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Material do LC</b>	<b>Tipo de vegetação</b>	<b>TDH (h)</b>	<b>Efluente do LC (mg/L)</b>	<b>Eficiência de remoção do LC (%)</b>
Sousa et al (2000)	6,0	Areia + cascalho	<i>Juncus spp</i>	120	22,3	62,0
Sousa et al (2005)	2,3	Areia + cascalho	<i>Juncus spp</i>	168,0	28,0	44,0
Brasil et al (2005)	7,2	Brita 0	<i>Typha sp.</i>	45,6	21,0	33,0
			<i>Typha sp.</i>	91,2	13,0	57,0
Presente trabalho	7,2	Brita 2 + Areia Média	<i>Typha sp. e Eleocharis sp.</i>	12,4	19,0	61,0
		Escória de aciaria + Areia			25,0	48,0
Neder (2007)	45	Brita 2	<i>Typha sp.</i>	–	57	5,2

#### 5.4 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO P<sub>TOTAL</sub>

O fósforo (P) tornou-se um poluente de grande preocupação, devido a eutrofização e deterioração dos cursos de água, quando lançado em quantidades excessivas nas massas de água (Sedlak, 1991). Em esgotos domésticos, o fósforo apresenta-se principalmente sob a forma de fosfatos, seja na forma inorgânica (polifosfatos e

ortofosfatos) ou na forma orgânica (ligado a compostos orgânicos). Além disso, destaca-se por ser necessário ao metabolismo biológico.

#### 5.4.1 Dados obtidos para o parâmetro $P_{total}$

Abaixo, nas figuras 41 e 42, estão ilustrados os resultados do monitoramento realizado para as vazões experimentais de 50mL/s e 75mL/s referentes ao parâmetro  $P_{total}$ . A visão global do período experimental pode ser observada na figura 35.

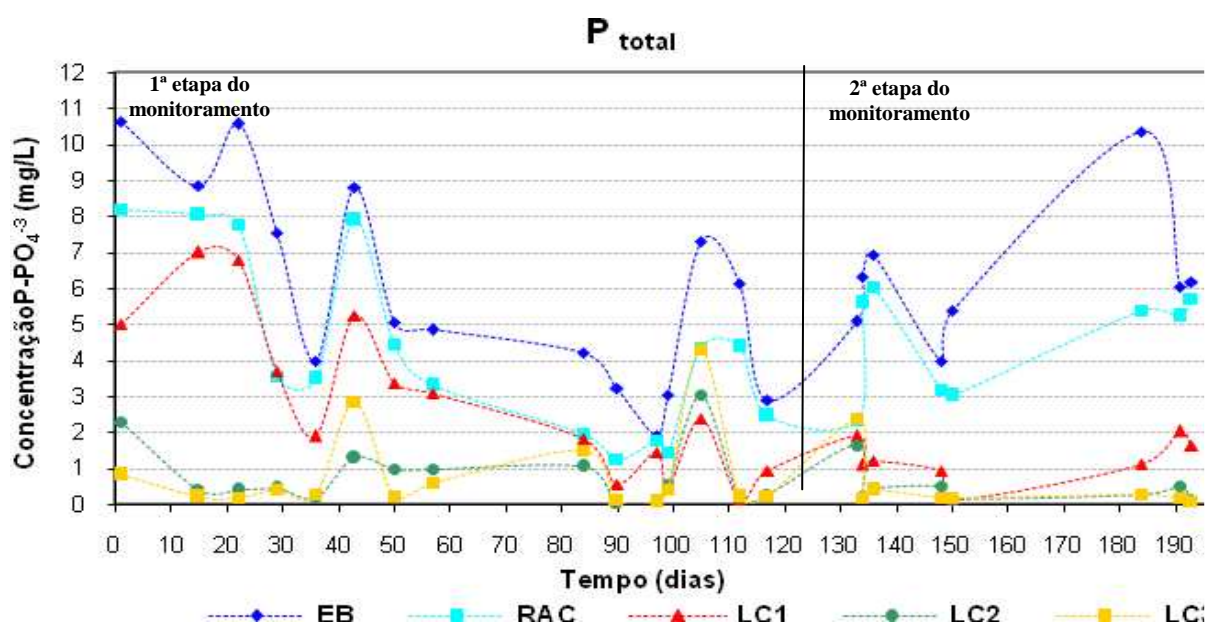


Figura 35 – Série histórica referente ao parâmetro  $P_{total}$  no período de março de 2007 a março de 2008, com  $n=23$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

A série histórica representando a primeira etapa do monitoramento indica grande variação já no afluente do sistema, entre 2 a 11mg/L, com média de 5,9mg/L, resultado este possivelmente ligado a fatores abióticos, como a ocorrência de chuvas.

Visto o comportamento do afluente, o RAC seguiu a mesma tendência, com baixa capacidade de amortecimento de cargas, variando de 1 a 9,5mg/L, com valor médio de 4,2mg/L.



Os leitos apresentaram menor variabilidade, entre 0,1 a 4,5mg/L, quando relacionado a etapa de tratamento anterior do sistema. Os valores médios de LC1, LC2 e LC3 são respectivamente 2,9mg/L, 0,9mg/L e 0,9mg/L.

A segunda etapa do monitoramento, cuja vazão foi de 75mL/s, está representada na figura 35. Observa-se comportamento semelhante à primeira vazão experimental, entretanto os valores obtidos na concentração do afluente foram menores e a variação está em torno de 4 a 10,5mg/L para EB e 2 a 6mg/L para RAC, com valores médios de 6,5mg/L e 4,9mg/L respectivamente para EB e RAC . Por sua vez, os leitos apresentaram resultados entre 0,1 e 2mg/L , com valores médios de 1,2mg/L, 0,3mg/L e 0,2mg/L respectivamente para LC1, LC2 e LC3.

Os valores indicam boa capacidade de remoção de fósforo, como pode ser percebido nas figuras 36 e 37.

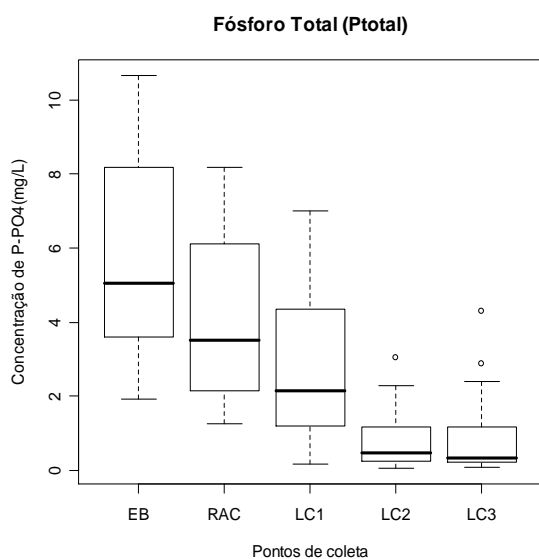


Figura 36 – Remoção de  $P_{total}$  no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

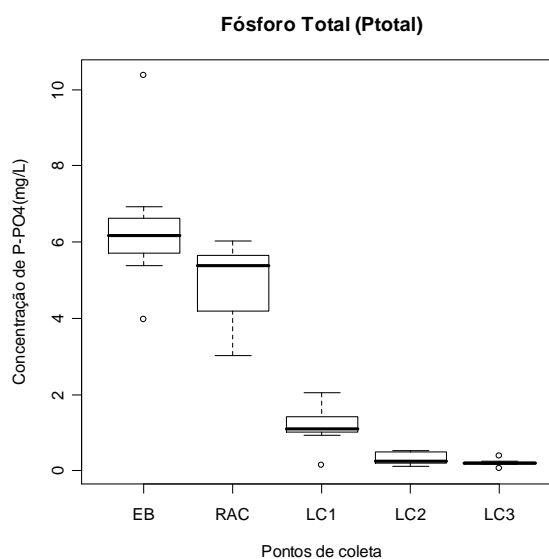


Figura 37 – Remoção de  $P_{total}$  no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

Na vazão experimental de 50mL/s, o sistema de tratamento foi notadamente eficiente em suas etapas, apresentando 29% de remoção de fósforo no RAC e 31%, 79% e 78% de remoção respectivamente para os leitos 1, 2, e 3. Nota-se que os leitos compostos por escória de aciaria apresentaram melhores resultados em relação ao leito composto por brita. Todavia, entre LC2 e LC3 não houve diferenças significativas entre os tratamentos.

Quanto à eficiência na remoção de fósforo, a vazão experimental de 75mL/s comportou-se de forma semelhante s vazão de 50mL/s. Entretanto, resultados ainda

melhores foram obtidos nos leitos, apesar da pequena queda na taxa de remoção do RAC em relação à primeira etapa do monitoramento, com resultado de 24% de remoção de fósforo. Como citado, os leitos apresentaram as respectivas taxas de remoção: 76% para LC1, 93% para LC2 e 96% para LC3, confirmando a influência positiva da presença de escória de aciaria para remoção de fósforo.

O COMDEMA 02-1991 determina quanto ao parâmetro fósforo total que para o lançamento de efluentes a carga de fósforo total deve ser inferior a 1mg/L. Os desempenhos dos resultados obtidos pelas análises das amostras dos efluentes dos leitos encontram-se descritas nas figuras 38 e 39.

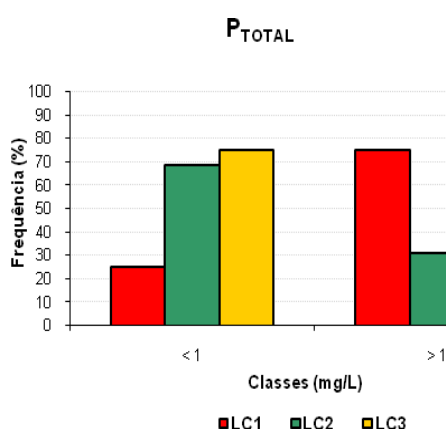


Figura 38 – Distribuição de frequência para o parâmetro P<sub>TOTAL</sub> no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

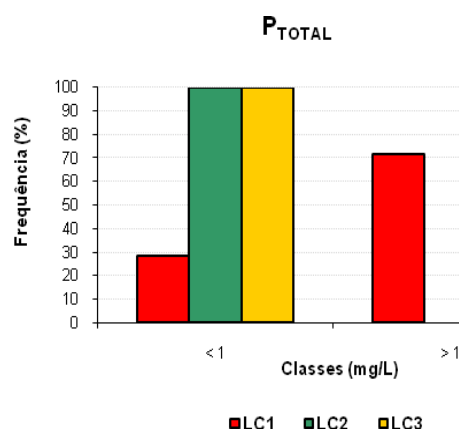


Figura 39 – Distribuição de frequência para o parâmetro P<sub>TOTAL</sub> no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

Nas duas etapas do monitoramento nota-se o desempenho superior na remoção de fósforo nos leitos que utilizam escória de aciaria como meio suporte, obtendo em torno de 70% e 75% das amostras de LC2 e LC3 respectivamente, abaixo de 1mg/L na primeira etapa experimental. O LC1 obteve cerca de 25% das amostras abaixo do valor padrão.

Na segunda etapa experimental os valores foram ainda mais significativos, visto que 100% de LC2 e LC3 estavam abaixo de 1mg/L, enquanto LC1 apresentou cerca de 70% das amostras abaixo do valor citado.

### 5.4.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro $P_{total}$

A excelente atuação dos leitos da presente pesquisa para remoção de fósforo está descrita nos gráficos da figura 40.

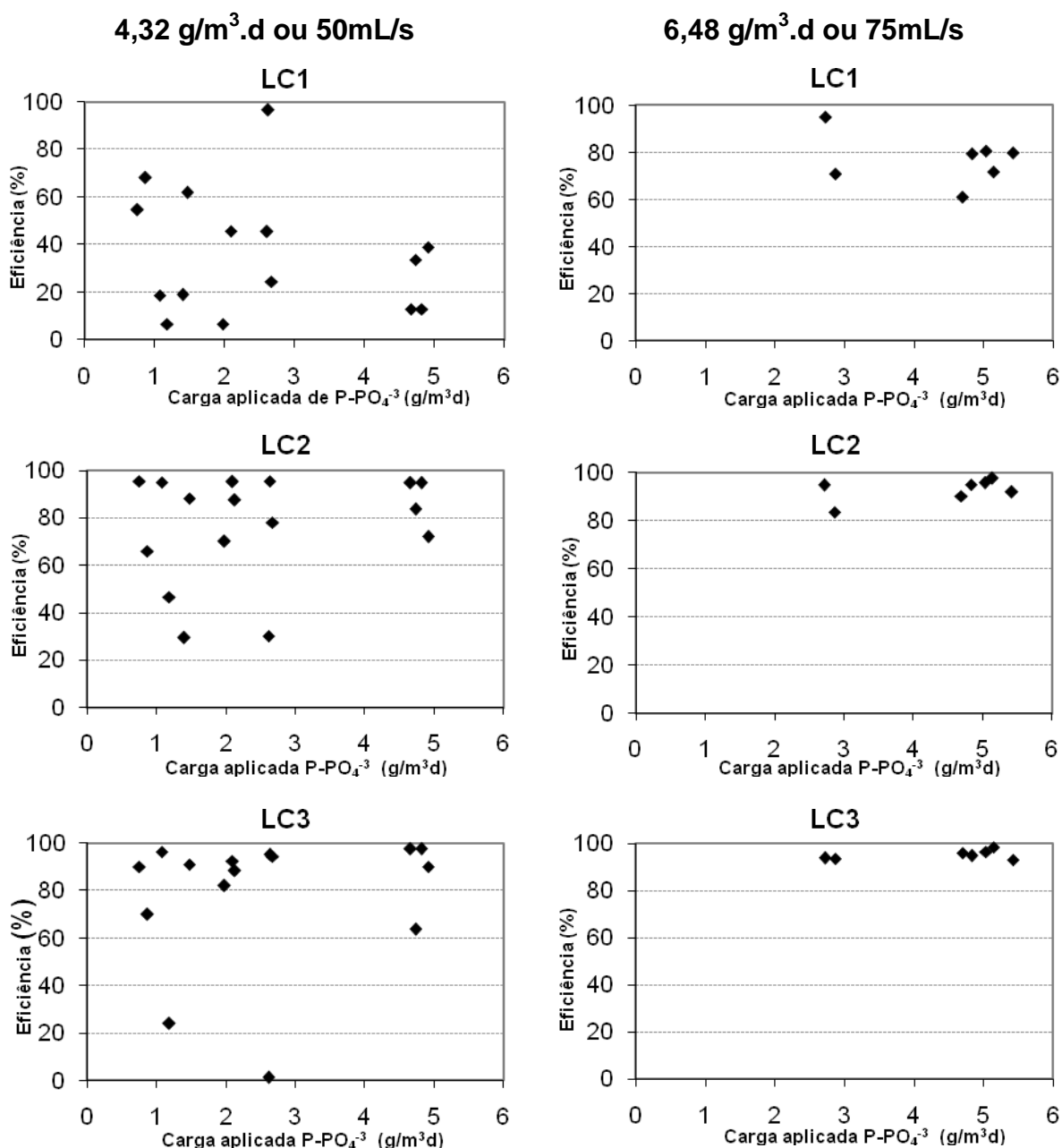


Figura 40 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro  $P_{total}$  nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

A partir da comparação entre as vazões experimentais no LC1, nota-se uma tendência, na qual o aumento na carga aplicada reduz a eficiência de remoção de fósforo. Esse comportamento se faz esperado, visto que a carga ultrapassa o limite de absorção dos microrganismos e das plantas, mantendo-se em solução.

Contudo, os leitos 2 e 3 apresentam comportamento distinto. Nota-se que com o aumento da carga ocorre o aumento da eficiência de remoção, indicando que o meio não está saturado. Esse fato deve-se a remoção de fósforo por meio de precipitação, visto que o mesmo reage com o carbonato de cálcio, formado a partir da hidratação do óxido de cálcio liberado pela escória de aciaria, formando fosfato de cálcio.

Outras pesquisas foram realizadas utilizando leitos na remoção de fósforo. Os resultados podem ser comparados com a presente pesquisa por meio da análise da tabela 16.

Tabela 16 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de fósforo.

<b>Autores</b>	<b>Volume do LC (m<sup>3</sup>)</b>	<b>Material do LC</b>	<b>Tipo de vegetação</b>	<b>TDH (h)</b>	<b>Efluente do LC (mg/L)</b>	<b>Eficiência de remoção do LC (%)</b>
Sousa et al (2000)	6,0	Areia + cascalho	<i>Juncus spp</i>	120	1,1	83,0
Sousa et al (2005)	2,3	Areia + cascalho	<i>Juncus spp</i>	168,0	3,0	56,5
Brasil et al (2005)	7,2	Brita 0	<i>Typha sp.</i>	45,6	4,0	35,0
			<i>Typha sp.</i>	91,2	4,0	48,0
Presente trabalho	7,2	Brita 2 + Areia Média	<i>Typha sp.</i> e <i>Eleocharis sp.</i>	12,4	1,2	76,0
		Escória de aciaria + Areia			0,3	93,0
Neder (2007)	45	Brita 2	<i>Typha sp.</i>	–	11,2	35,5

## 5.5 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO COLIFORMES TOTAIS

A análise do parâmetro coliformes totais faz-se necessária devido sua capacidade indicativa de organismos potencialmente patogênicos. O grupo é comumente utilizado, pois se apresentam em grandes quantidades nas fezes humanas, possui resistência superior a da maioria das bactérias patogênicas e seu mecanismo de remoção para tratamento de água e esgoto é o mesmo das outras bactérias.

### 5.5.1 Dados obtidos para o parâmetro coliformes totais

Nas séries históricas representadas na figura 41 estão descritos os resultados obtidos para o parâmetro coliformes totais na primeira e segunda etapa do monitoramento.

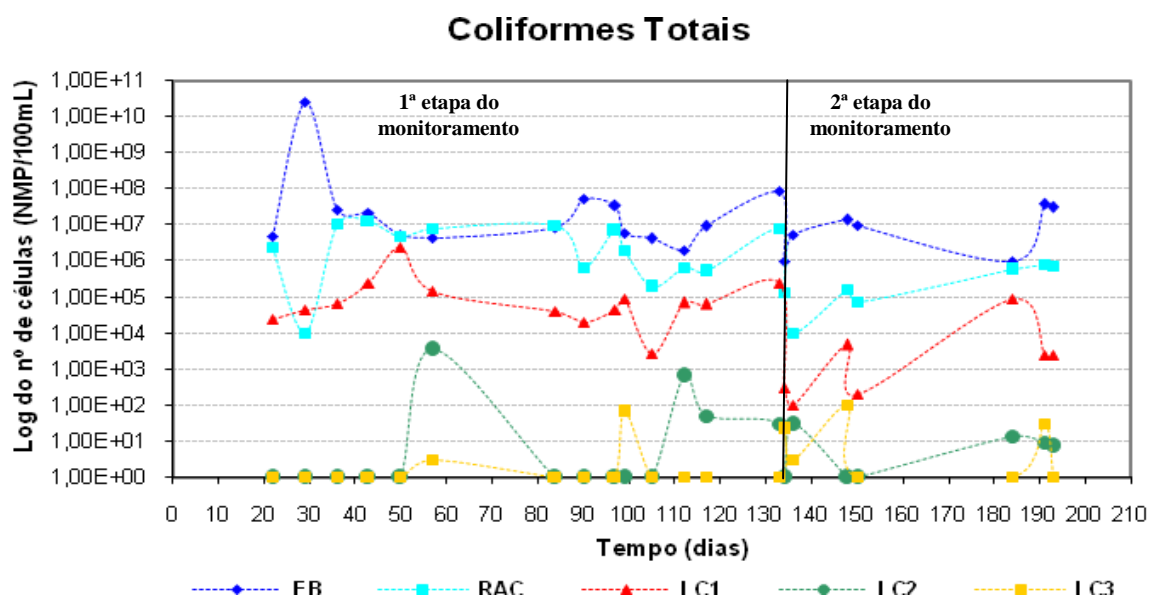


Figura 41 – Série histórica referente ao parâmetro coliformes totais no período de março de 2007 a março de 2008, com n=21. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

De acordo com os dados descritos na figura 41 nota-se, em ambos os períodos de monitoramento, a tendência de remoção de coliformes totais nas etapas do sistema de tratamento. O RAC apresentou taxa relativa à eficiência de remoção de 99,73% e os leitos de 94,71% para LC1, 99,99% para LC2 e 100,00 para LC3 na vazão de 50mL/s, enquanto na vazão de 75mL/s as eficiências obtidas foram de 97,48% para

o RAC, 99,15% para LC1, 100,00% para LC2 e 99,99% para LC3, destacando a atuação dos leitos.

Apesar do bom desempenho de LC1, LC2 e LC3 obtiveram resultados excelentes, visto que em média, considerando a primeira vazão experimental (50mL/s), LC2 obteve 298NMP/100mL e LC3 5,0NMP/100mL. Na segunda vazão experimental, os resultados de LC2 e LC3 mantiveram a mesma tendência com valores para o número de células de 9,0NMP/100mL e 22,0NMP/100mL respectivamente.

De acordo com a legislação vigente para lançamento de efluentes (CONAMA 357), os valores médios obtidos por LC2 na vazão de 75mL/s e LC3 em ambas as vazões experimentais estão dentro da norma e aptos ao lançamento considerando o parâmetro analisado. Nas figuras 42 e 43, localizadas abaixo estão descritos os resultados das amostragens realizadas.

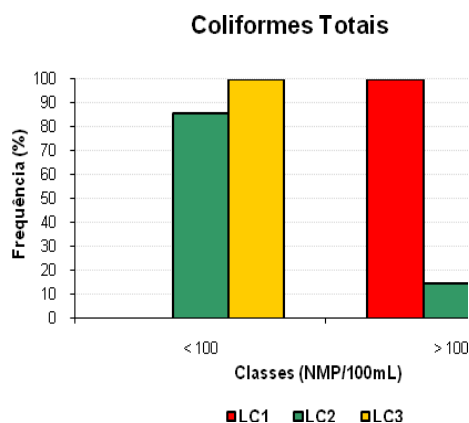


Figura 42 – Distribuição de frequência para o parâmetro número de células de coliformes totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

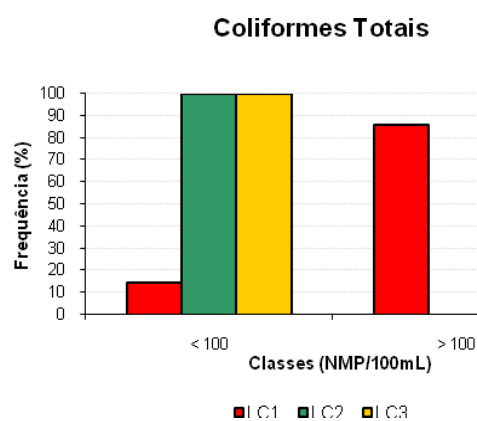


Figura 43 – Distribuição de frequência para o parâmetro número de células de coliformes totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

A frequência dos dados indica que LC1 apresentou apenas 10% dos resultados dentro do padrão de lançamento de efluentes do CONAMA 357/05. Esse dado foi derivado da segunda etapa de monitoramento. Todavia, os leitos com presença de escória (LC2 e LC3) obtiveram resultados expressivos. Na primeira etapa experimental, 70% e 100% das amostras de LC2 e LC3 respectivamente estavam abaixo de 100NMP/100mL. Na segunda etapa experimental 100% das amostras de LC2 e LC3 estavam abaixo do valor padrão supracitado.

Esse resultado obtido para os leitos com presença de escória de aciaria deve-se as propriedades do hidróxido de cálcio, derivada de sua dissociação iônica em íons

cálcio e íons hidroxila, sendo que a ação destes íons sobre os tecidos e as bactérias explicam as propriedades biológicas e antimicrobianas desta substância.

Visando a comparação do desempenho de leitos na remoção de coliformes totais, observa-se a tabela 17.

Tabela 17 – Comparações entre pesquisas com sistemas de tratamento de esgoto utilizando leitos para remoção de coliformes totais.

Autores	Volume do LC (m <sup>3</sup> )	Material do LC	Tipo de vegetação	TDH (h)	Eficiência de remoção do LC (%)
Costa et al (2003)	0,227	Brita 2	<i>Typha</i> spp.	240,0	99,60
Reis et al (2003)	225,0	Pedras (5 a 10 cm)	-	23,0	55,5
Brasil et al (2005)	7,2	Brita 0	<i>Typha</i> sp.	45,6	92,5
			<i>Typha</i> sp.	91,2	99,8
Presente trabalho	7,2	Brita 2 + Areia Média	<i>Typha</i> sp. e <i>Eleocharis</i> sp.	12,4	99,99
		Escória de aciaria + Areia			100,00

## 5.6 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO *E.coli*

*E. coli* é a principal bactéria do grupo coliformes fecais, presente em abundância nas fezes humanas e de animais. Comumente utilizada como parâmetro, pois é a única bactéria que garante a contaminação exclusivamente fecal.

### 5.6.1 Dados obtidos para o parâmetro *E. coli*

Os resultados das séries históricas das vazões experimentais de 50 mL/s e 75 mL/s estão descritas na figura 44.

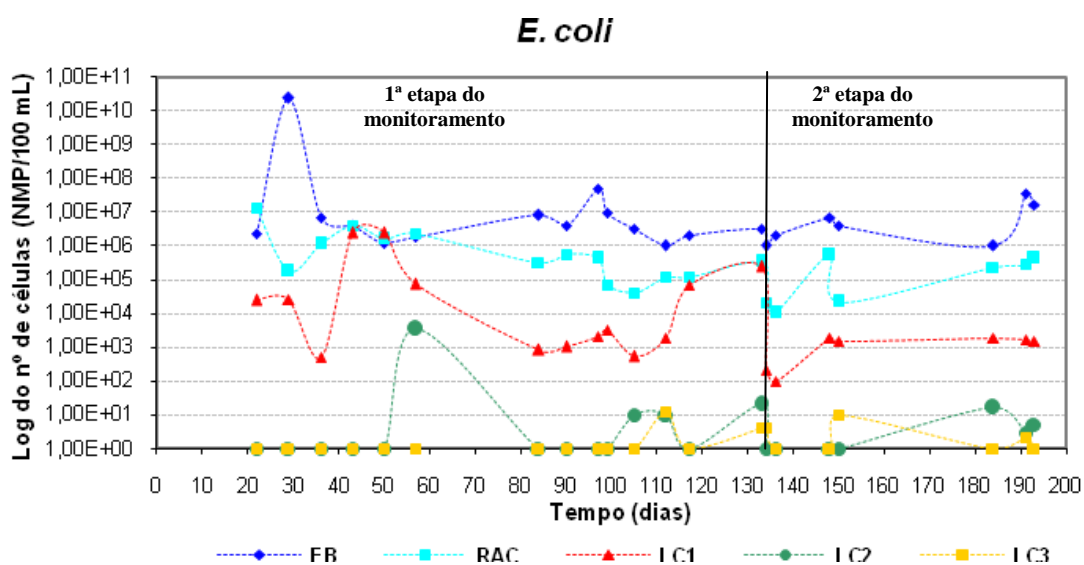


Figura 44 – Série histórica referente ao parâmetro *E. coli* no período de março de 2007 a março de 2008, com n=21. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

Os resultados obtidos por meio do logaritmo do número de células de *E. coli* indica um comportamento muito próximo ao descrito do item anterior no parâmetro coliformes totais, destacando o comportamento dos leitos 2 e 3. As eficiências de remoção para vazão de 50mL/s são de 99,90% para o RAC, 78,38% para LC1, 99,99 para LC2 e 100,00% para LC3. Na segunda vazão experimental aplicada (75mL/s) as taxas indicativas da eficiência de remoção foram de 97,89% para o RAC, 99,13% para LC1 e 100,00% para LC2 e LC3. Nota-se que para a maioria das análises realizadas no primeiro período de monitoramento, cuja vazão aplicada foi de 50mL/s, o resultado obtido indica valor inferior a 1NMP/100mL, atendendo a legislação vigente para lançamento de efluentes (CONAMA 357). O mesmo comportamento é observado na vazão de 75mL/s, contudo o desempenho de LC2 foi inferior ao de LC3. A razão para os desempenhos destacados de LC2 e LC3 foram citadas no item anterior.

Abaixo, nas figuras 45 e 46 estão os resultados obtidos em ambos os períodos de monitoramento de acordo com a legislação vigente para lançamento de efluentes (CONAMA 357/05).



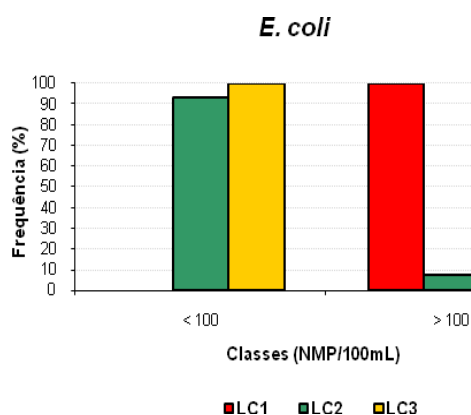


Figura 45 – Distribuição de freqüência para o parâmetro número de células de *E. coli* no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

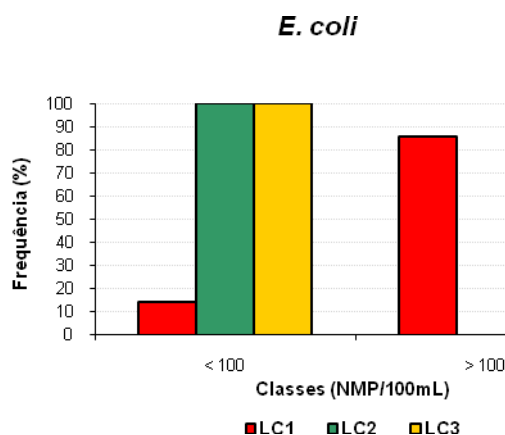


Figura 46 – Distribuição de freqüência para o parâmetro número de células de *E. coli* no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

Os resultados indicam superior desempenho de LC3 com 100% dos valores obtidos abaixo de 100NMP/100mL nas duas etapas de monitoramento. Por sua vez, LC2 apresentou resultados próximos, com aproximadamente 90% dos valores dentro do padrão exigido pela legislação na primeira etapa do monitoramento e 100% dos valores, na condição acima citada, na segunda etapa do monitoramento. Já LC1 obteve apenas 10% dos seus valores dentro da legislação, fato ocorrido apenas na segunda etapa do monitoramento.

## 5.7 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO ST

Todos os poluentes presentes na água, com exceção dos gases dissolvidos, contribuem para a carga de sólidos, agregando a este parâmetro grande importância na análise de águas e efluentes. Entretanto, os sólidos podem ser analisados de acordo com suas características físicas ou químicas. A forma mais prática de análise é a física, adotada nesta pesquisa, classificando de acordo com o tamanho e o estado. Assim sendo, os sólidos totais representam os sólidos em suspensão e os dissolvidos.

### 5.7.1 Dados obtidos para o parâmetro ST

As séries históricas resultantes das análises de sólidos totais nas vazões de 50mL/s e 75mL/s encontram-se descritas na figura 47.

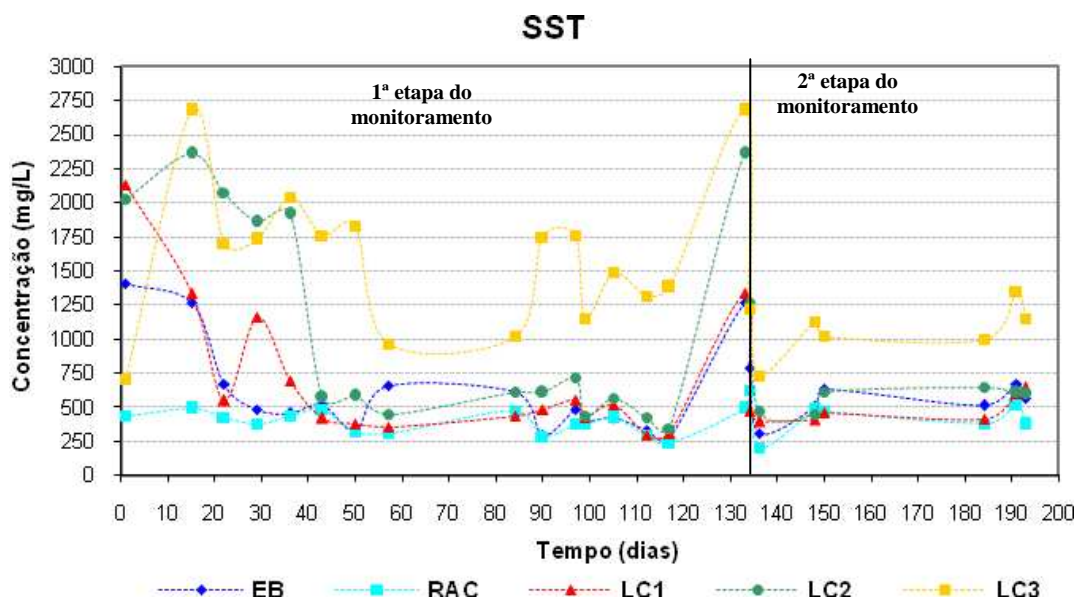


Figura 47 – Série histórica referente ao parâmetro sólidos suspensos totais no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

Na primeira etapa do monitoramento os resultados destacaram-se pelos seus valores elevados, estes ainda mais acentuados nos leitos 2 e 3, ou seja, na presença da escória de aciaria.

O afluente do sistema (esgoto bruto) na vazão de 50mL/s, apresentou picos iniciais e finais possivelmente devido a períodos de interrupção do fornecimento de esgoto para o núcleo de pesquisa da UFES (Núcleo Água). Quando cessada a recepção do esgoto, uma parte do mesmo fica retida em tubulações promovendo acúmulo de sólidos e, com a volta do processo de bombeamento, pode ocorrer arraste do material sedimentado na tubulação gerando picos nas análises do material. Nota-se que os picos ocorreram no período de partida e após uma interrupção de aproximadamente 10 dias. O mesmo não foi percebido no período de interrupção entre 60 e 90 dias, pois as análises posteriores a este período foram realizadas após 2 dias da retomada do sistema.

Apesar da variabilidade inicialmente notada, o RAC atuou satisfatoriamente, à medida que possibilitou o amortecimento da carga, quando comparado aos demais pontos do sistema. Todavia, os leitos imprimiram grande elevação na quantidade de

material particulado devido à presença de CaO liberado pela escória, sendo notado principalmente na fração dissolvida.

Na segunda etapa do monitoramento, os resultados foram mais constantes em relação à primeira etapa do monitoramento. Porém o comportamento dos leitos foi similar, elevando a carga de sólidos gerando em consequência a ineficiência do sistema. Essa elevação de sólidos no sistema de tratamento foi mais baixa na vazão de 75mL/s, fator possivelmente relacionado a tendência da escoria a estabilização e liberação de menor carga de CaO.

A avaliação do desempenho da associação RAC + leitos, com relação à remoção de sólidos totais, pode ser realizada a partir dos gráficos das figuras 48 e 49.

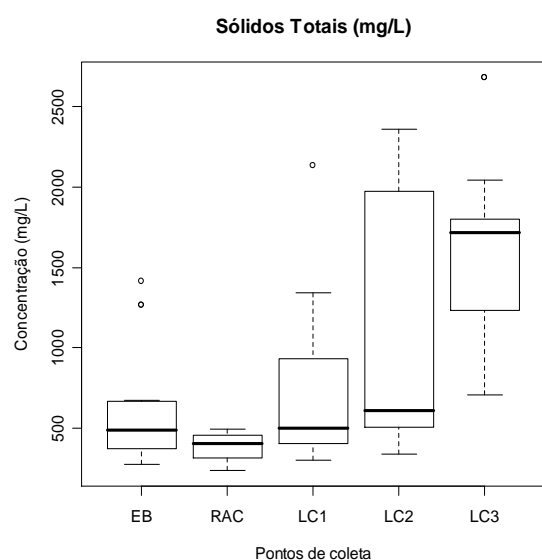


Figura 48 – Remoção de SST no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

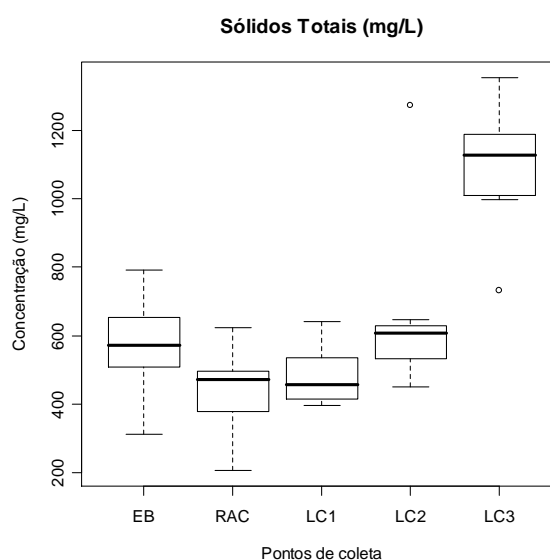


Figura 49 – Remoção de SsT no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH de 12,5h.

A partir das figuras, nota-se que em ambas as vazões o sistema foi ineficiente em relação à remoção de sólidos totais.

A partir das figuras, nota-se que em ambas as vazões o sistema foi ineficiente em relação à remoção de sólidos totais.

A maior ineficiência foi obtida na vazão de 50mL/s para o leito LC3, chegando a triplicar os valores iniciais. Na aplicação de 75mL/s o pior resultado também foi obtido no LC3 com até o dobro dos valores iniciais. O desempenho negativo agregado ao LC3 deve-se a sua composição ser totalmente feita por escória de aciaria, elevando a liberação de compostos como CaO principalmente, e elevando ainda mais a carga de sólidos presentes no efluente.

O COMDEMA 02-1991 estabelece valores inferiores a 200mg/L de sólidos totais para o lançamento de efluentes. Sendo assim, de acordo com as figuras 50 e 51, os resultados das amostragens relativas ao parâmetro sólidos totais não atenderam o padrão determinado pelo COMDEMA, sendo os valores mais elevados encontrados nos leitos 2 e 3 para ambas as vazões experimentais.

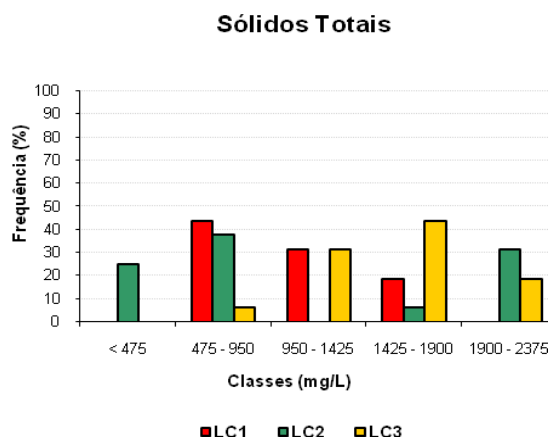


Figura 50 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.



Figura 51 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

### 5.7.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro ST

O sistema de tratamento denominado leitos cultivados é conhecidamente eficiente na remoção de sólidos. Brasil *et al* (2005) obteve eficiência de remoção de média de 91% utilizando associação em série de tanque séptico e leitos cultivados. Entretanto, o presente trabalho obteve resultados negativos quanto à remoção de sólidos totais. Os resultados dos leitos estão descritos abaixo pelos gráficos presentes na figura 52.

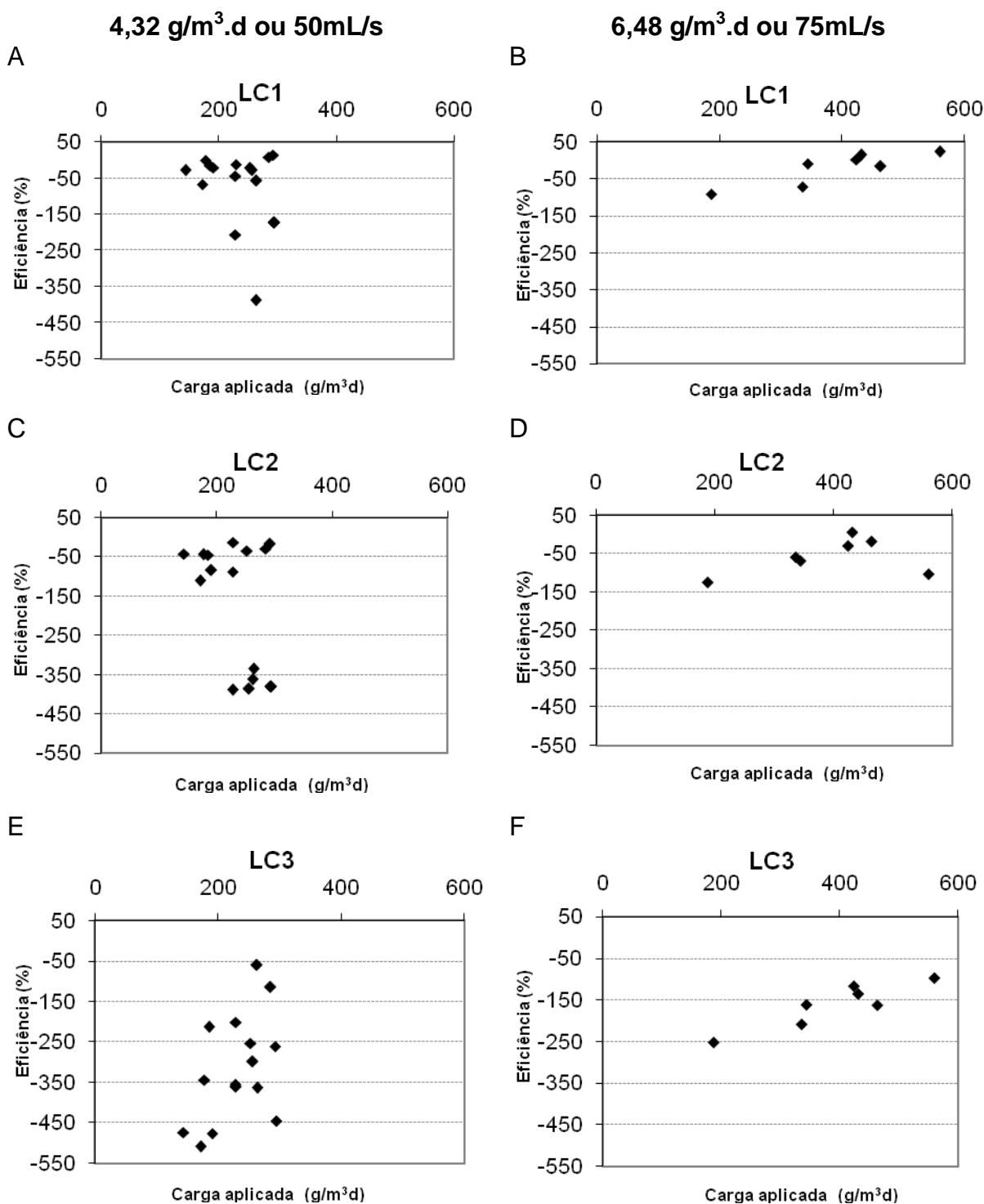


Figura 52 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SST nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

O LC1 demonstrou o melhor resultado, apresentando as menores ineficiências. Este fato deve-se à sua composição ser predominantemente feita por brita. Porém, outras pesquisas realizadas com o mesmo material apresentam resultados positivos, o que

não foi percebido neste trabalho. É sabido que o clima predominante no Brasil prevê temperaturas médias elevadas. Buscando alternativas de adaptação ao clima, as plantas desenvolveram um sistema de controle térmico denominado evapotranspiração. Acredita-se que essa adaptação ao clima realizada pelas plantas possa ter influenciado os resultados no LC1 e LC2 devido à presença de cobertura vegetal nos leitos cultivados. A retirada de água do sistema de leitos cultivados possivelmente gerou um efeito concentrador elevando as taxas de materiais poluentes, como os sólidos e nutrientes.

Visto que o pior desempenho foi encontrado no LC3, e em seguida no LC2, acredita-se que o fator de maior influência para elevação de sólidos é a presença da escória de aciaria nos leitos.

Quando as vazões aplicadas foram relacionadas, destacou-se o desempenho da vazão de 75mL/s, confirmando a tendência de estabilização dos leitos descrita em outros parâmetros.

## 5.8 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO SS

A principal forma de caracterização de sólidos dá-se fisicamente por meio do seu tamanho. Os sólidos suspensos representam a fração particulada dos sólidos totais. Essa separação é realizada utilizando um filtro de papel com porosidade entre 045 e 2,00  $\mu\text{m}$ . Os sólidos retidos no filtro são considerados suspensos.

### 5.8.1 Dados obtidos para o parâmetro SS

As análises apontam os resultados obtidos de acordo com os gráficos descritos na figura 53 para as vazões de 50mL/s e 75mL/s respectivamente.

---

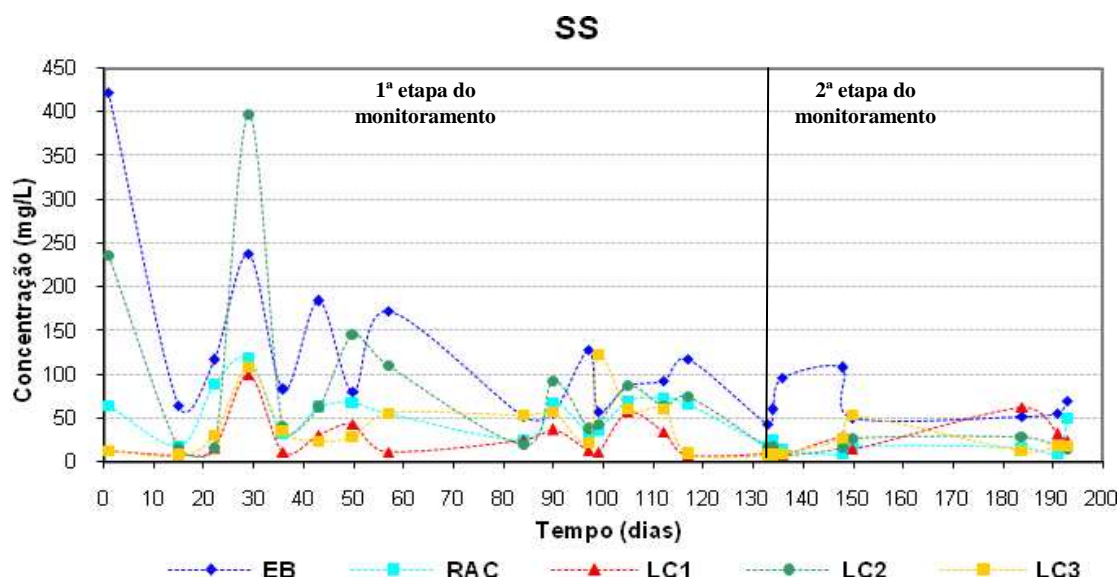


Figura 53 – Série histórica referente ao parâmetro sólidos suspensos no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

Analisados os resultados de sólidos totais no item anterior, pode-se avaliar o comportamento de suas frações. Na vazão de 50mL/s, os sólidos totais variaram de 250mg/L a 2750mg/L, enquanto na sua fração referente aos sólidos suspensos a flutuação esteve em torno de 1mg/L a 450mg/L, o que determina que os sólidos suspensos não representaram a fração mais significativa do parâmetro.

Na primeira etapa do monitoramento, o período de maior variabilidade ocorreu entre 1 e 40 dias, possivelmente devido ao período de partida do sistema.

Dentre os leitos, LC2 chama atenção devido a picos e valores elevados quando comparado ao LC1 e LC3. Sabe-se que o LC2 apresenta composição com escória de aciaria, areia e cobertura vegetal. A associação de fatores em torno da sua estrutura pode ter gerado os resultados descritos anteriormente. A escória de aciaria, devido à sua composição, libera junto ao efluente CaO. Este pode reagir com CO<sub>2</sub> e formar CaCO<sub>3</sub>, material sólido que tende a sedimentar. A areia pode não estar totalmente compactada ou presa à região da rizosfera gerando um processo de lixiviação da mesma. Esta hipótese, dentre todas relacionadas, provavelmente é a de menor influência no resultado obtido. A cobertura vegetal pode exercer efeito concentrador, aumentando assim a carga de sólidos suspensos.

Na segunda vazão aplicada, os sólidos totais variaram de 200mg/L a 1500mg/L enquanto sua fração particulada variou de aproximadamente 1mg/L a 110mg/L, mantendo a idéia de que a principal forma de sólidos encontra-se dissolvida. No

entanto, os resultados obtidos nas análises dos efluentes dos leitos apresentaram valores muito próximos entre si, indicando que não ocorreu grande diferenciação de remoção entre os leitos. A remoção pode ser observada mais claramente nas figuras 54 e 55.

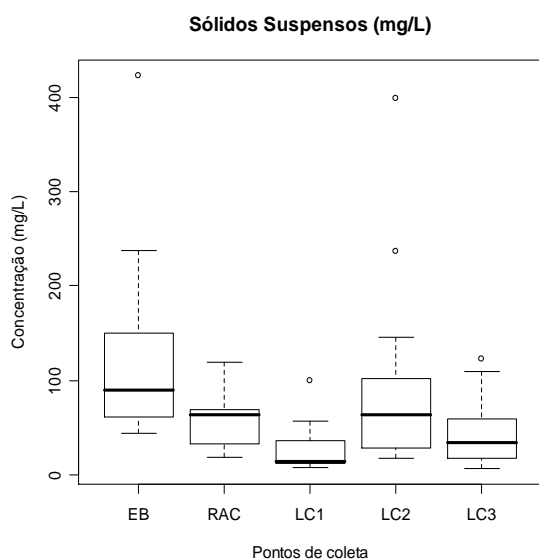


Figura 54 – Remoção de SS no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

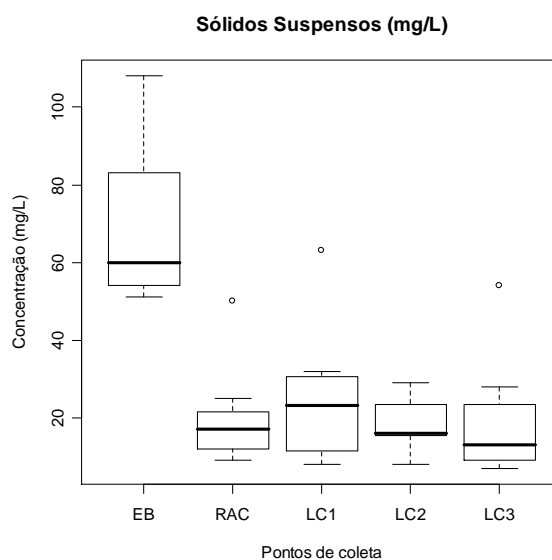


Figura 55 – Remoção de SS no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

Comparado ao parâmetro sólidos totais, a fração dos sólidos suspensos foi a que apresentou melhores resultado.

Na primeira do tratamento o RAC apontou uma eficiência de 55% em relação ao afluente (esgoto bruto). Esta taxa de eficiência de remoção não se fez presente em todos os leitos. LC1 e LC3 obtiveram desempenhos de 52% e 22% respectivamente, enquanto LC2 foi ineficiente na remoção de sólidos suspensos, com aumento de carga em torno de 62%.

Na segunda etapa do tratamento a taxa de remoção do RAC foi, em média, de 71%, já considerado um resultado expressivo. Todavia, a etapa posterior não prosseguiu com a remoção. LC1 e LC3 foram ineficientes e LC2 apresentou baixa eficiência, em torno de 8%.

Resultados comparativos aos obtidos neste trabalho são descritos por Collaço e Roston (2006). O autor descreve remoções de 36,3% e 73,9% de sólidos suspensos para duas configurações distintas de leitos, respectivamente compostos por brita e pneus picados.



### 5.8.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro SS

A eficiência do sistema de pós-tratamento em suas configurações e vazões distintas pode ser avaliada nos gráficos da figura 56.

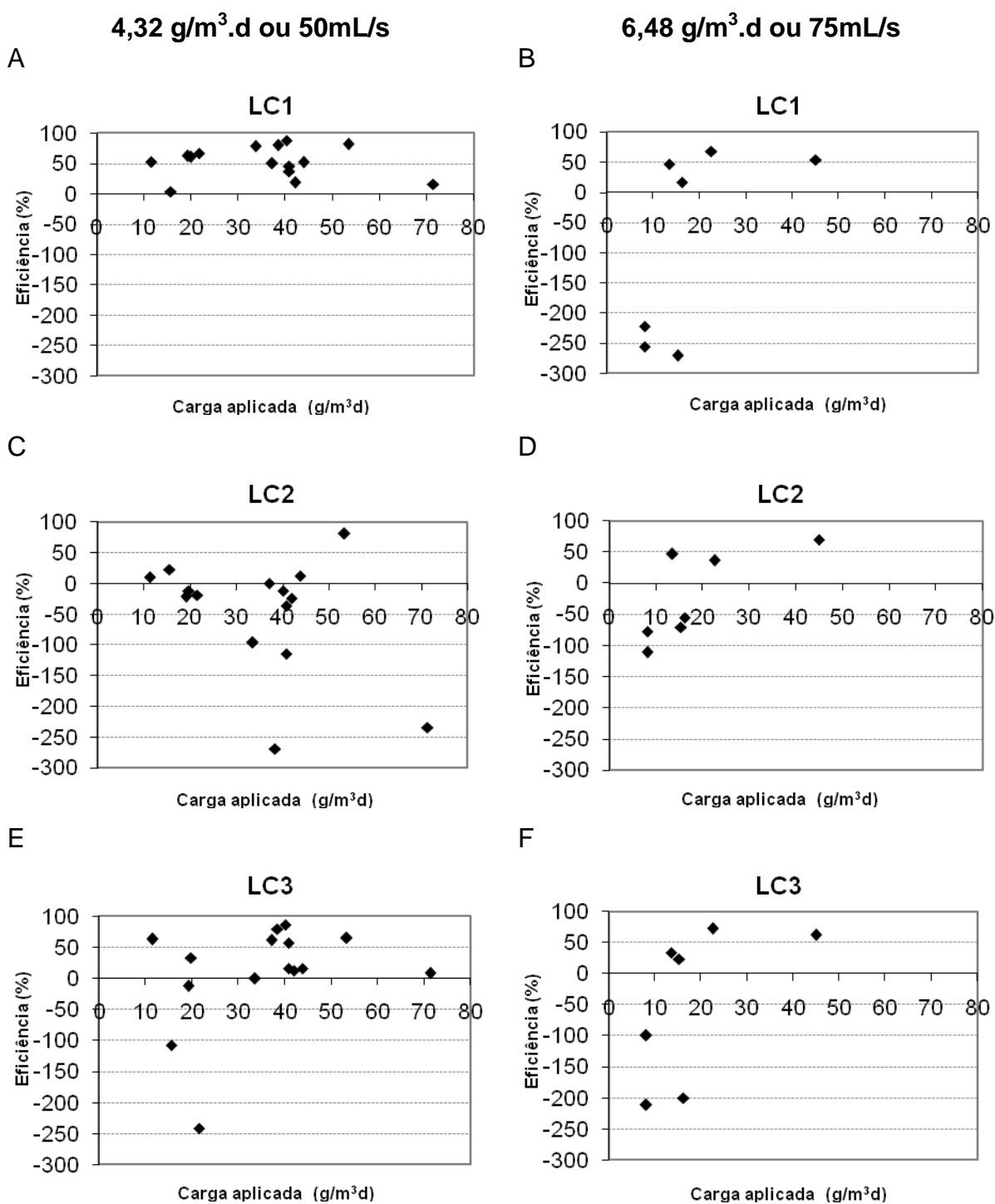


Figura 56 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SS nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

De acordo com os dados descritos na figura 72, na vazão de 50ml/s, os resultados de LC1 foram melhores, fato resultante da ausência de escória de aciaria no LC1. O pior resultado foi observado no LC2 devido à associação de fatores de influência: a presença da escória de aciaria e da cobertura vegetal. A escória de aciaria, classificada como resíduo classe II A – resíduo não inerte – de acordo com a norma da ABNT NBR 10.004/2004, tende a liberar compostos presentes em sua composição, como CaO, interferindo na análise de sólidos suspensos. A cobertura vegetal utiliza como mecanismo de defesa contra o estresse térmico a evapotranspiração. Este promove maior absorção de água pelas raízes, gerando efeito concentrador nos leitos cultivados.

A vazão de 75mL/s apresentou resultados contrários aos descritos pela vazão anterior. Os leitos 1 e 3 foram ineficientes, enquanto o leito cultivado 1 apresentou pequena taxa de remoção, em torno de 8%.

## 5.9 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO SD

Como dito anteriormente, nos itens 5.8 e 5.9, a principal forma de classificação dos sólidos dá-se fisicamente por meio de separação por tamanho. Os sólidos dissolvidos representam a fração solúvel dos sólidos totais, ou seja, aquela que pode ultrapassar o filtro de separação.

### 5.9.1 Dados obtidos para o parâmetro SD

As séries representativas dos dados obtidos nos períodos de análise são descritas na figura 57, referentes a primeira e segunda etapas do monitoramento respectivamente. Na primeira etapa utilizou-se a vazão afluente aos leitos de 50mL/s, enquanto a segunda etapa utilizou a vazão afluente aos leitos de 75mL/s.

---

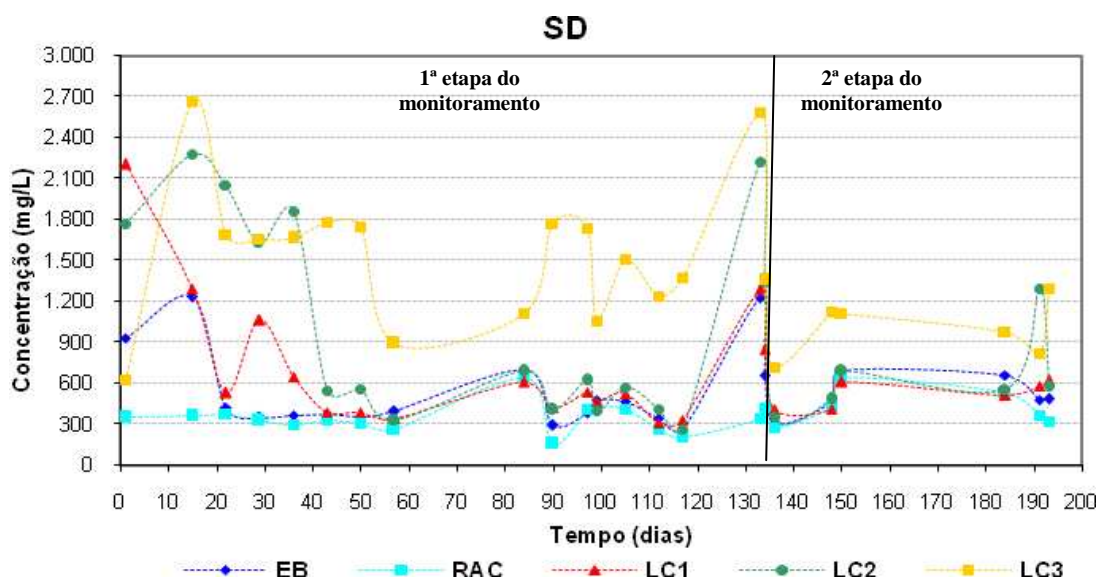


Figura 57 – Série histórica referente ao parâmetro sólidos dissolvidos no período de março de 2007 a março de 2008, com  $n=23$ . A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

Os valores descritos na vazão experimental de 50mL/s apresentaram grande variabilidade, principalmente nos leitos. A primeira etapa do sistema de tratamento (RAC) apresentou taxa de remoção em torno de 36%, valor próximo a 37%, observado nos sólidos totais. Essa proximidade está de acordo com os dados já analisados até este ponto do trabalho, referentes aos itens 5.8 e 5.9, nos quais nota-se que a maior parte da composição dos sólidos totais é devido aos sólidos dissolvidos. O mesmo ocorreu na vazão de 75mL/s com remoção de 24% dos sólidos totais e 20% dos sólidos dissolvidos na primeira etapa do sistema de tratamento.

Os leitos comportaram-se de forma semelhante em ambas as vazões, apresentando resultados mais elevados nos leitos com escória, LC3 e LC2, sendo LC3 o que apresentou maior concentração de sólidos dissolvidos dentre todos os leitos.

A análise do comportamento dos leitos, em relação à remoção de sólidos dissolvidos, é descrita de maneira mais clara nas figuras 58 e 59.

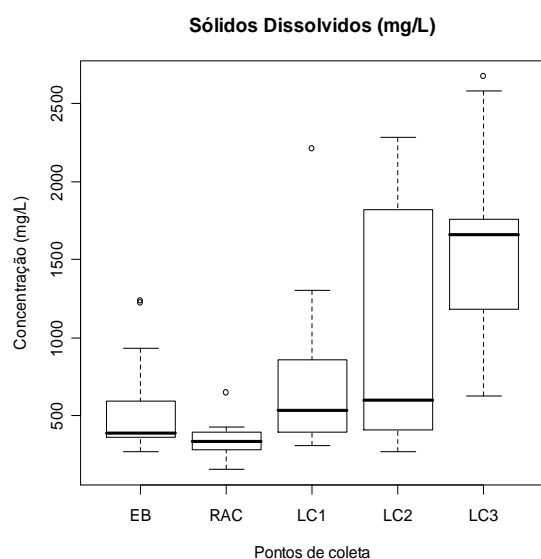


Figura 58 – Remoção de SD no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

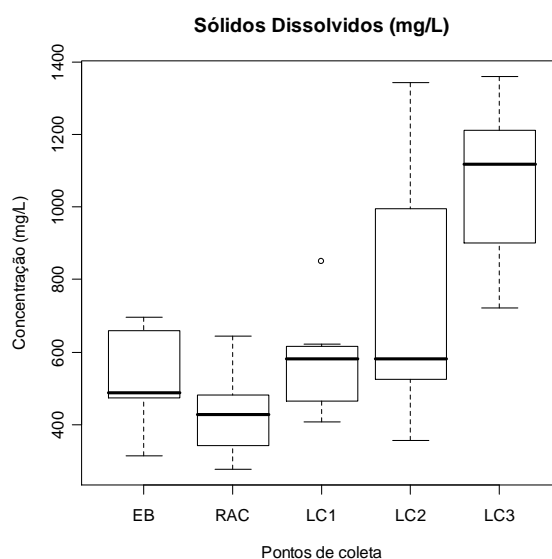


Figura 59 – Remoção de SD no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

Os dados descritos na figura 58, referentes à vazão de 50mL/s, apontam que o reator anaeróbico compartimentado realizou a remoção de sólidos dissolvidos, numa taxa de 36%, porém estatisticamente não foi considerado distinto do esgoto bruto.

Os leitos foram ineficientes para o parâmetro em questão. Contudo, o LC1 foi estatisticamente diferente do LC3, que apresentou taxas de ineficiência muito elevadas, em torno de 350%.

A tendência descrita na vazão de 50mL/s foi seguida pela vazão de 75mL/s, na qual o RAC apresentou 20% de remoção e os leitos foram ineficientes. Assim como descrito anteriormente, o LC3 foi o que apresentou maior ineficiência e o LC1 a menor ineficiência.

### 5.9.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro SD

A avaliação dos leitos de acordo com a carga aplicada em cada vazão experimental é descrita nos gráficos presentes na figura 60.

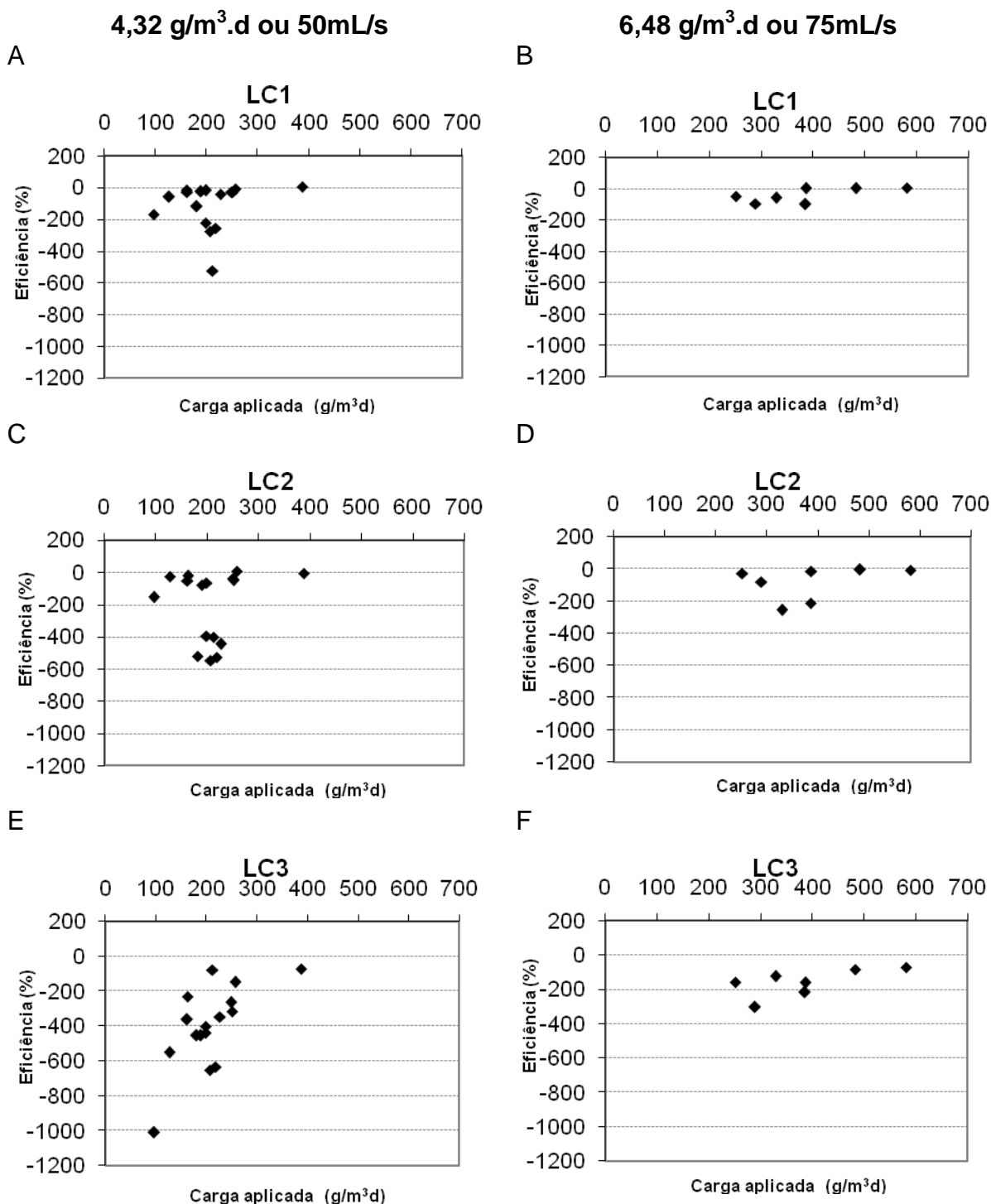


Figura 60 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SD nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

Em decorrência da avaliação da figura 60, nota-se uma tendência generalizada a ineficiência na remoção de sólidos dissolvidos. A hipótese mais aceitável para explicar esse fenômeno nos leitos 2 e 3 trata da presença da escória e sua característica não inerte, que introduz no efluente moléculas presentes em sua composição.

O LC1, apesar de demonstrar resultados mais amenos, também foi ineficiente em relação à remoção de sólidos dissolvidos. Esse fato pode ser correlacionado com a presença da vegetação e o processo de evapotranspiração. Inicialmente, a quantidade de plantas inseridas nos leitos foi relativamente baixa. No entanto, processos naturais levaram ao aumento de número de plantas e aparecimento de novas espécies, aumentando o processo de evapotranspiração.

## 5.10 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO DUREZA

O parâmetro dureza trata da concentração de cátions multimetálicos em solução. Dentre eles, os mais freqüentes são os cátions bivalentes  $\text{Ca}^{2+}$  e  $\text{Mg}^{2+}$ . Quando condicionados a uma supersaturação, esses íons reagem com a água e formam precipitados.

### 5.10.1 Dados obtidos para o parâmetro dureza

Os dados obtidos pelos períodos de monitoramento encontram-se descritos na figura 61.

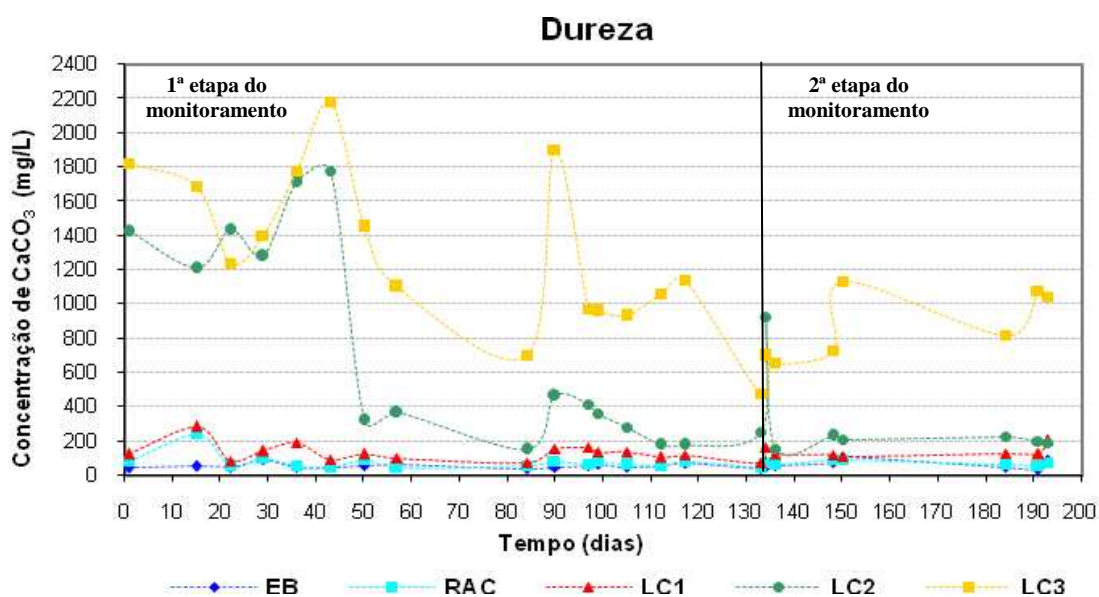


Figura 61 – Série histórica referente ao parâmetro dureza no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

Baseado nos dados descritos na figura 61, referentes à vazão experimental de 50mL/s, pode-se afirmar que o parâmetro dureza está diretamente ligado à presença da escória de aciaria. Nota-se que em outros pontos do sistema de tratamento que os valores relativos ao parâmetro destacam-se nos leitos 2 e 3. Para os demais pontos de coleta, os resultados permanecem relativamente constantes, em torno de 54mg/L, 78mg/L e 131mg/L respectivamente para EB, RAC e LC1. Em termos de tratamento de águas, os valores acima citados são considerados moderados, pois variam de 50 a 150mg/L, como define o padrão de classificação. Dentro desta classificação, as águas residuárias provenientes de LC2 e LC3 seriam ditas muito duras, pois ultrapassam 300mg/L de  $\text{CaCO}_2$ , visto que seus valores médios são de 737mg/L e 1300mg/L respectivamente.

Os mesmos resultados supracitados são percebidos na vazão experimental de 75mL/s para quase todos os pontos de coleta, exceto LC2. EB, RAC e LC1 apresentam concentrações de 66mg/L, 73mg/L e 139mg/L respectivamente. No LC2 percebe-se uma queda na concentração de  $\text{CaCO}_2$ , fato este possivelmente relacionado a um processo de estabilização ou desgaste decorrente da lixiviação na escória de aciaria, apresentando concentração média de 304mg/L. O LC3 foi o leito cultivado cuja composição foi feita totalmente por escória de aciaria, em consequência, apresentou os maiores valores de dureza, com média de 878mg/L. Apesar do elevado valor obtido, nota-se uma redução em relação à primeira vazão experimental.

Objetivando melhor visualização do comportamento do sistema em relação ao parâmetro discutido, são mostradas as figuras 62 e 63.

---

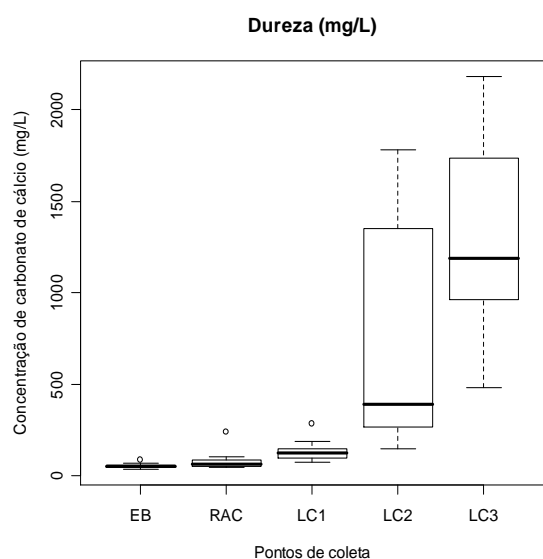


Figura 62 – Remoção de dureza no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

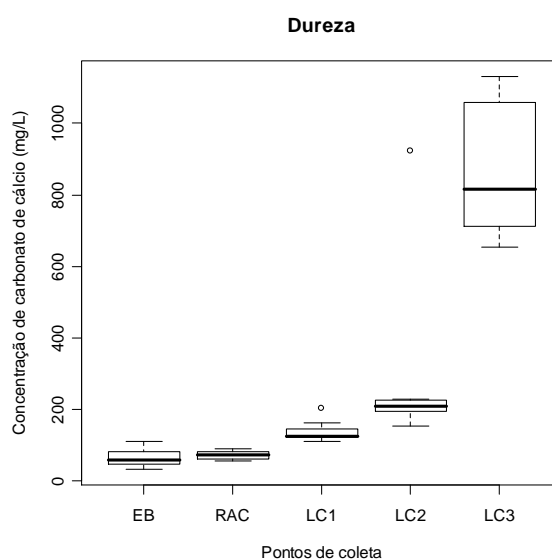


Figura 63 – Remoção de dureza no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

A figura 72 indica valores mais baixos do EB, do RAC e do LC1. O LC2 apresentou valores muito elevados, porém esses valores são estatisticamente distintos de LC3, visto que estes foram ainda mais elevados. Em nenhum ponto de coleta foi observada a remoção de dureza, ao contrário, todo sistema foi ineficiente. Os mesmos resultados foram obtidos na segunda vazão experimental.

Nas figuras 64 e 65 estão classificadas as amostras de acordo com os valores obtidos nas análises.

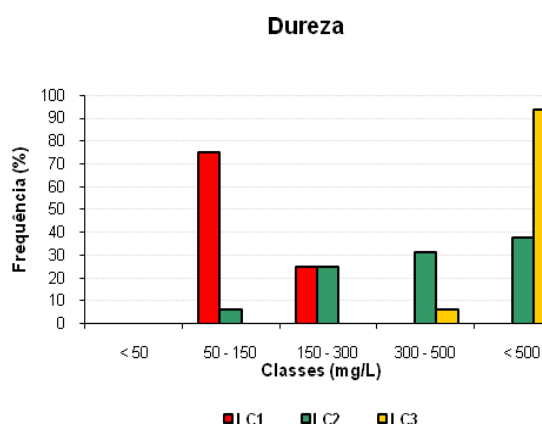


Figura 64 – Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

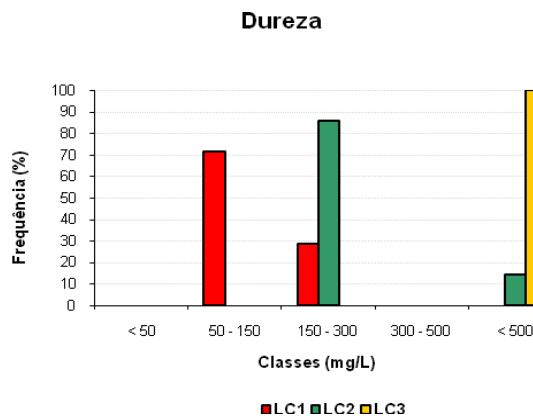


Figura 65 Distribuição de freqüência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.



De acordo com Von Sperling (2005), para o tratamento e abastecimento público de água, para valores inferiores a 50mg/L a água é dita mole, entre 50mg/L e 150mg/L tem-se dureza moderada, entre 150mg/L e 300mg/L a água é dita dura, a partir de 300mg/L a água é muito dura. O padrão de potabilidade admite valores iguais ou inferiores a 500mg/L. Baseado nesta assertiva nota-se que a dureza dos efluentes provenientes dos leitos com escória está elevada, sendo como resultados mais baixos valores entre 50mg/L e 150mg/L.

#### 5.10.2 Avaliação da eficiência das cargas aplicadas nos leitos com relação ao parâmetro dureza

A avaliação dos leitos de acordo com a taxa de remoção, em relação à carga, é mostrada nos gráficos componentes da figura 66.

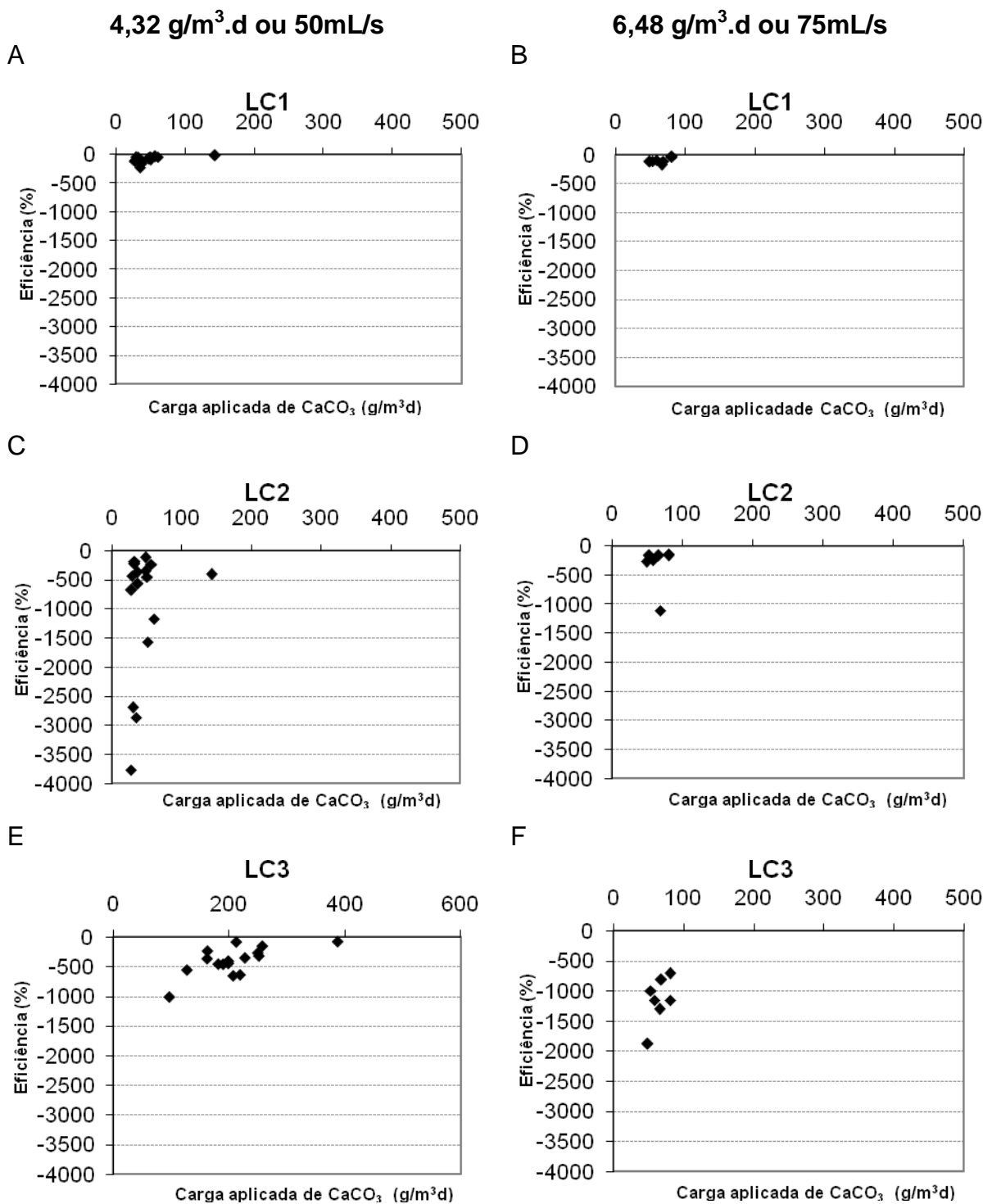
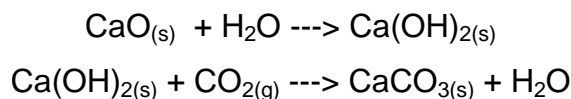


Figura 66 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro dureza nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas volumétricas aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

Em geral, todos os gráficos demonstram ineficiência dos leitos, destacando-se o LC3 devido a sua composição do seu meio suporte ser completamente feita por escória de aciaria.

De acordo com a NBR 10004, a escória de aciaria classifica-se como “aqueles que não se enquadram nas classificações de resíduos classe I - Perigosos ou de resíduos classe II B- Inertes, nos termos desta Norma. Os resíduos classe II A – Não inertes podem ter propriedades, tais como: biodegradabilidade, combustibilidade ou solubilidade em água”. Antes da modificação da norma, uma das características que faziam com que a escória obtivesse essa classificação era o parâmetro dureza. Todavia, o parâmetro dureza não compõe a legislação vigente.

Como afirmado na NBR 10004 supracitada, a escória possui capacidade de solubilização. Sendo assim, libera óxido de cálcio. Com a hidratação do óxido de cálcio chega-se ao hidróxido de cálcio e a reação entre este e o gás carbônico leva à formação do carbonato de cálcio, podendo tais reações assim ser representadas abaixo:



A partir das reações descritas, obtêm-se a explicação devida para os elevados valores de dureza nos leitos compostos por escória de aciaria.

#### 5.11 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO PH

Potencial hidrogeniônico, mais conhecido pela sigla pH, representa a concentração de íons H<sup>+</sup>, o que aponta possíveis condições de acidez, neutralidade ou alcalinidade da solução.

##### 5.11.1 Dados obtidos para o parâmetro pH

Na figura 67 estão descritas as séries históricas obtidas por meio de análises do parâmetro pH.

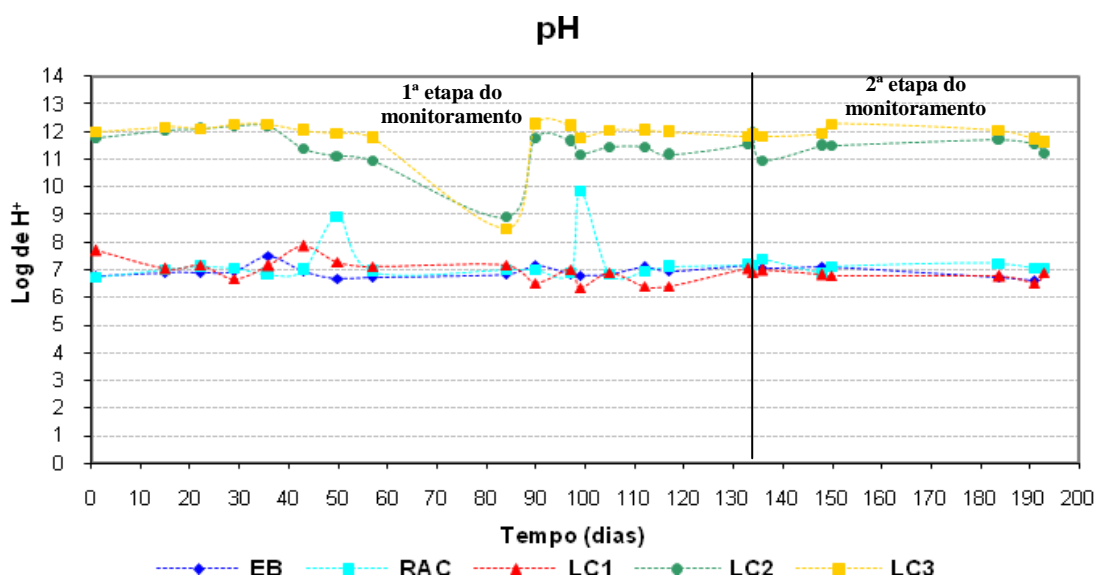


Figura 67 – Série histórica referente ao parâmetro pH no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

O comportamento do parâmetro é bastante similar em ambas as vazões, apresentando valores próximos da neutralidade para EB, RAC e LC1, em média 6,9 para EB, 7,3 para RAC e 7,0 para LC1, na vazão de 50mL/s e 7,0 para EB, 7,1 para RAC e 6,8 para LC1, na vazão de 75mL/s. Contudo, LC2 e LC3 obtiveram resultados de pH bastante elevados. Na vazão de 50mL/s os valores foram de 11,4 e 11,8 respectivamente para LC2 e LC3, enquanto na vazão de 75mL/s os valores foram de 11,5 e 11,9 para LC2 e LC3 respectivamente, indicando alcalinidade de efluente. Este fato deve-se a presença da escória e sua solubilização no efluente, liberando íons como  $\text{Ca}^{2+}$  provenientes do CaO presente em grandes quantidades na escória de aciaria, devido a sua importância na produção do aço.

As figuras 68 e 69 retratam de forma mais clara os resultados obtidos diante da legislação vigente.

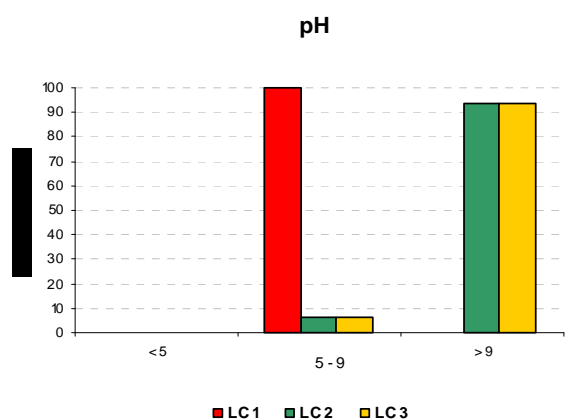


Figura 68 – Distribuição de frequência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

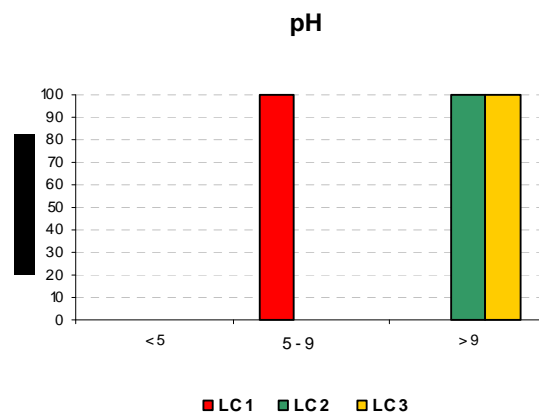


Figura 69 – Distribuição de frequência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

O CONAMA 357/05 para lançamento de efluentes admite valores de pH entre 5 e 9. De acordo com as figuras 90 e 91, na primeira etapa experimental todas as amostras de LC1 atenderam a determinação legislativa, entretanto LC2 e LC3 obtiveram mais de 90% de suas amostragens fora do padrão de lançamento de efluentes. As segundas etapas experimentais seguiram a mesma tendência, visto que LC1 atendeu as exigências do CONAMA 357/05, enquanto LC2 e LC3 não atenderam o mesmo padrão.

## 5.12 DESEMPENHO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO TURBIDEZ

Turbidez trata do grau de interferência resultante da passagem de luz pela água. O parâmetro diretamente relacionado a turbidez são os sólidos suspensos.

### 5.12.1 Dados obtidos para o parâmetro turbidez

Na figura 70 estão descritos os resultados obtidos nos períodos de análises referentes ao parâmetro turbidez.

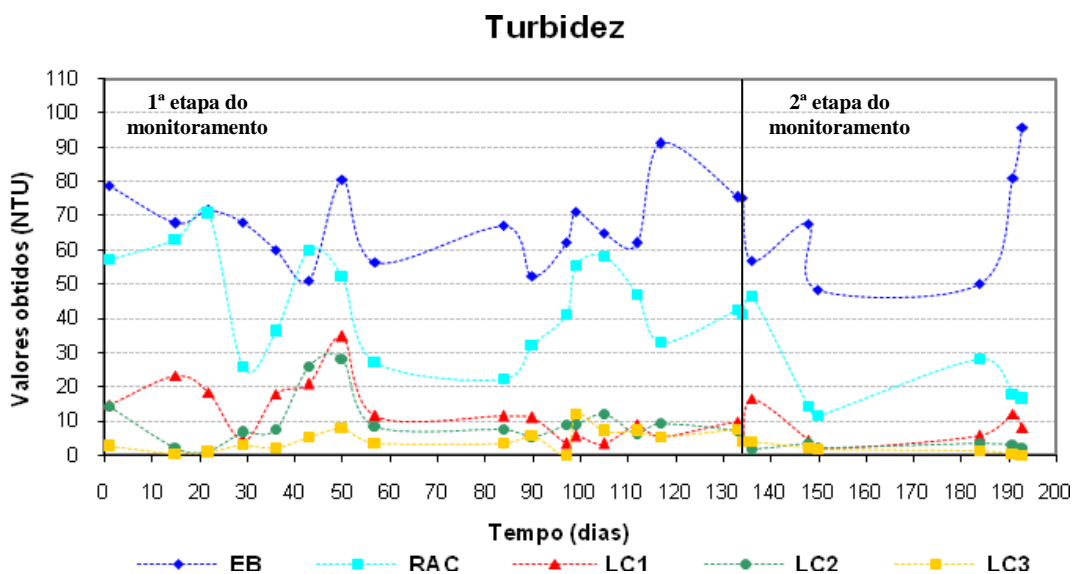


Figura 70 – Série histórica referente ao parâmetro turbidez no período de março de 2007 a março de 2008, com n=23. A linha indica a mudança de vazão no período experimental.

De acordo com a figura 70, que retrata o comportamento do parâmetro turbidez na primeira etapa do monitoramento, seus valores apresentaram variabilidade mais acentuada de 50 a 90NTU e 30 a 70NTU respectivamente no EB e RAC, enquanto os leitos 1 e 2 mantiveram variações menores, em torno de 10 a 30NTU. LC3 foi o leito com melhor desempenho, com variação aproximada de 10NTU. As médias obtidas no período são de 68NTU, 45NTU, 13NTU, 10NTU e 5NTU para EB, RAC, LC1, LC2 e LC3 respectivamente.

A segunda etapa do monitoramento indica valores em média mais baixos do que na primeira etapa do monitoramento, sendo 68NTU, 25NTU, 8NTU, 3NTU e 2NTU os respectivos valores para EB, RAC, LC1, LC2 e LC3.

As figuras 71 e 72 mostram a remoção de turbidez no sistema de tratamento, indicada pelos valores supracitados.

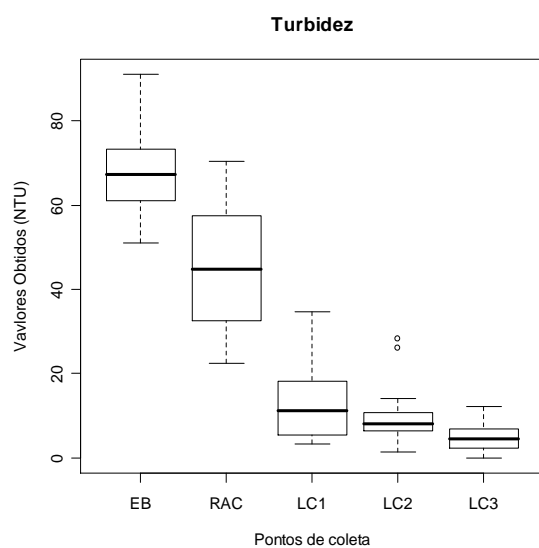


Figura 71 – Remoção de turbidez no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

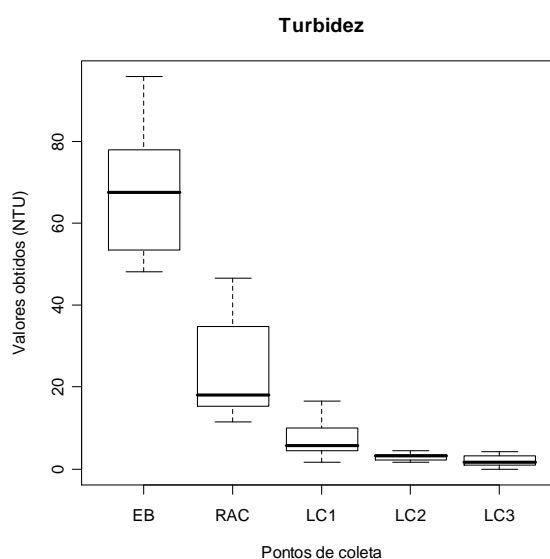


Figura 72 – Remoção de turbidez no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

As taxas de remoção representadas na figura 95 são de 33%, 72%, 78% e 90% para os respectivos pontos de coleta RAC, LC1, LC2 e LC3, na vazão de 50mL/s. Por sua vez, a figura 96, representação gráfica do segundo período de monitoramento, apresenta as seguintes taxas de remoção, referentes à vazão de 75mL/s: 63% para RAC, 70% para LC1, 88% para LC2 e 92% para LC3.

Para a vazão de 50mL/s, todas as etapas do sistema de tratamento (RAC e leitos) foram eficientes na remoção de turbidez. Contudo, houve diferenciação entre os leitos 1 e 2 em relação ao LC3. LC3 foi o leito com melhor desempenho de acordo com a análise estatística realizada por meio do teste de *Wilcoxon-Mann-Whitney* com probabilidade de erro de 5%.

Para a vazão de 75mL/s, as etapas do sistema de tratamento foram eficientes, assim como na vazão experimental anteriormente citada. Entretanto, a diferença entre os leitos ocorreu entre LC1 e os demais, indicando que LC2 e LC3 apresentaram maior eficiência de remoção de turbidez.

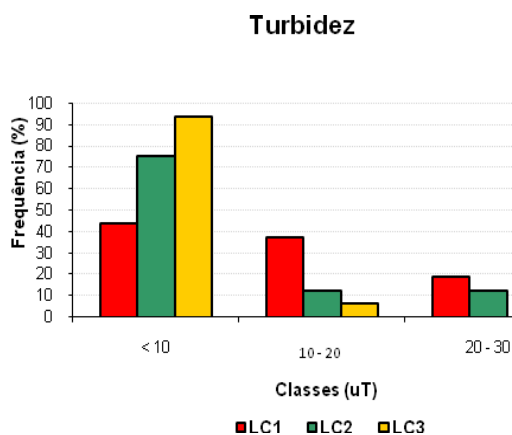


Figura 73 – Distribuição de frequência para o parâmetro sólidos totais no período de março a agosto de 2007 para vazão de 50mL/s e TDH 19h.

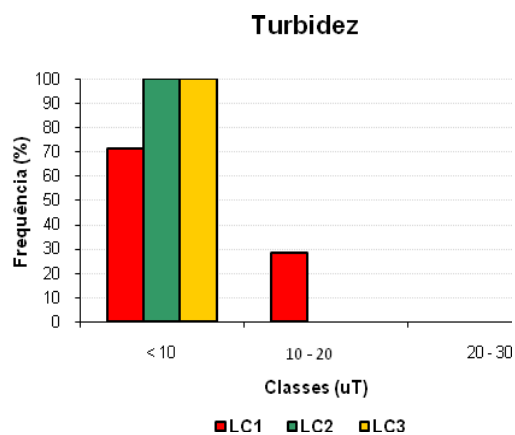


Figura 74 – Distribuição de frequência para o parâmetro sólidos totais no período de janeiro a março de 2008 para vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

A figura 73 sugere que na primeira etapa do monitoramento LC3 obteve maior remoção de turbidez, visto que mais de 90% dos seus resultados estavam abaixo de 10uT. Nota-se um bom desempenho também em LC2, indicando a influencia da escória de aciaria na remoção de turbidez. A segunda etapa do monitoramento seguiu a mesma tendência da primeira, sendo 100% das amostras de LC2 e LC3 inferiores a 10NTU.

### 5.13 DESEMPENHO DO SISTEMA DE TRATAMENTO PARA PARÂMETRO METAIS

Os metais são micropoluentes inorgânicos e apresentam grande importância devido a sua toxicidade. Sabe-se que os metais são solúveis em água e vários deles podem ser bioacumulados dentro da cadeia trófica. Contudo, alguns metais podem ser nutrientes essenciais, quando em baixas concentrações.

#### 5.13.1 Dados obtidos para o parâmetro metais

Abaixo (Tabela 18) encontram-se descritos os resultados obtidos pela análise dos metais alumínio (Al), cobre (Cu), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) cádmio (Cd) e Chumbo (Pb) utilizando a metodologia de absorção atômica.



Tabela 18 – Resultados obtidos nas análises de metais. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitões 1, 2 e 3 respectivamente), ALD (abaixo do limite de detecção do aparelho- abaixo de  $10^{-6}$ )

Vazão analisada	Metais analisados	n	Limite máximo CONAMA 357	Valores em média				
				EB (mg/L)	RAC (mg/L)	LC1 (mg/L)	LC2 (mg/L)	LC3 (mg/L)
50 mL	Al	6	-----	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD
75 mL	Al	5		0,308	0,411	0,308	0,287	0,185
50 mL	Cu	6	1,0 mg/L	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD
75 mL	Cu	5		0,008	0,008	0,000	0,000	0,000
50 mL	Fe	6	15,0 mg/L	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD
75 mL	Fe	5		0,986	0,606	0,653	0,444	0,272
50 mL	Mn	6	1,0 mg/L	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD
75 mL	Mn	5		0,018	0,018	0,096	0,005	0,003
50 mL	Zn	6	5,0 mg/L	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD
75 mL	Zn	5		0,226	0,173	0,155	0,163	0,166
50 mL	Cd	6	0,2 mg/L	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD
50 mL	Pb	6	0,5 mg/L	ALD	ALD	ALD	ALD	ALD

Os resultados acima foram obtidos a partir das vazões de 50mL/s e 75mL/s. Na primeira vazão experimental não foram detectados resultados válidos, pois a concentração presente no efluente foi mais baixa do que o aparelho utilizado pôde detectar.

Na vazão de 75mL/s os resultados obtidos mostram baixas concentrações dos metais analisados em diversos pontos do sistema de tratamento, indicando que, apesar da classificação da escória de aciaria (NBR 10004) como resíduo sólido classe II A – Não inerte, não ocorreu a liberação de possíveis contaminantes metálicos no efluente.

Em todos os casos acima descritos, a concentração de metais é inferior ao exigido pela legislação para lançamento de efluentes.

#### 5.14 ANÁLISE DO SEDIMENTO

No decorrer das pesquisas notou-se que ocorreu um acúmulo de sedimento nas tubulações de saída dos leitos com presença de escória de aciaria. Esse sedimento apresentou-se de coloração clara, granulometria fina, com alta capacidade de compactação formando torrões. As características supracitadas propiciaram sua aglomeração e posterior entupimento da tubulação.

Após a retirada do material da tubulação de saídas dos leitos 2 e 3, o mesmo foi levado para análise, feita pelo aparelho EDX.

Os resultados sugerem que a composição do material é basicamente de CaO (96,20%), com presença de outros compostos como: SiO<sub>2</sub> (1,84%), K<sub>2</sub>O (0,99%), SO<sub>3</sub> (0,82%), Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (0,08%), SrO (0,05%), ZrO<sub>2</sub> (0,01%).

Observações prévias dos demais parâmetros são confirmadas com a análise do sedimento, no qual nota-se que a maior parte da sua composição é de CaO, derivado do processo de lixiviação da escória de aciaria pelo efluente doméstico utilizado na presente pesquisa.

#### 5.15 INFLUÊNCIA DA BIOMASSA

Objetivando verificar a influência da vegetação nos leitos cultivados, diferenciou-se a composição dos leitos cultivados. LC1 e LC2 apresentaram cobertura vegetal, enquanto LC3 não apresentou cobertura vegetal.

No presente trabalho foram realizadas duas podas para retirada do material vegetal. Os resultados das massas totais aferidas em cada leito cultivado estão representados na figura 75.

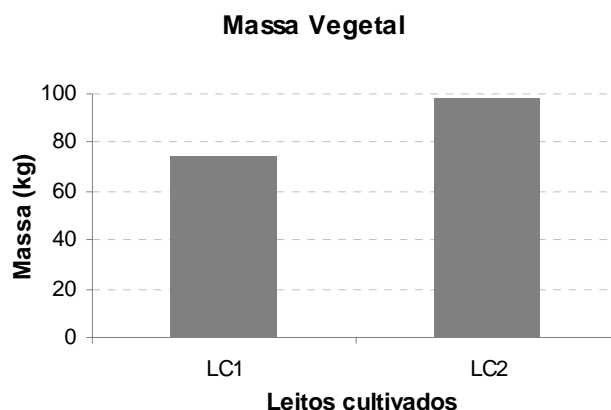


Figura 75 – Massa vegetal total obtida durante o período experimental.

De acordo com os dados absolutos obtidos, nota-se que o leito cultivado com presença da escória de aciaria obteve maior massa vegetal, contrariando as expectativas, visto que devido ao elevado valor de pH, as plantas poderiam ter dificuldades adaptativas. Contudo, a adaptação das plantas ao meio suporte fez-se de forma natural, sem dificuldades, e obteve melhores resultados quando comparado ao leito cultivado com brita. Esse fato pode estar relacionado a reações químicas ocorridas no LC2 devido à influência da escória que disponibilizou nutrientes essenciais como nitrogênio e fósforo de forma simplificada, possibilitando fácil assimilação pela vegetação.

Os resultados obtidos por meio dos parâmetros físico-químicos e microbiológicos analisados quando relacionados com a presença de vegetação nos leitos cultivados indica que não ocorreu expressiva influência da mesma. Esse fato pode facilitar a implantação de leitos cultivados utilizando escória de aciaria como meio suporte, visto que a ausência da cobertura vegetal facilita o manejo e a implementação do tratamento proposto, reduzindo a necessidade de manutenção.

## ***6. CONCLUSÕES***

De acordo com o parâmetro  $DQO_t$ , nota-se que ocorreu remoção de matéria orgânica de forma significativa em ambas as etapas do tratamento (RAC e leitos), nas duas vazões experimentais analisadas (50mL/s e 75mL/s). Contudo, LC3 destacou-se perante os demais leitos na vazão de 75mL/s, apresentando maior capacidade de remoção de matéria orgânica.

A análise da fração biodegradável da matéria orgânica indicou ineficiência do RAC na primeira vazão experimental. O mesmo não foi notado na segunda vazão experimental, com eficiência de remoção em torno de 34%.

Os leitos foram eficazes em ambas as vazões experimentais na remoção de matéria orgânica biodegradável. No entanto, na vazão de 50mL/s, os leitos não indicaram diferenciação significativa entre si. O mesmo não foi percebido na segunda vazão experimental, na qual os leitos com presença de escória obtiveram melhores resultados em relação ao leito sem escória. Além disso, notou-se que a vazão de 75mL/s destacou-se em relação a vazão de 50mL/s, ou seja, apesar do desempenho favorável dos leitos para as duas vazões, a vazão de 75mL/s obteve maiores taxas de remoção.

O sistema de tratamento utilizado na presente pesquisa foi ineficiente na remoção de sólidos suspensos totais para ambas as vazões, verificando que o RAC não apresentou diferenças significativas em relação ao esgoto bruto. Por sua vez, os leitos demonstraram acúmulo de sólidos, principalmente na vazão de 50mL/s, na qual LC2 e LC3 obtiveram os maiores valores absolutos de sólidos totais para ambas as vazões. Na vazão de 75mL/s, LC3 destacou-se pelo maior acúmulo de sólidos.

A partir das análises, notou-se que a menor fração componente dentre os sólidos totais é representada pelos sólidos suspensos.

---

Na primeira vazão experimental (50mL/s), o RAC removeu sólidos suspensos, porém os leitos não seguiram a mesma tendência, visto que não ocorreu diferenciação significativa entre o RAC e leitos 1 e 3. O LC2 obteve resultado distinto, apresentando acúmulo de sólidos suspensos.

A segunda vazão experimental (75mL/s), o RAC obteve remoção expressiva de sólidos suspensos, em torno de 71%, enquanto os leitos não apresentaram diferenças em relação ao RAC.

A fração dissolvida dos sólidos representou a maior parte da composição total dos mesmos. Em ambas as vazões experimentais o RAC apresentou taxas de remoção de sólidos dissolvidos em torno de 36% e 20% respectivamente para as vazões de 50mL/s e 75mL/s, enquanto LC1 indicou menor ineficiência e LC3 a maior ineficiência de remoção de sólidos dissolvidos.

O sistema apresentou elevada dureza após a passagem pelos leitos 2 e 3, ou seja, leitos com presença de escória, apresentando aumento bastante significativo. Notou-se melhor desempenho da segunda vazão experimental, com valores absolutos mais baixos.

A primeira etapa do tratamento implementado na presente pesquisa apresentou pH próximo da neutralidade. Contudo, a segunda etapa do tratamento mostrou aumento do pH para LC2 e LC3, nos quais havia presença de escória. Os valores obtidos estão em torno de 11,0 a 14,0. O mesmo resultado foi obtido em ambas as vazões experimentais.

O sistema de tratamento em suas etapas foi eficiente na remoção de turbidez. Dentre os leitos na vazão de 50mL/s, LC3 foi o que apresentou melhor desempenho. NA vazão de 75mL/s, LC2 e LC3 obtiveram melhores resultados em relação a LC1. Notou-se diferenças entre as vazões, sendo 75mL/s mais indicada para remoção de turbidez.

A segunda vazão experimental apresentou melhores resultados relativos à remoção de nitrogênio. Apesar deste fato, a tendência comportamental do sistema foi próxima

---

em ambas as vazões, com remoção do nutriente nas duas etapas do tratamento e indicando que não ocorreram diferenças significativas entre os leitos.

O sistema de tratamento foi eficiente em relação à remoção de fósforo em ambas as etapas de tratamento. Em destaque estão os leitos com presença de escória, que mostraram maior capacidade de remoção do nutriente quando relacionado ao leito cultivado sem presença de escória, fato este ocorrido nas vazões experimentais de 50mL/s e 75mL/s.

A remoção dos contaminantes microbiológicos analisadas pela quantidade de células de coliformes totais e *E. coli* em 100mL da amostra indica grande capacidade da escória de aciaria na eliminação dos elementos supracitados. Na vazão de 50mL/s apenas LC3 apresentou resultados que atendem ao padrão de lançamento de efluentes do CONAMA, contudo a remoção no LC2 foi muito expressiva, chegando a valores próximos ao exigido pela legislação ambiental vigente. A segunda vazão experimental obteve melhor desempenho, visto que LC2 e LC3 obtiveram valores abaixo de 100 NMP/100mL, como determina a legislação em vigência.

A avaliação realizada quanto à presença de metais no efluente do sistema de tratamento proposto mostrou que não houve aumento na concentração dos metais analisados após a passagem pelos leitos com presença de escória, confirmando que apesar da classificação da escória de aciaria (NBR 10004) como resíduo sólido classe II A – Não inerte, não ocorreu a liberação de possíveis contaminantes metálicos no efluente.

A segunda vazão experimental (75mL/s) apresentou melhores resultados em relação a primeira vazão experimental (50mL/s) no sistema de tratamento analisado na presente pesquisa, indicando que o sistema-piloto de tratamento trabalhou abaixo da sua capacidade na primeira vazão experimental.

A presença de vegetação nos leitos não foi um fator determinante, visto que o comportamento de LC2 e LC3 foi muito próximo para a maioria dos parâmetros,

---

além disso, com exceção aos parâmetros relacionados aos sólidos, dureza e pH, o comportamento de LC3 obteve melhores resultados.

A maior parte da composição de sólidos presente no efluente é derivado de reações com o óxido de cálcio (CaO), como indica a análise única realizada por meio do EDX.

---

## ***7. RECOMENDAÇÕES***

A partir dos resultados obtidos por meio das análises descritas no presente trabalho, foi possível elaborar algumas recomendações para desenvolvimento da presente tecnologia. Essas sugestões estão descritas abaixo.

- i- Desenvolver uma nova etapa de tratamento visando à redução do pH, dureza e sólidos dissolvidos a partir da precipitação do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) presente em grandes quantidades no efluente.
  - ii- Buscar uma forma de reuso do carbonato de cálcio ( $\text{CaCO}_3$ ) retirado do efluente. Uma forma pode ser o aproveitamento na correção do pH de solos ácidos.
  - iii- Inserir contaminantes metálicos ao afluente do sistema-piloto objetivando analisar o comportamento da escória na presença dos metais.
  - iv- Tratar outros tipos de efluentes, como por exemplo, o chorume, verificando a capacidade dos leitos para retirada de altas cargas poluidoras.
  - v- Estudar a composição o sedimento presente nas tubulações e possível reaproveitamento do mesmo.
-



## **8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

ALMEIDA, R. A.; OLIVEIRA, L. F. C.; KLIEMANN, H. J. Eficiência de espécies vegetais na purificação de esgoto sanitário. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, v. 37, p. 1 – 9. Goiânia, GO. 2007.

ALMEIDA, R. A.; ALMEIDA, N. A. M. Remoção de coliformes do esgoto por meio de espécies vegetais. *Revista Eletrônica de Enfermagem*, v.07, n. 03, p. 306-317. 2005.

ANDRADE NETO, C. O. *Sistemas Simples para Tratamento de Esgotos Sanitários: Experiência Brasileira*. 301p. ABES, Rio de Janeiro, 1997.

APHA; AWWA & WPCF. *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 19a edição, Washington D. C./USA, American Public Health Association, 1995.

ARAÚJO, L. A. de. *Manual de Siderurgia – Produção*. V.1 p. 470. São Paulo: Arte e Ciência, 1997.

ARMSTRONG, N.; ARMSTRONG, J. & BECKETT, P. M. "Measurements and modelling of oxygen release from roots of *Phragmites australis*." *Constructed Wetlands in Water Pollution Control (Adv. Wat. Pollut. Control no 11)* Pergamon Press, Oxford/UK, pp. 41-51. 1990.

BARROS, W. & CAMPOS, J. R. "Tratamento de Esgotos Sanitários por Reator Anaeróbio Compartimentado", *Anais: XXIII Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitaria y Ambiental, La Habana - Cuba*, pp. 297-307, nov./1992.

BOLLER, M. Small wastewater treatment plants - a challenge to wastewater engineers. *Water Science and Technology*, vol. 35, nº 6, p. 1-12, 1997.

BRASIL, M. S.; MATOS, A. T.; SOARES, A. A., FERREIRA, P. A. Qualidade do efluente de sistemas alagados construídos, utilizados no sistema de tratamento de esgoto doméstico. *Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental*, v. 9, p. 133 – 137. Campina Grande, PB. 2005.

BRIX, H. "Wastewater treatment in constructed wetlands: system design, removal processes and treatment performance. In: *Constructed Wetland for a Water Quality Improvement*, Moshiro, G. A. (ed.), p. 9-12, 1993.

---

- CAMPOS, J. R. Alternativas para tratamento de esgotos – Pré-tratamento de águas para abastecimento. Assemae, Consórcio Intermunicipal da Bacias dos Rios Piracicaba e Capivari, Americana – SP. p.112.1994.
- CHERNICHARO, C A L. Pós-tratamento de efluentes de reatores anaeróbios. PROSAB. Belo Horizonte, 2001.
- CHERNICHARO, C. A. L.; van HAANDEL, A.; AISSE; M. M. CAVALCANTI, P. F. F. Reatores anaeróbios de manta de lodo. In: tratamento de esgoto sanitário por processo anaeróbio e disposição controlada no solo. José Roberto Campos (coord.), projeto PROSAB, Belo Horizonte [s.n.]. Cap. 7, p. 155-197, 1999.
- COLLAÇO, A. B.; ROSTON, D. M.; Uso de pneus picados como meio suporte de leitos cultivados para tratamento de esgoto sanitário. Engenharia Ambiental – Espírito Santo do Pinhal, v. 3, nº 1, p. 21 – 31. 2006.
- COMUNIDADE EUROPÉIA. Guide: extensive wastewater treatment process adapted to small and medium sized communities (500 to 5.000 population equivalents). Implementation of Conclil Directive 91/271 of 21 May 1991 concernig urban wastewater treatment. International Office for Water, 2001.
- CONAMA. Conselho Nacional do Meio Ambiente (Brasil). 2005. Resolução nº 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. Diário Oficial da União, Brasília, DF, ano 142, n. 53, 18 mar. Seção 1, p. 58-63.
- COOPER, P. F.; JOB, G. D.; GREEN, M. B. AND SHUTES, R. B. E. Reed beds and constructed wetland for wastewater treatment, pp. 206, NRs Publications, Medmenham, Marlow, UK. 1996.
- COOPER,P.F. & FINDLATER, B.C. (Eds.). Constructed Wetlands in Water Pollution Control. Pergamon Press, Oxford, U.K., 1990.
- COSTA, L. L.;CEBALLOS, B. S. O.; MEIRA, C. M. B. S.;CAVALCANTI, M. L. F. Eficiência de Wetlands construídos com dez dias de detenção hidráulica na remoção de colífagos e bacteriófagos. Revista de Biologia e Ciências da Terra, v. 3, nº 1. 2003.
- CST (Companhia siderúrgica de Tubarão). Fluxo de produção. Disponível em: <http://www.cst.com.br>. Acesso em 27 de março de 2008.
-

- CUNHA, C. A. G. Análise da eficiência de um sistema combinado de alagados construídos na melhoria da qualidade das águas. Dissertação de mestrado. Escola de Engenharia de São Carlos. Universidade de São Paulo. 2006.
- DUNBABIN, J.S. and K.H. Bowmer. Potential use of constructed wetlands for treatment of industrial wastewaters containing metals. *Sci. Total Environ.*, 111 (2-3): 151-168. 1992.
- DRIZO, A.; FORGET, C.; CHAPUIS, Y. C. Phosphorus removal by electric arc furnace steel slag and serpentinite. *Water Research* nº 40, 1547-1554. 2006.
- FARIA, A.D. O gênero *Eleocharis* R. Br. (Cyperaceae) no Estado de São Paulo. Campinas, ix, 150p. Dissertação (Mestrado em Biologia Vegetal), Instituto de Biologia, Unicamp. 1998.
- FERNANDES, C. Esgotos Sanitários. Editora UFPB. João Pessoa, 1997.
- FREITAS, W. S. Desempenho de sistemas alagados construídos, cultivados com diferentes espécies vegetais, no tratamento de águas residuárias da suinocultura. Tese de doutorado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade federal de Viçosa. 2006
- GASPAR, P. M. F. Pós-tratamento de efluente de reator UASB em sistema de lodos ativados visando a remoção biológica de nitrogênio associada à remoção físico-química do fósforo. 2003. Dissertação de Mestrado. Escola Politécnica da Universidade de São Paulo.
- GESBERG, R. M.;STEPHEN, R. L.;BRENNER, R.; ELKINS, B. V. Integrated wastewater treatment using artificial wetlands: A gravel march case study. In: Hammer, D. A. (Ed). *Constructed wetland for waste water treatment: municipal, industrial e agricultural*. Michigan: Lewis Publishers, INC. 1989.
- GIL, A. S. B; BOVE, C. P. *Arquivos do Museu Nacional*, v.62, n.2, p.131-150, ISSN 0365-4508, Rio de Janeiro, abr./jun.2004.
- GROBICKI, A. & STUCKEY, D. C. Performance of the anaerobic baffled reactor under steady-state and shock loading conditions. *Biotechnology and Bioengineering*, vol 33, 344-355, 1991.
- GUNTENSPERGEN, G. R., STEARNS, F. & KADLEC, J. A. "Wetland vegetation". *Anais: 1st International Conference on Constructed Wetlands for Wastewater Treatment*, Chattanooga – Tennessee/USA, vol. I, no 5, pp. 73-88, junho/1988.
- HELLER, L. *Saneamento e Saúde*. Brasília: Organização Pan-Americana da Saúde/Organização Mundial da Saúde, 1997.
-

- HABERL et al. Constructed wetlands in Europe. *Water Science and Technology*, Great Britain, IAWQ, v.32, n.3, p.305-315, 1995.
- IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística). Censo Demográfico, 2000. Rio de Janeiro: IBGE. Disponível em <http://www.ibge.gov.br>. Acesso em 28 de março de 2008.
- INTORNE, S. C.; DIAS, D. P.; SANTOS JR, E. L.; MONTEIRO, S. N.; VIEIRA, C. M. F. Caracterização de escória de aciaria e efeito da sua granulometria nas propriedades de uma cerâmica argilosa. Congresso Brasileiro de Engenharia e Ciências dos Materiais. Foz do Iguaçu, PR. 2006.
- IZA, J.; COLLERAN, E.; PARIS, J. M. & WU, W. M. "International Workshop on Anaerobic Treatment Technology for Municipal and Industrial Wastewaters: Summary Paper", *Wat. Sci. and Tech.*, vol 24, no 8, pp. 1-16,1991.
- IWA Specialist Group on Use of Macrophytes in Water Pollution. *Constructed Wetlands for Pollution Control: Processes, Performance, Design and Operation*. Scientific and Technical Report nº 8. IWA Publishing, p.156. London, 2000.
- JOLY, A. B. Botânica: introdução à taxonomia vegetal. 5a edição, São Paulo/SP, Ed. Nacional, p.465. 1979.
- KADLEC, R.H. & KNIGHT, R.L. *Treatment Wetlands*. CRC Press/Lewis Publishers, Boca Raton, Florida, USA, 1996.
- KISSMANN, K.G. *Plantas Infestantes e Nocivas*. São Paulo: Basf Brasileira S.A. 603p., 1993.
- LORENZI, H. *Plantas daninhas do Brasil: terrestres, aquáticas, parasitas, tóxicas e medicinais*. Edição do autor. Nova Odessa/SP, 1982. p.425.
- MANSOR, M.T.C. et al Análise das condições básicas de saneamento rural através de censo. In: Congresso argentino e Internacional de Engenharia Rural, 4, 2, 1996, Neuquen, Argentina. Anais. v.II, 1996. p. 848-899.
- MANSOR, M.T.C. *Uso de leito de macrófitas no tratamento de águas residuárias*. 106p. Tese (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 1998.
- MAZZOLA, M. *Uso de leitos cultivados de fluxo vertical por batelada no pós-tratamento de efluente de reator anaeróbico compartimentado*. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas. 2003.
-

- MELO JÚNIOR, A. S. Dinâmica da remoção de nutrientes em alagados construídos com *Thypha* sp. 2003. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola. Universidade Estadual de Campinas.
- METCALF e EDDY, Wastewater engineering – treatment, disposal and reuse. New York: McGraw Hill Inc, 3ª edição, 1991.
- NBR 10004. Resíduos sólidos (Classificação). Rio de Janeiro, 2004.
- PECKOLT, W. “A taboa (*Typha*) e suas utilidades”. *Chácaras e Quintais*, vol. 66, pp. 338- 340, 1942.
- NEDER, D. K.; QUEIROZ, T. R.; SOUZA, M. A. A. Remoção de sólidos suspensos de efluentes de lagoas de estabilização por meio de processos naturais. XXVII Congresso Interamericano de Engenharia Sanitária e Ambiental. ABES, 2007.
- PHILIPPI, L. R. e SEZERINO, P. H. Aplicação de sistemas tipo wetlands no tratamento de águas residuárias: utilização de filtros plantados com macrófitas. Editora do autor. Florianópolis, 2004.
- POVINELLI, S. C. C. Estudo da hidrodinâmica e partida de reator anaeróbio com chicanas tratando esgoto sanitário. Dissertação de Mestrado EESC – Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos/SP, p. 181, 1994.
- PLATZER, C. e MAUCH, K. Soil clogging in vertical flow reed beds – mechanisms, parameters, consequences and... solutions? *Wat. Sci. Tech.*, v. 35, n.5, p.175 – 181. 1997.
- REED, S.C., MIDDLEBROOKS, E.J. & CRITES, R.W. *Natural Systems for Waste Management and Treatment*. Mc-Graw-Hill Book Company, New York, 1988.
- ROSEN, G. *Uma História da Saúde Pública*. Unesp/Hucitec/Abrasco. São Paulo 1994.
- SALATI, E. Júnior; SALATI, E.; SALATI, E. Wetland projects developed in Brazil. *Water Science Technology*, n.3, v. 40, p.19-25, 1999.
- SALT, D.E.; SMITH, R.D.; RASKING, I. Phytoremediation. *Annu. Rev. Plant Physiol. Plant Mol. Biol.* v.49, p.643-668. 1998.
- SEDLAK, R. *Phosphorus and Nitrogen Removal from Municipal Wastewater: Principles and Practice*, 2nd ed, Lewis Publishers, NY. 1991.
- SHILTON, A. N.; ELMETRI, I.; PRATT, S.; HAVERKAMP, R. G.; BILBY, S. C. Phosphorus removal by an ‘active’ slag filter – a decade of full scale experience. *Water research* nº 40, p.113 – 118. 2006.
-

- SHUTES, R. B. E. Artificial wetlands and water quality improvement. Environmental International. Vol. 26, 5ª ed. p. 441-447. 2001.
- SPEECE, R. E. Anaerobic Biotechnology – For Industrial Wastewaters Archae Press Vanderbilt University, 416p. 1996.
- SPEECE, R.E. (1983) Anaerobic biotechnology for industrial wastewater treatment. Environ. Sci. Technol., 17:9, 416-427.
- SOUSA, J. T.; VAN HAANDEL, A. C.; COSENTINO, P. R. S.; GUIMARÃES, A. V. A. Pós-tratamento de efluente de reator UASB utilizando sistemas “wetlands” construídos. Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental, v. 4, nº 1, p. 87 – 91. Campina Grande, PB. 2000.
- SOTO, F., Garcia, M., de Luis, E., Becares, E. Role of *Scirpus lacustris* in bacterial and nutrient removal from wastewater. Water Sci. Technol. 40, 241\_/247. 1999.
- SOUZA, W. G. Associação em série de um reator anaeróbico compartimentado, uma lagoa de polimento e um sistema de pós-tratamento físico-químico para tratamento terciário de esgoto sanitário. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do espírito Santo. 2005.
- SVENSON, H.K. Monographic studies in the genus *Eleocharis*., Rhodora, 31:121-135, 152-163, 167-191, 199-219, 224-242. Havard, 1929.
- TECAM Tecnologia Ambiental Ltda. Estudo de análise de risco a saúde humana e ao meio ambiente pelo uso de escória de siderurgia. Serra, ES. 2005.
- VALENTIM, M. A. A. Desmpenho de leitos cultivados (“constructed wetland”) para tratamento de esgoto: contribuições para concepção e operação. Tese de doutorado – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, 2003.
- VALENTIM, M. A. A. Uso de leitos cultivados no tratamento de efluente de tanque séptico modificado. Dissertação de Mestrado. FEAGRI – Faculdade de Engenharia Agrícola – UNICAMP, Campinas/SP. p.119, 1999.
- VAN HAANDEL, A. C. e LETTINGA, G. Tratamento anaeróbico de esgotos: Um manual para regiões de clima quente., Campina Grande – PA, p. 240. 1994.
- VANCINI, G. L. Avaliação de metais e não-metals da escória de aciaria de usinas siderúrgicas brasileiras conforme NBR 10004/2004. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal do espírito Santo. 2005.
-

- VON SPERLING, M. Princípio do tratamento biológico de águas residuárias – introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. Vol 1, DESA-UFMG, Belo Horizonte, 2005.
- VON SPERLING, M.; CHERNICHARO, C.A.L. Tendências no tratamento simplificado de águas residuárias. Tópicos de relevância. in: Seminário Internacional Tendências no Tratamento Simplificado de Águas Residuárias Domésticas e Industriais, 1996, Belo Horizonte, M.G. Anais. p.1-11. 1996.
- USEPA. Guiding principles for constructed treatment wetlands: providing for water quality and wildlife habitat. US. Environment Protection Agency. Washington, D.C., p. 41, 2000c.
- USEPA. Constructed wetlands treatments of municipal wastewaters. EPA/625/r-99/010, Cincinnati, Ohio. p. 152. September, 1999.
- USEPA. Design manual on constructed wetlands and aquatic plant systems for municipal wastewater treatment, EPA/ 625/ 1-88/ 022, CERL, Cincinnati OH, 1988.
- WOOD, R. B. & McATAMNEY, C. F. "Constructed wetlands for wastewater treatment: the use of laterite in the bed medium in phosphorus and heavy metal removal", Kluwer Academic Publishers, Hydrobiologia, vol. 340, pp. 323-331, 1996.
- Ye Z.H., Whiting S., Qian J.H., Lytle C.M., Lin Z.Q., and Terry N. Trace element removal from coal pile leachate by an Alabama 10-year old constructed wetland. Journal of Environment Quality, 30: 1710-1719. 2001.
-

## ANEXOS

### ANEXO A

Resultados da caracterização físico-química da associação entre reator anaeróbio compartimentado (RAC) e leitos cultivados na vazão de 50mL/s (1ª etapa de monitoramento).

Tabela 19 – Resultados médios obtidos nas análises físico-químicas, com n= 16, exceto para DBO cujo n= 13. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente).

Pontos do Sistema	Valores médios obtidos em mg/L para os parâmetros analisados na vazão de 50mL/s									
	DQO	DBO	SST	SS	SD	Dureza	pH	Turbidez	NTK	P <sub>total</sub>
<b>EB</b>	524 ± 279	185± 78	619 ± 366	125 ± 96	53 ± 316	54 ± 12	6,9 ± 0,2	68 ± 11	66 ± 22	5,9 ± 3
<b>RAC</b>	311 ± 257	138 ± 71	391 ± 81	56 ± 27	346 ± 108	78 ± 46	7,3 ± 0,9	45 ± 15	48 ± 26	4,2 ± 2
<b>LC1</b>	103± 48	64 ± 35	713 ± 515	27 ± 24	713 ± 512	131 ± 52	7,0 ± 0,4	12 ± 9	28 ± 20	2,9 ± 2
<b>LC2</b>	105 ± 29	49 ± 25	1.119 ± 798	91 ± 100	1.040 ± 767	737 ± 608	11,4 ± 0,8	10 ± 7	33 ± 23	0,9 ± 1
<b>LC3</b>	95 ± 25	67 ± 27	1.622 ± 550	44 ± 34	1.571 ± 539	1.300 ± 472	11,8 ± 0,9	4 ± 3	27 ± 12	0,9 ± 1



Tabela 20 – Eficiências médias obtidas nas análises físico-químicas, com n= 16, exceto para DBO cujo n= 13. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitões 1, 2 e 3 respectivamente), ALD (abaixo do limite de detecção do aparelho- abaixo de  $10^{-6}$ ).

Pontos do Sistema	Eficiências obtidas em porcentagem para os parâmetros analisados na vazão de 4,32 m <sup>3</sup> /d								
	DQO	DBO	SST	SS	SD	Dureza	Turbidez	NTK	P <sub>total</sub>
RAC	41	26	37	55	36	-45	33	28	29
LC1	67	53	-82	52	-106	-69	72	40	31
LC2	66	64	-186	-62	-201	-848	78	30	79
LC3	69	51	-314	22	-354	-1578	90	44	78

## ANEXO B

Resultados da caracterização físico-química da associação entre reator anaeróbio compartimentado (RAC) e leitos na vazão de 75 mL/s (2ª etapa de monitoramento).

Tabela 21 – Resultados médios obtidos nas análises físico-químicas, com n= 7. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente).

Pontos do Sistema	Valores médios obtidos em mg/L para os parâmetros analisados na vazão de 75mL/s									
	DQO	DBO	SST	SS	SD	Dureza	pH	Turbidez	NTK	P <sub>total</sub>
<b>EB</b>	352 ± 69	160 ± 53	571 ± 152	70 ± 23	538 ± 139	66 ± 27	7,0 ± 0,2	68 ± 17	72 ± 14	6,5 ± 2
<b>RAC</b>	185 ± 75	106 ± 42	436 ± 131	20 ± 14	429 ± 127	73 ± 14	7,1 ± 0,2	25 ± 14	48 ± 14	4,9 ± 1
<b>LC1</b>	49 ± 14	28 ± 11	485 ± 97	25 ± 19	573 ± 150	139 ± 33	6,8 ± 0,1	8 ± 5	20 ± 10	1,2 ± 0,6
<b>LC2</b>	48 ± 10	16 ± 9	665 ± 277	19 ± 7	761 ± 396	304 ± 274	11,5 ± 0,3	3 ± 1	19 ± 10	0,3 ± 0,2
<b>LC3</b>	27 ± 8	15 ± 6	1.086 ± 197	21 ± 16	1.061 ± 235	878 ± 200	11,9 ± 0,2	2 ± 2	25 ± 17	0,2 ± 0,1

Tabela 22 – Eficiências médias obtidas nas análises físico-químicas, com n=7. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitos 1, 2 e 3 respectivamente), ALD (abaixo do limite de detecção do aparelho- abaixo de  $10^{-6}$ )

Pontos do Sistema	Eficiências obtidas em porcentagem para os parâmetros analisados na vazão de 6,48m <sup>3</sup> /d								
	DQO	DBO	SST	SS	SD	Dureza	Turbidez	NTK	P <sub>total</sub>
RAC	48	34	24	71	20	-10	63	33	24
LC1	73	74	-11	-24	-33	-91	70	59	76
LC2	74	84	-53	8	-77	-318	88	61	93
LC3	85	86	-149	-4	-147	-1.106	92	48	96

## ANEXO C

Resultados da caracterização microbiológica da associação entre reator anaeróbio compartimentado (RAC) e leitões na vazão de 50mL/s (1ª etapa de monitoramento).

Tabela 23 – Resultados obtidos nas análises microbiológicas, com n= 14. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitões 1, 2 e 3 respectivamente).

	Coliformes totais (NMP de cels./100 mL)					<i>E. coli</i> (NMP de céls./100 mL)				
	EB	RAC	LC1	LC2	LC3	EB	RAC	LC1	LC2	LC3
<b>Resultados expressos em valores absolutos no período de análise.</b>	4,64E+06	2,40E+06	2,42E+04	1,00E+00	1,00E+00	2,31E+06	1,32E+07	2,42E+04	1,00E+00	1,00E+00
	2,42E+10	1,00E+04	4,35E+04	1,00E+00	1,00E+00	2,42E+10	1,75E+05	2,48E+04	1,00E+00	1,00E+00
	2,61E+07	1,05E+07	6,49E+04	1,00E+00	1,00E+00	7,12E+06	1,11E+06	5,10E+02	1,00E+00	1,00E+00
	2,10E+07	1,30E+07	2,42E+05	1,00E+00	1,00E+00	3,79E+06	4,11E+06	2,42E+06	1,00E+00	1,00E+00
	5,38E+06	4,61E+06	2,42E+06	1,00E+00	1,00E+00	1,20E+06	1,58E+06	2,42E+06	1,00E+00	1,00E+00
	4,43E+06	7,70E+06	1,41E+05	3,45E+03	3,10E+00	1,83E+06	2,31E+06	7,27E+04	3,45E+03	1,00E+00
	8,30E+06	9,58E+06	4,00E+04	1,00E+00	1,00E+00	8,10E+06	3,10E+05	8,10E+02	1,00E+00	1,00E+00
	5,10E+07	6,69E+05	2,04E+04	1,00E+00	1,00E+00	4,00E+06	5,58E+05	1,02E+03	1,00E+00	1,00E+00
	3,36E+07	6,70E+06	4,54E+04	1,00E+00	1,00E+00	5,05E+07	4,14E+05	2,07E+03	1,00E+00	1,00E+00
	5,78E+06	1,98E+06	8,71E+04	1,00E+00	6,38E+01	9,30E+06	7,00E+04	3,14E+03	1,00E+00	1,00E+00
	4,10E+06	1,87E+05	2,62E+03	1,00E+00	1,00E+00	3,10E+06	4,10E+04	5,20E+02	1,00E+01	1,00E+00
	2,00E+06	6,70E+05	6,87E+04	6,38E+02	1,00E+00	1,00E+06	1,20E+05	1,89E+03	1,00E+01	1,20E+01
	9,14E+06	5,00E+05	6,17E+04	5,10E+01	1,00E+00	2,00E+06	1,20E+05	6,63E+04	1,00E+00	1,00E+00
	8,26E+07	7,70E+06	2,42E+05	3,00E+01	1,00E+00	3,10E+06	3,38E+05	2,42E+05	2,00E+01	4,10E+00
<b>Média Geométrica</b>	1,89E+07	1,83E+06	6,84E+04	4,79E+00	1,46E+00	7,18E+06	4,84E+05	1,40E+04	3,08E+00	1,32E+00

## ANEXO D

Resultados da caracterização microbiológica da associação entre reator anaeróbio compartimentado (RAC) e leitões na vazão de 75mL/s (2ª etapa de monitoramento).

Tabela 24 – Resultados obtidos nas análises microbiológicas, com n= 7. A saber: EB (esgoto bruto), RAC (reator anaeróbio compartimentado), LC1, LC2 e LC3 (leitões 1, 2 e 3 respectivamente).

	Coliformes totais (NMP de cels./100 mL)					<i>E. coli</i> (NMP de céls./100 mL)				
	EB	RAC	LC1	LC2	LC3	EB	RAC	LC1	LC2	LC3
<b>Resultados expressos em valores absolutos no período de análise.</b>	1,00E+06	1,32E+05	3,10E+02	0,00E+00	2,13E+01	1,00E+06	2,00E+04	2,00E+02	1,00E+00	4,10E+00
	5,20E+06	1,00E+04	1,00E+02	2,88E+01	3,10E+00	2,00E+06	1,00E+04	1,00E+02	1,00E+00	1,00E+00
	1,37E+07	1,56E+05	4,62E+03	1,00E+00	1,00E+02	7,10E+06	5,26E+05	1,81E+03	1,00E+00	1,00E+00
	9,70E+06	7,20E+04	2,00E+02	0,00E+00	0,00E+00	4,00E+06	2,18E+04	1,43E+03	1,00E+00	1,00E+01
	1,00E+06	5,63E+05	8,70E+04	1,42E+01	0,00E+00	1,00E+06	2,38E+05	1,85E+03	1,61E+01	1,00E+00
	3,64E+07	8,15E+05	2,53E+03	9,40E+00	3,00E+01	3,54E+07	2,75E+05	1,71E+03	3,00E+00	2,00E+00
	3,01E+07	7,20E+05	2,47E+03	7,20E+00	1,00E+00	1,69E+07	4,19E+05	1,44E+03	5,10E+00	1,00E+00
<b>Média Geométrica</b>	6,92E+06	1,74E+05	1,48E+03	4,31E+00	5,71E+00	4,44E+06	9,36E+04	8,14E+02	2,20E+00	1,88E+00

**ANEXO E**

Séries históricas nos períodos de análise em comparações parciais.

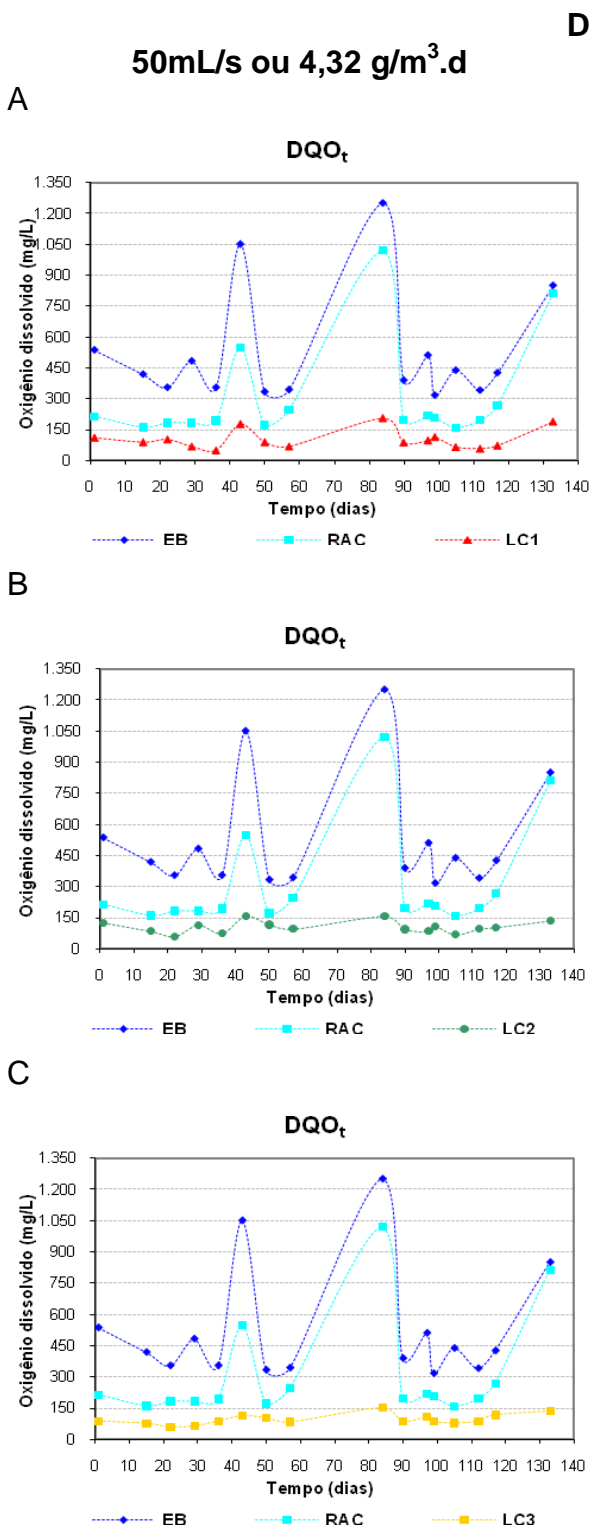


Figura 76 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DQO<sub>t</sub> no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

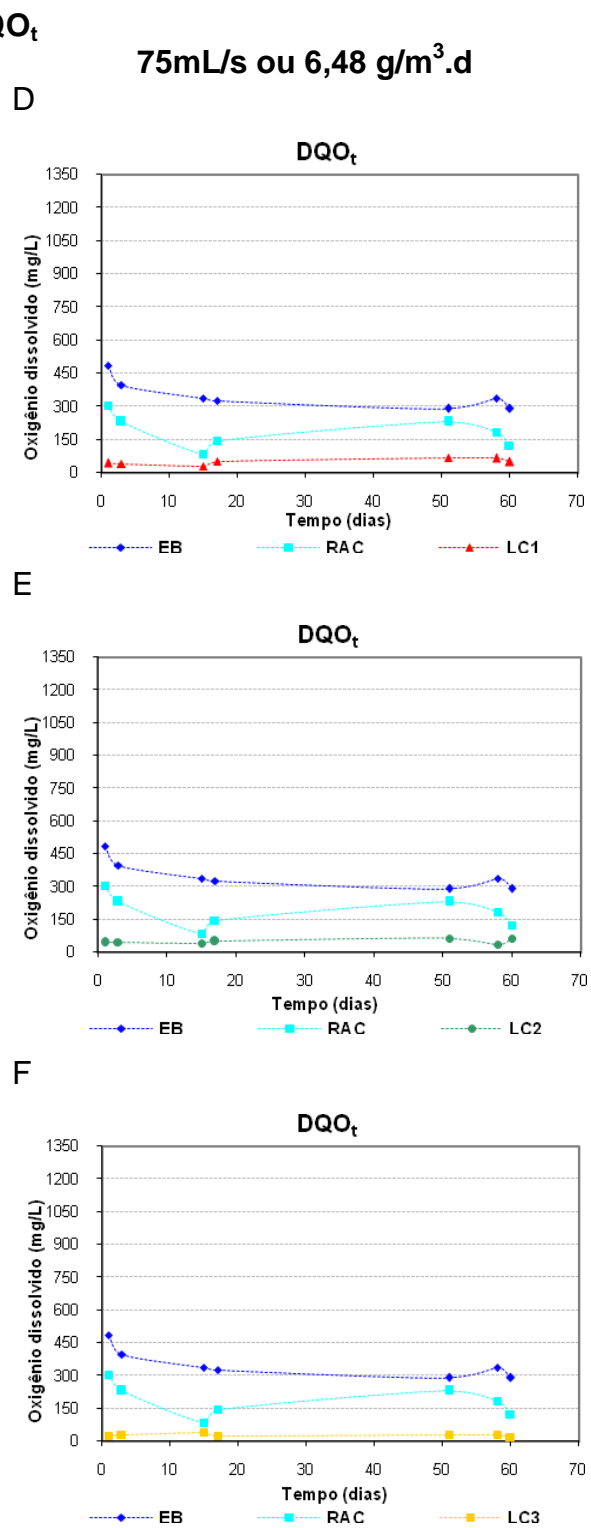


Figura 77 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DQO<sub>t</sub> no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

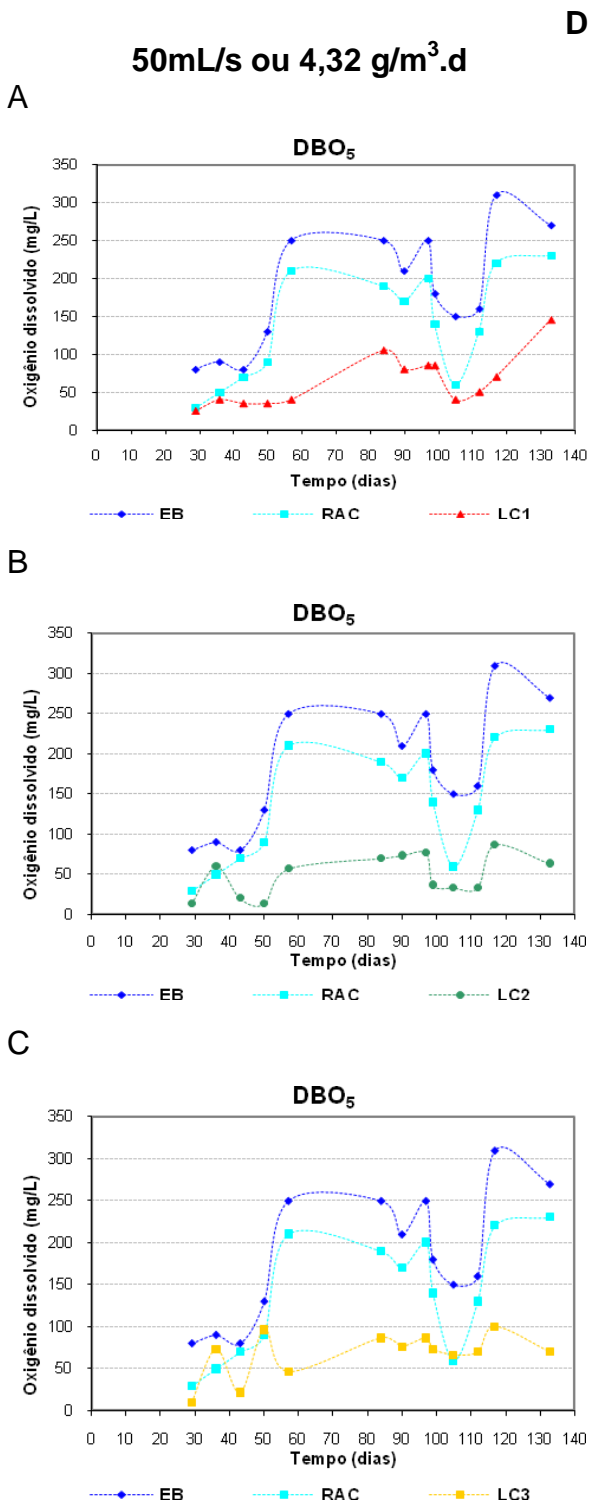


Figura 78 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DBO<sub>5</sub> no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

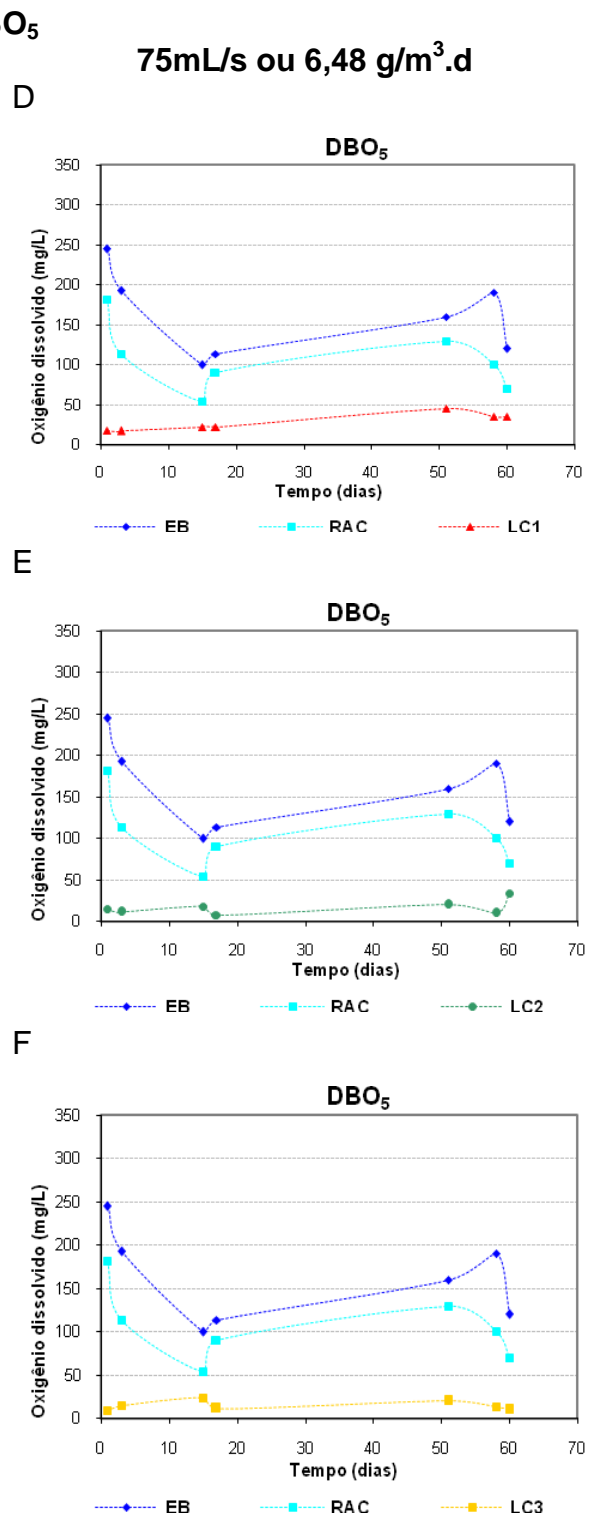


Figura 79 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro DBO<sub>5</sub> no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

NTK

50mL/s ou 4,32 g/m<sup>3</sup>.d

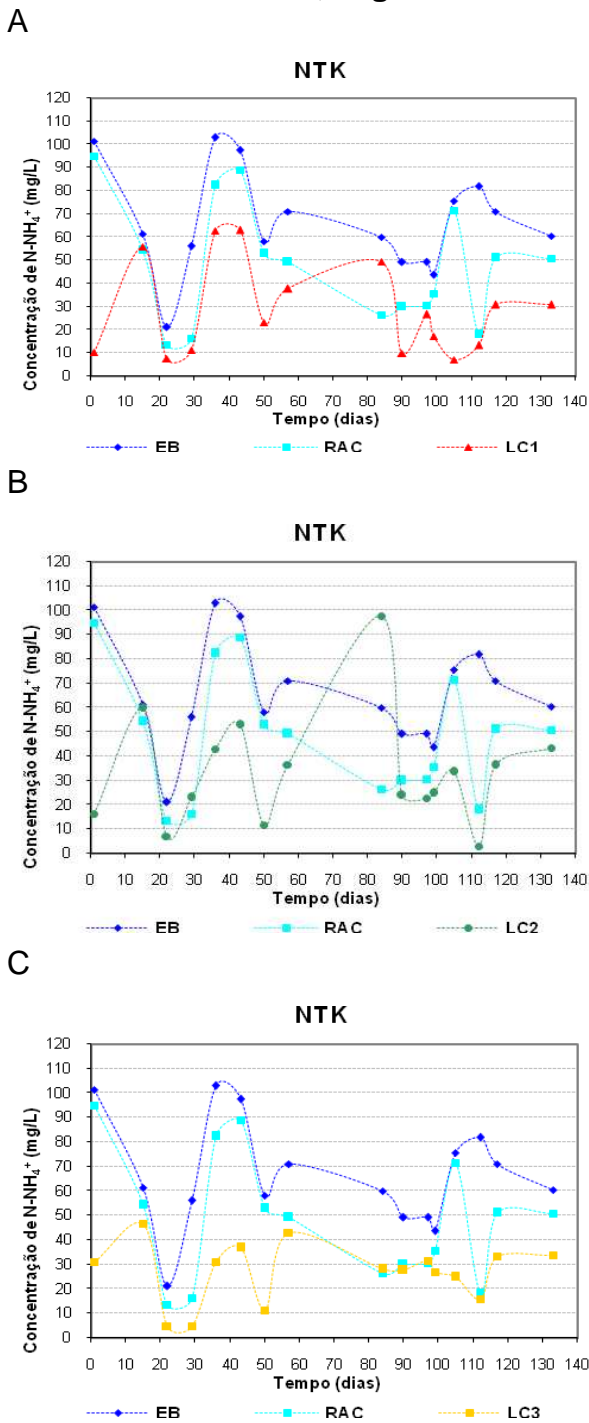


Figura 80 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro NTK no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

75mL/s ou 6,48 g/m<sup>3</sup>.d

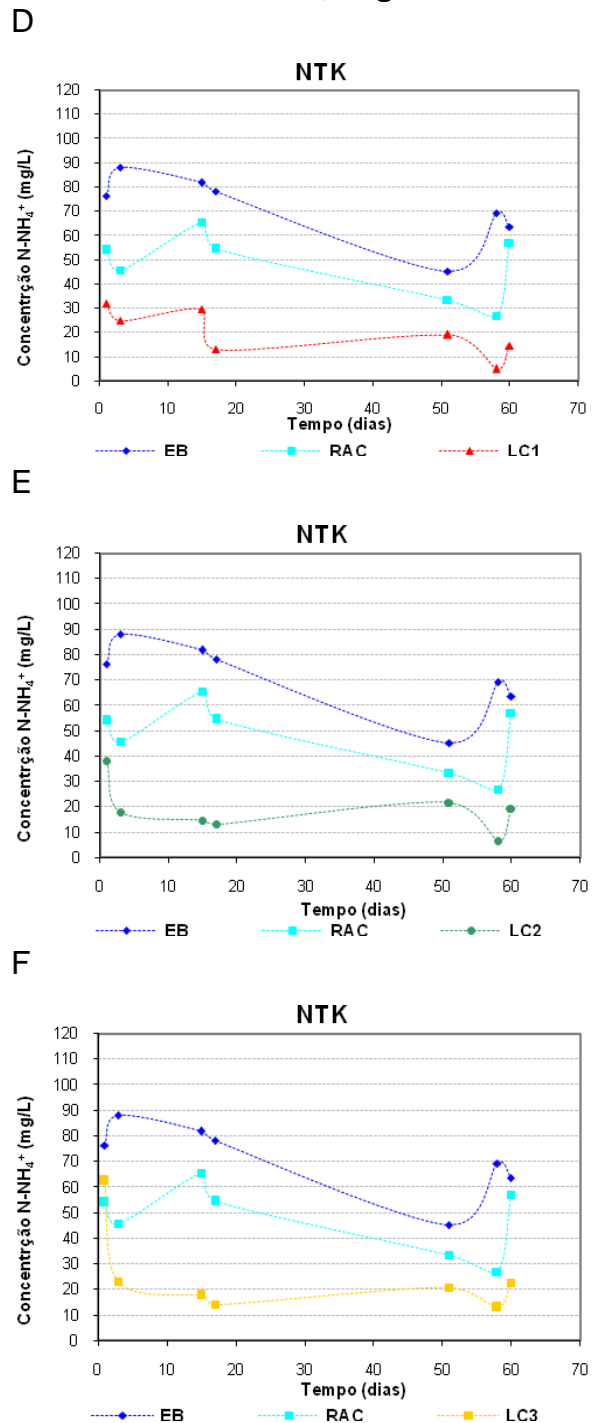


Figura 81 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro NTK no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.



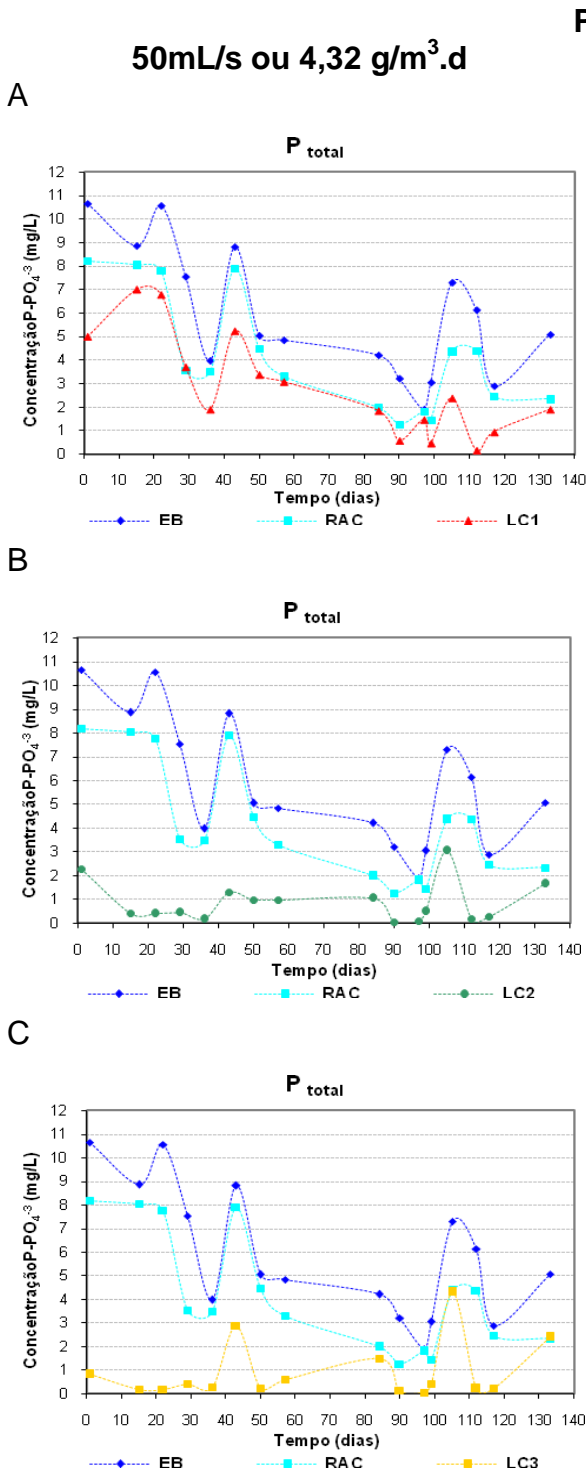


Figura 82 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro  $P_{total}$  no período de março a agosto de 2007, com  $n=16$ , vazão de 50mL/s e TDH 19h.

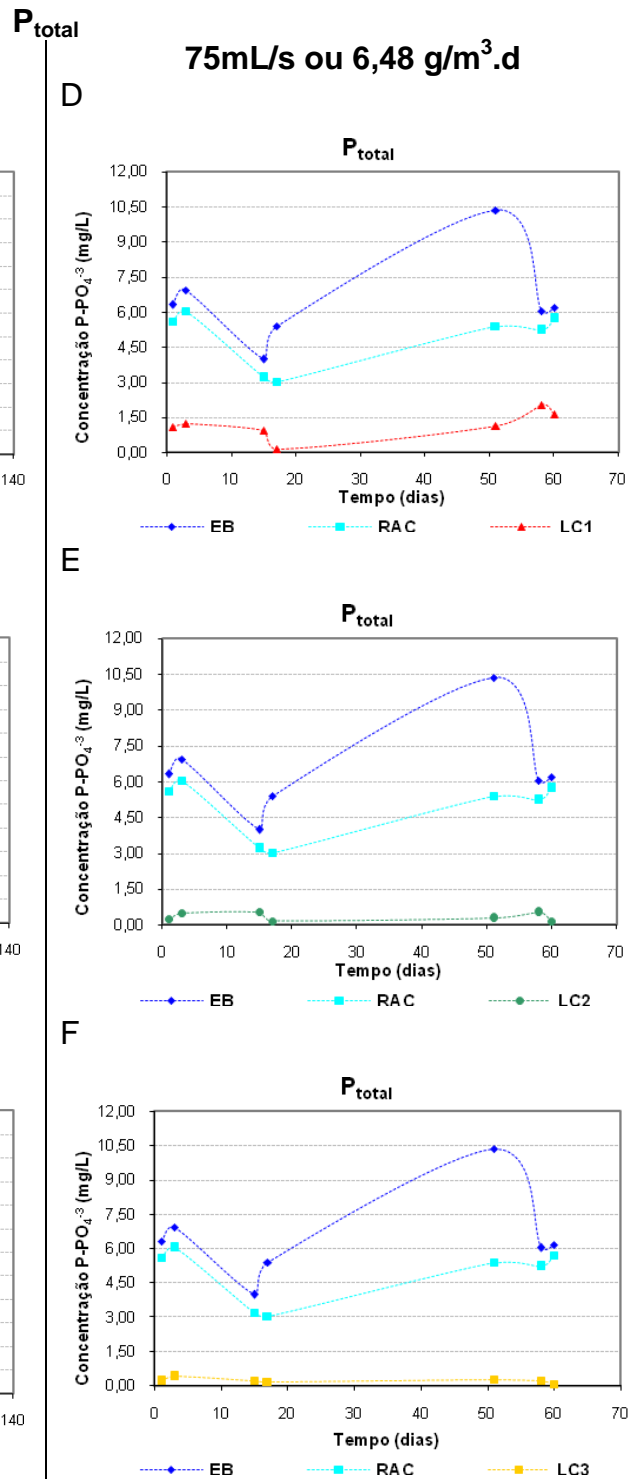


Figura 83 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro  $P_{total}$  no período de janeiro a março de 2008, com  $n=7$ , vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

**Coliformes totais**

**50mL/s ou 4,32 g/m<sup>3</sup>.d**

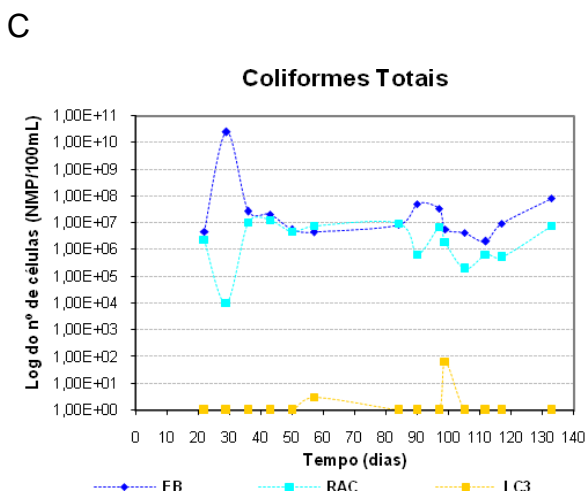
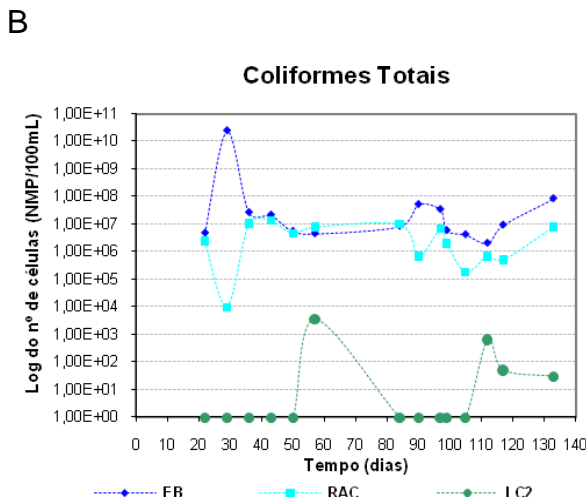
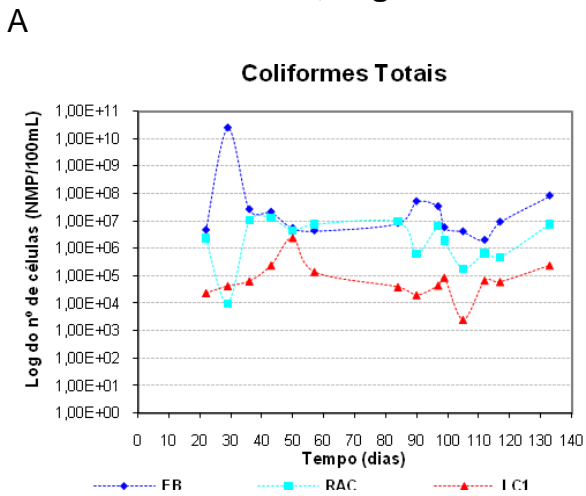


Figura 84 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro coliformes totais no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

**75mL/s ou 6,48 g/m<sup>3</sup>.d**

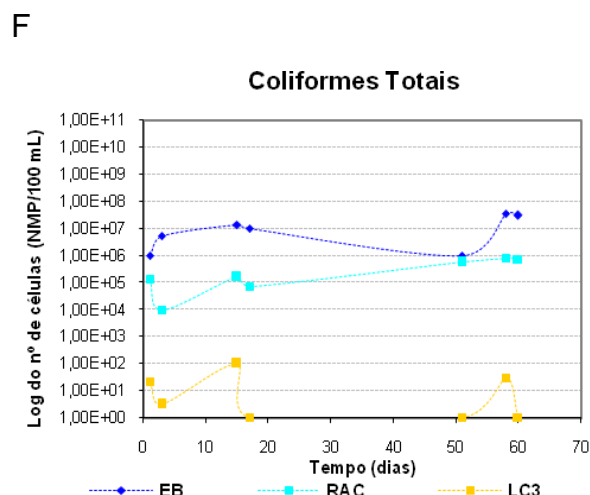
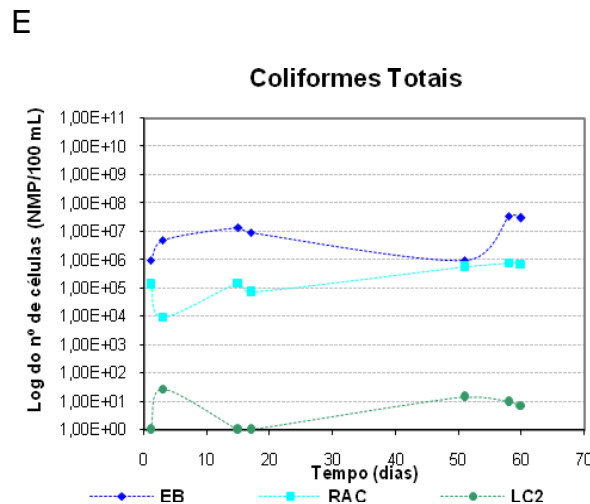
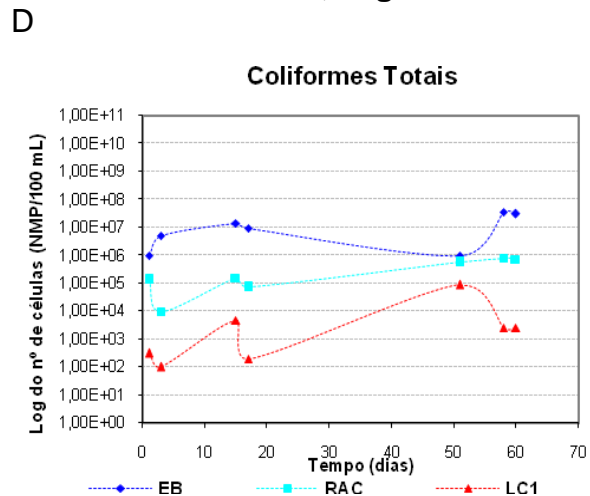


Figura 85 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro coliformes totais no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

*E. coli*

50mL/s ou 4,32 g/m<sup>3</sup>.d

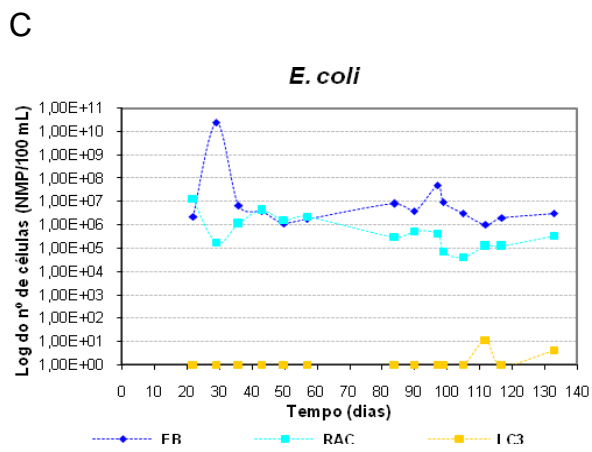
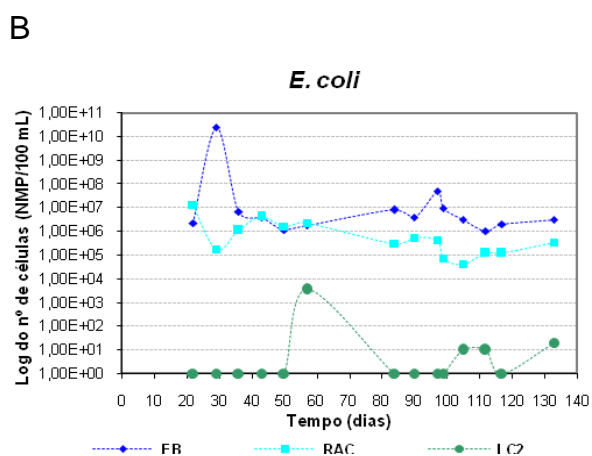
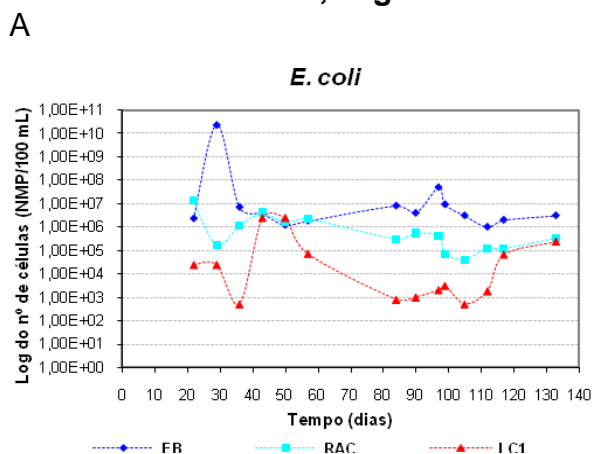


Figura 86 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro *E. coli* no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

75mL/s ou 6,48 g/m<sup>3</sup>.d

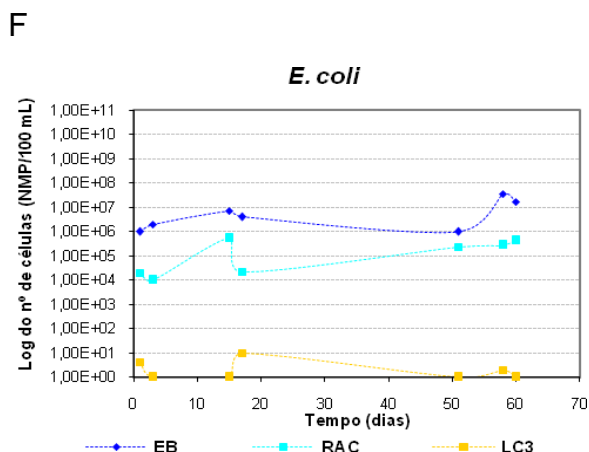
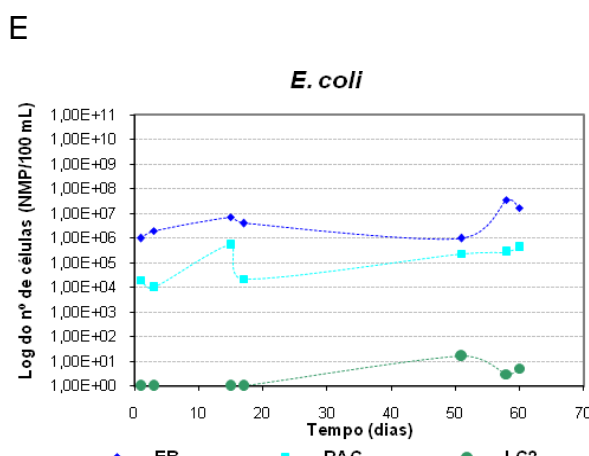
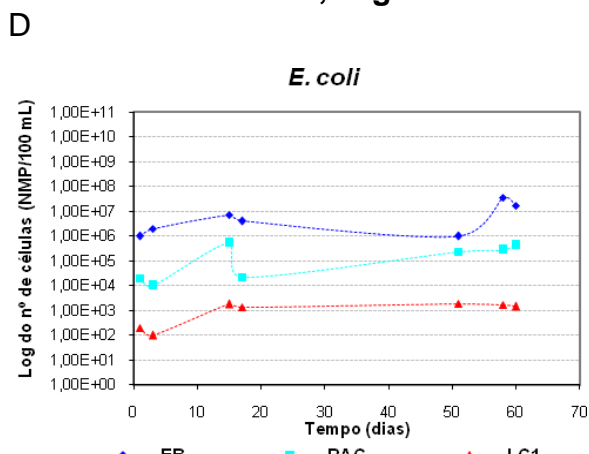


Figura 87 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro *E. coli* no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

SST

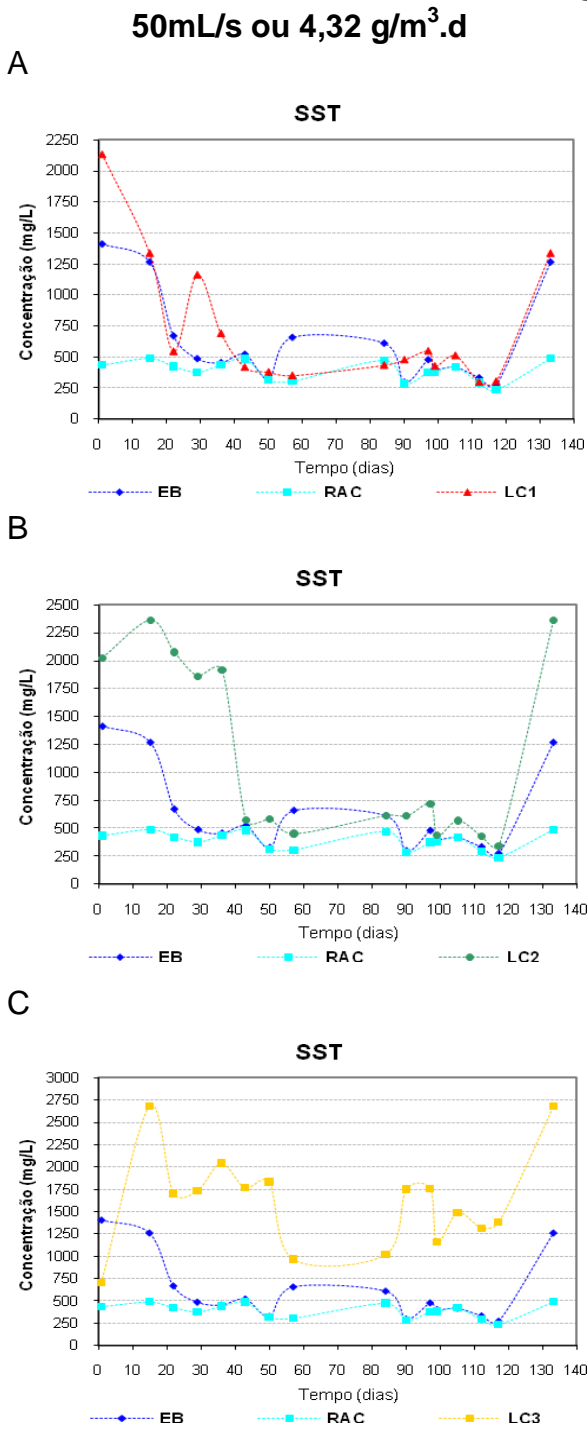


Figura 88 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SST no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

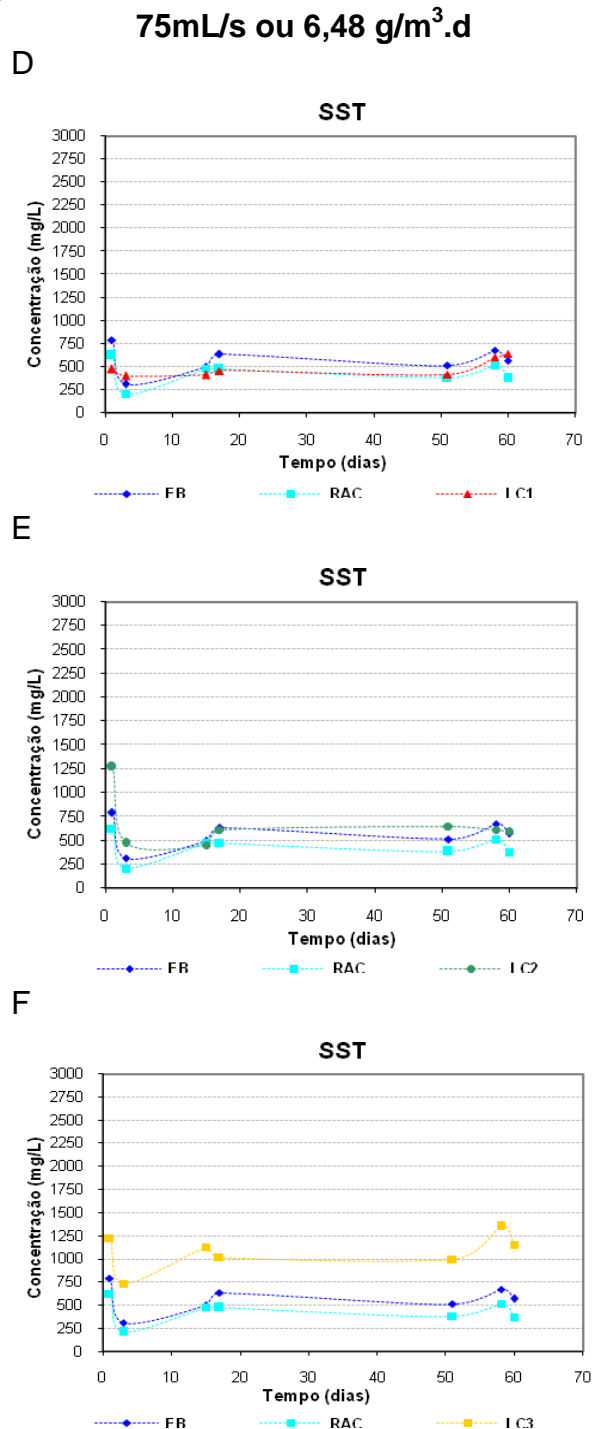


Figura 89 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SST no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

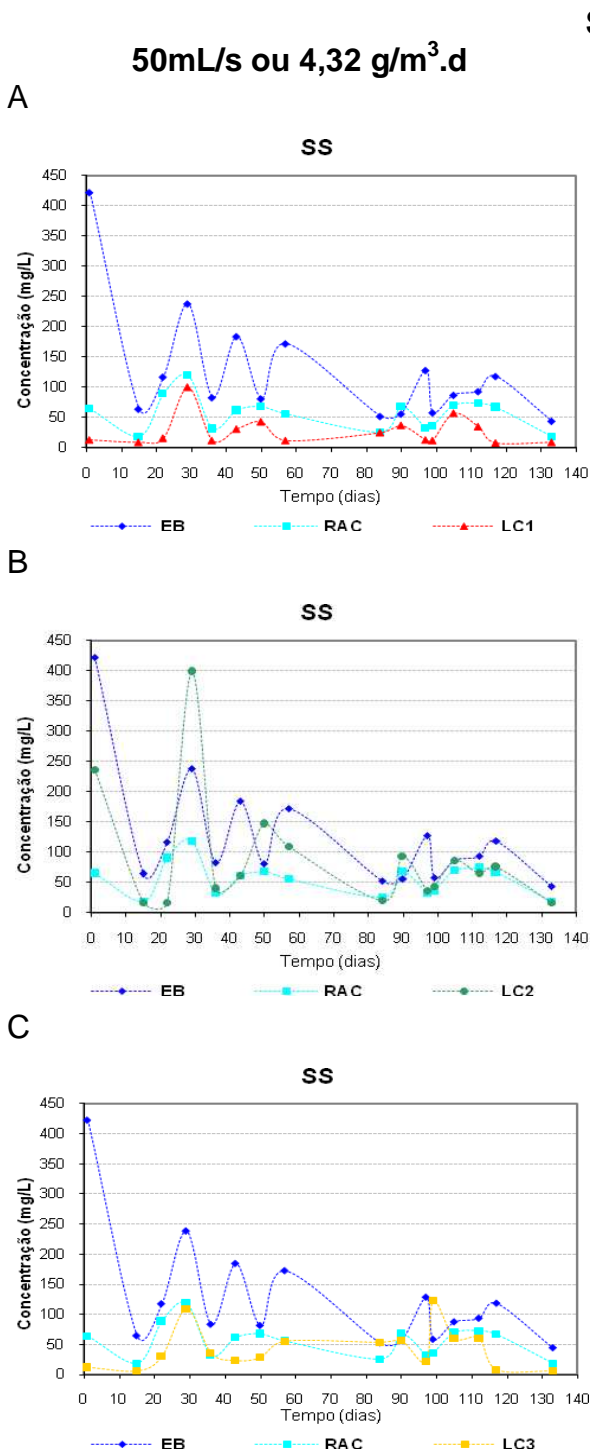


Figura 90 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SS no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

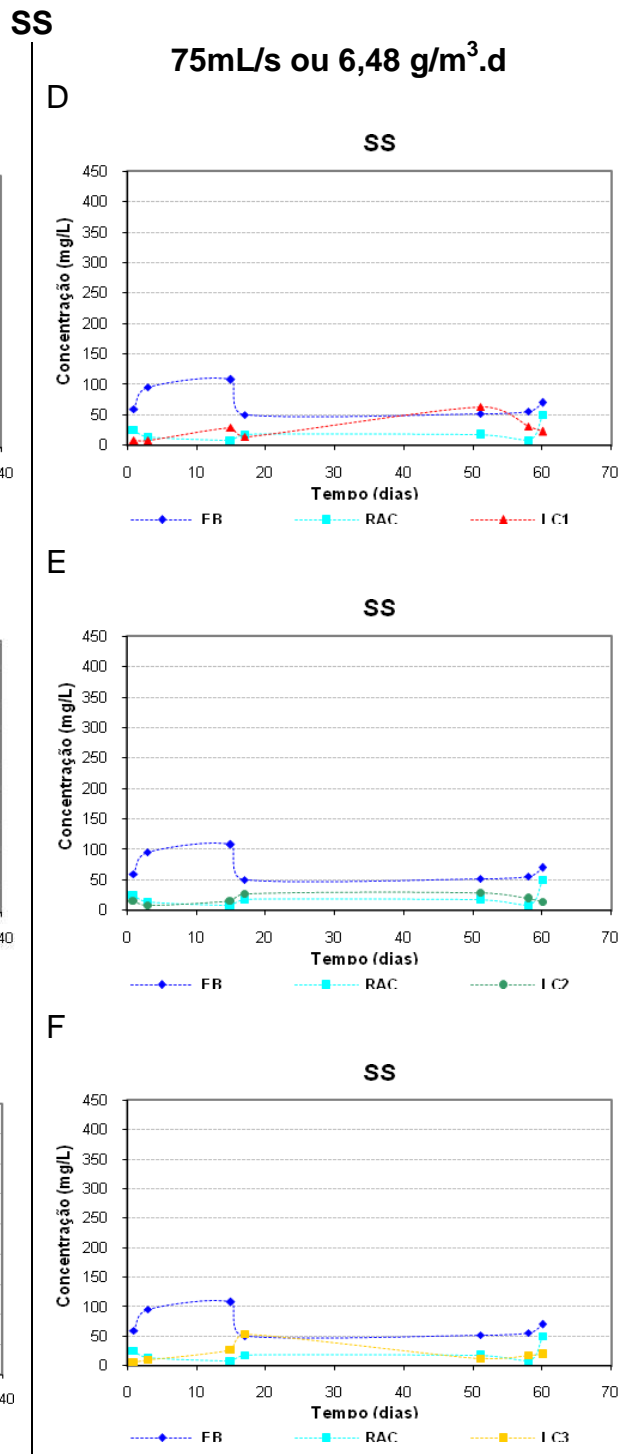


Figura 91 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SS no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

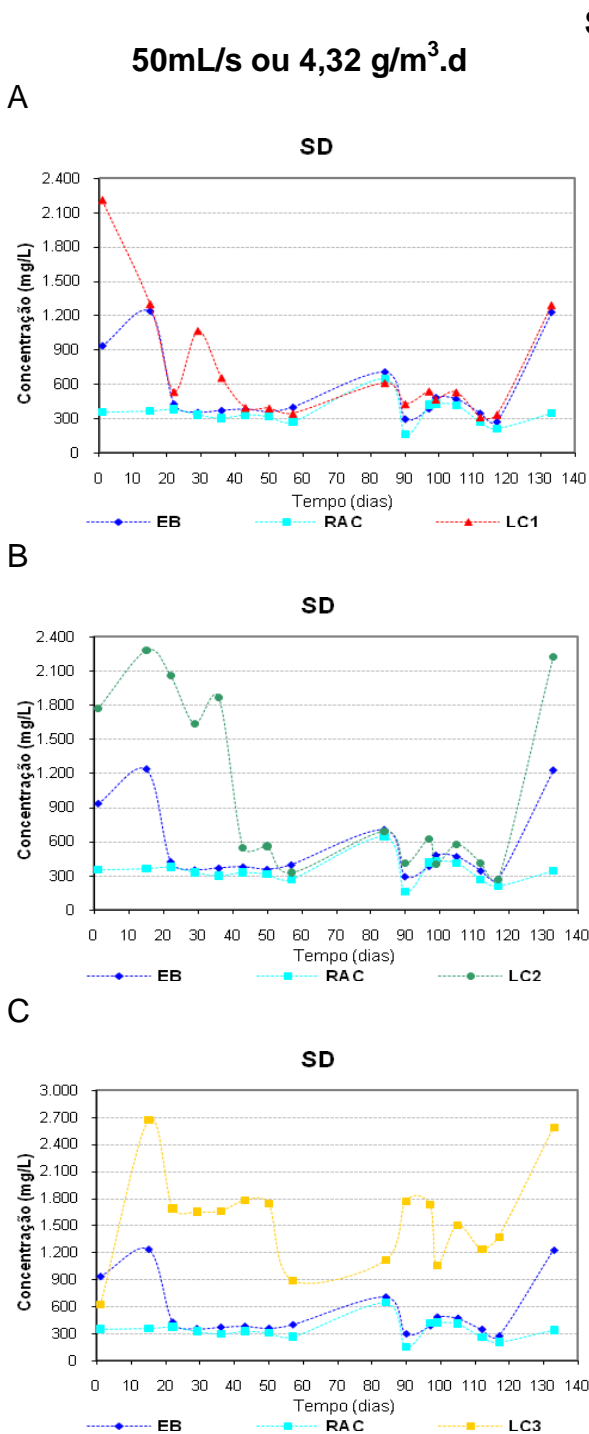


Figura 92 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SD no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

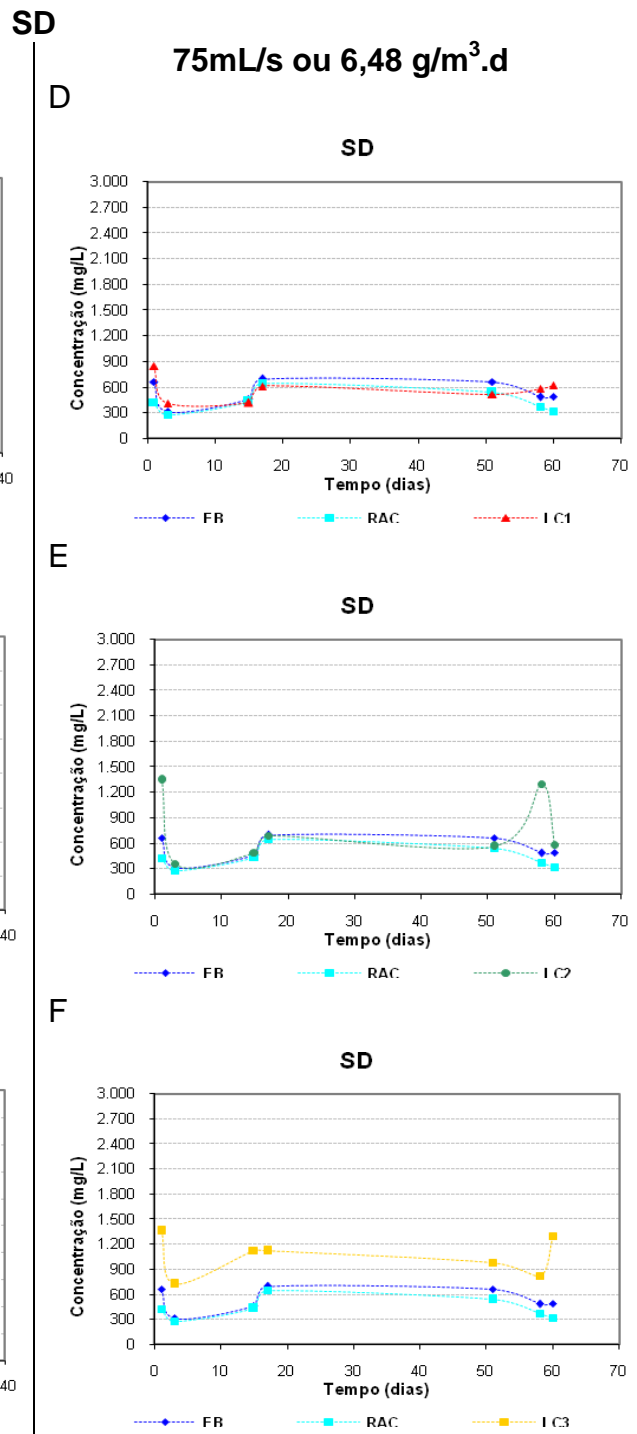


Figura 93 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro SD no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

Dureza

50mL/s ou 4,32 g/m<sup>3</sup>.d

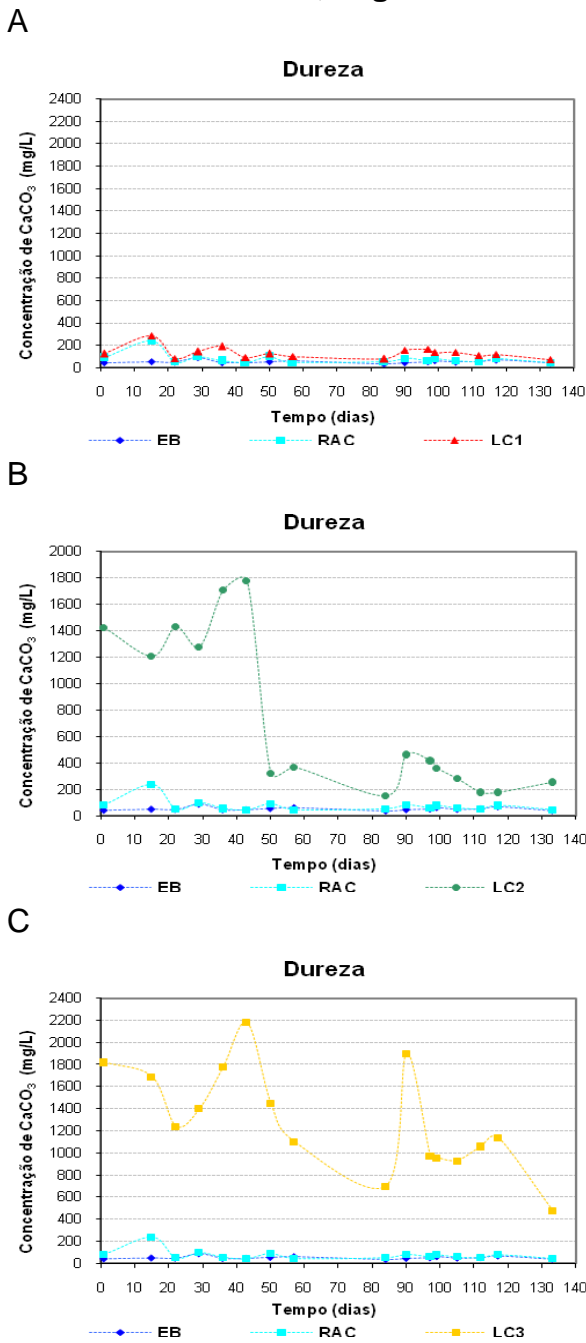


Figura 94 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro dureza no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

75mL/s ou 6,48 g/m<sup>3</sup>.d

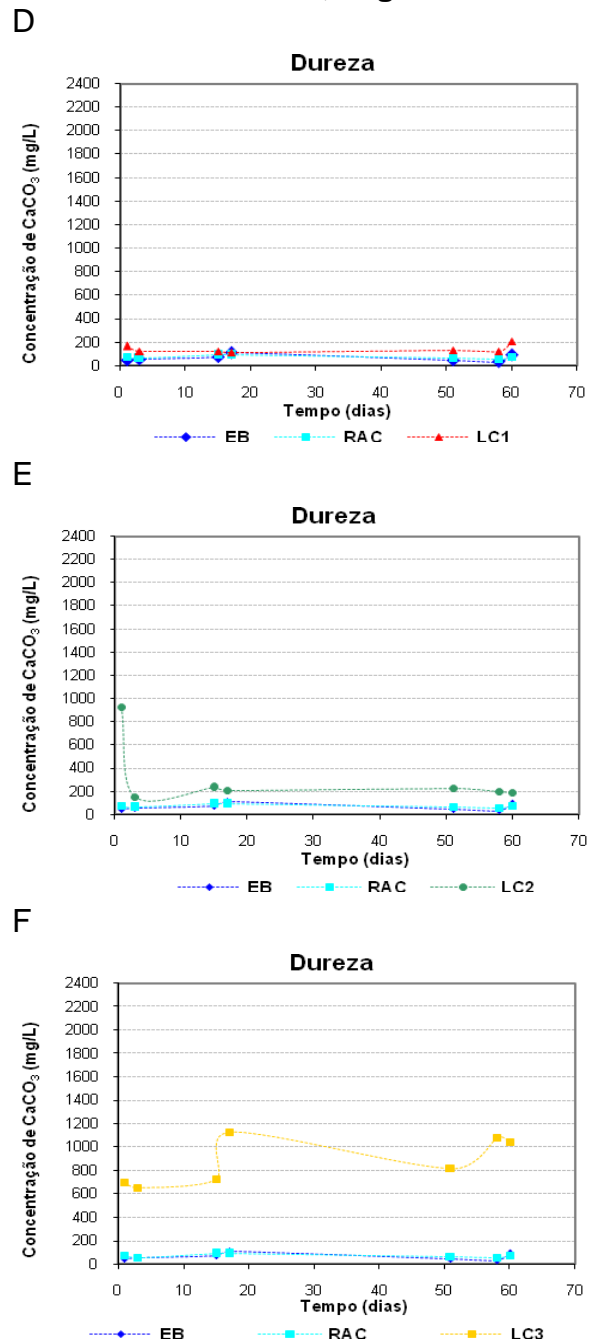


Figura 95 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro dureza no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

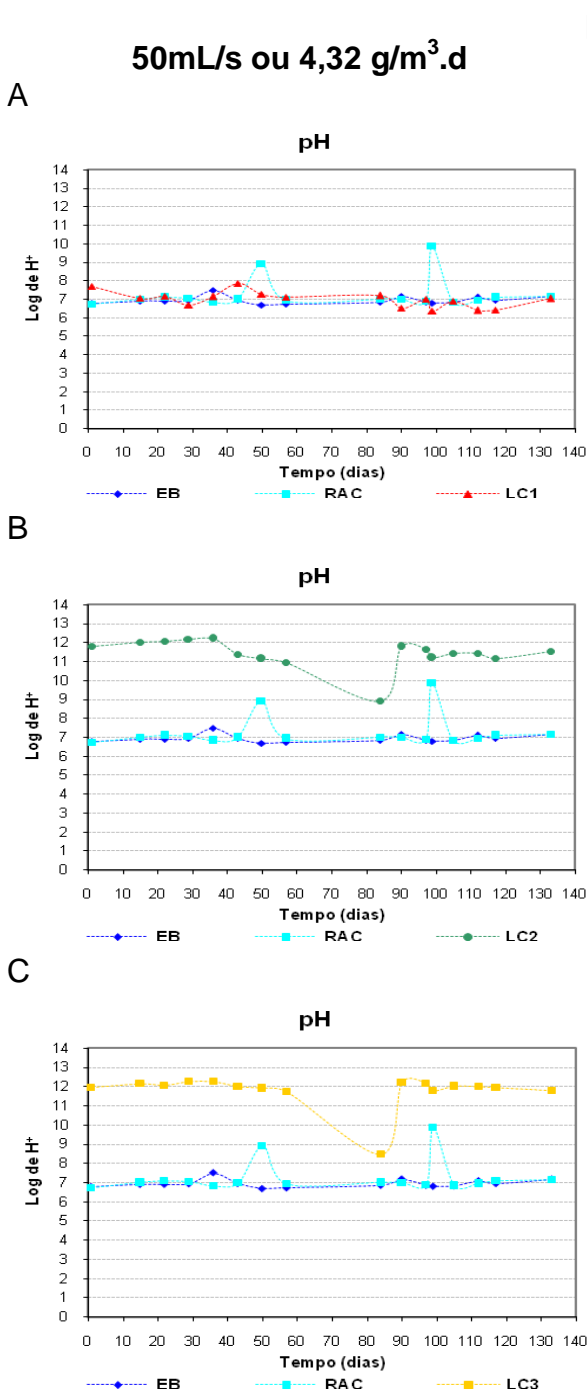


Figura 96 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro pH no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

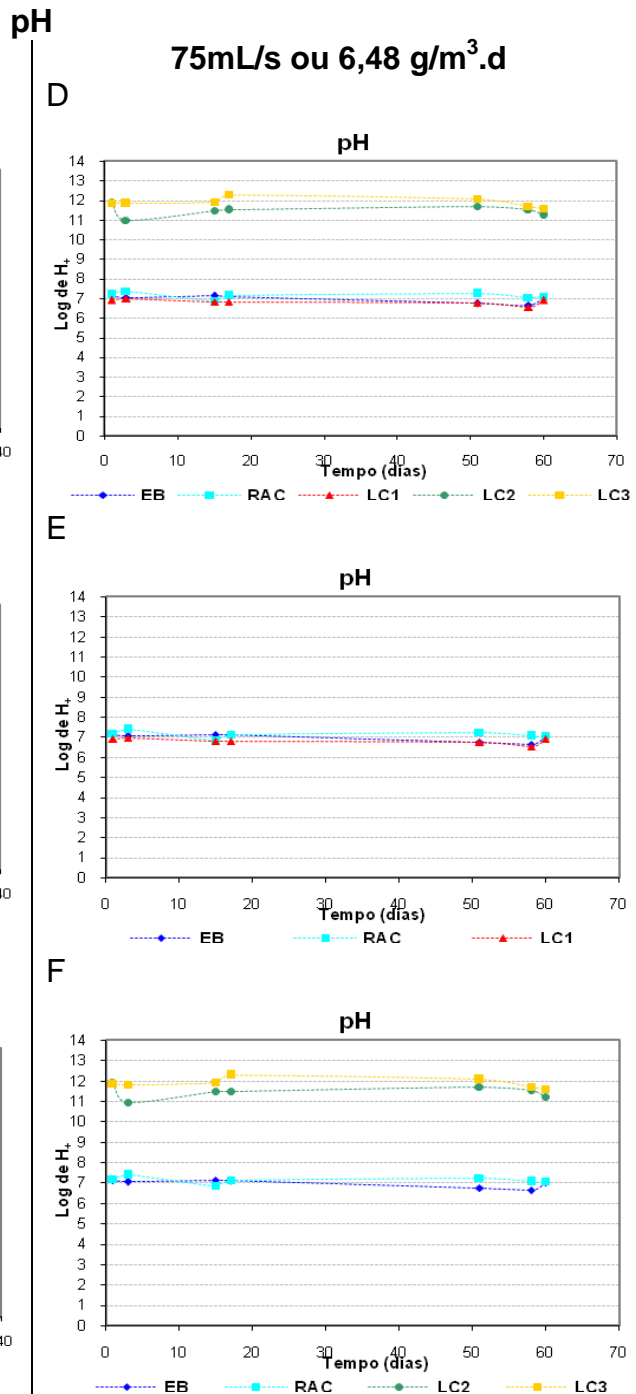


Figura 97 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro pH no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.



Turbidez

50mL/s ou 4,32 g/m<sup>3</sup>.d

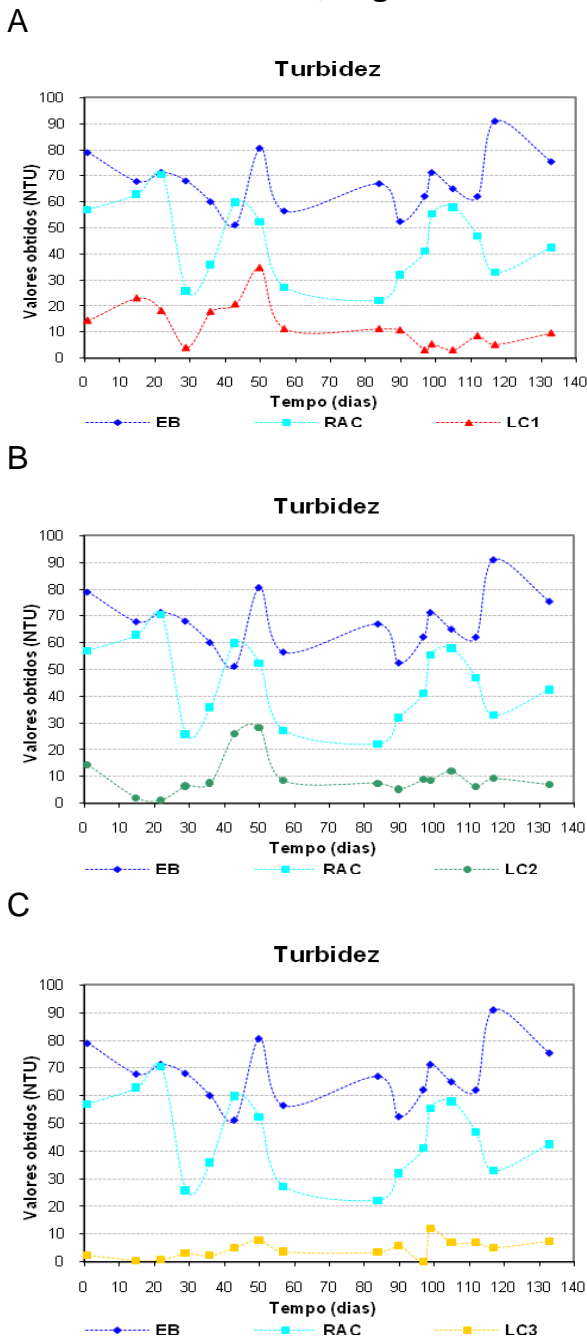


Figura 98 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro turbidez no período de março a agosto de 2007, com n=16, vazão de 50mL/s e TDH 19h.

75mL/s ou 6,48 g/m<sup>3</sup>.d

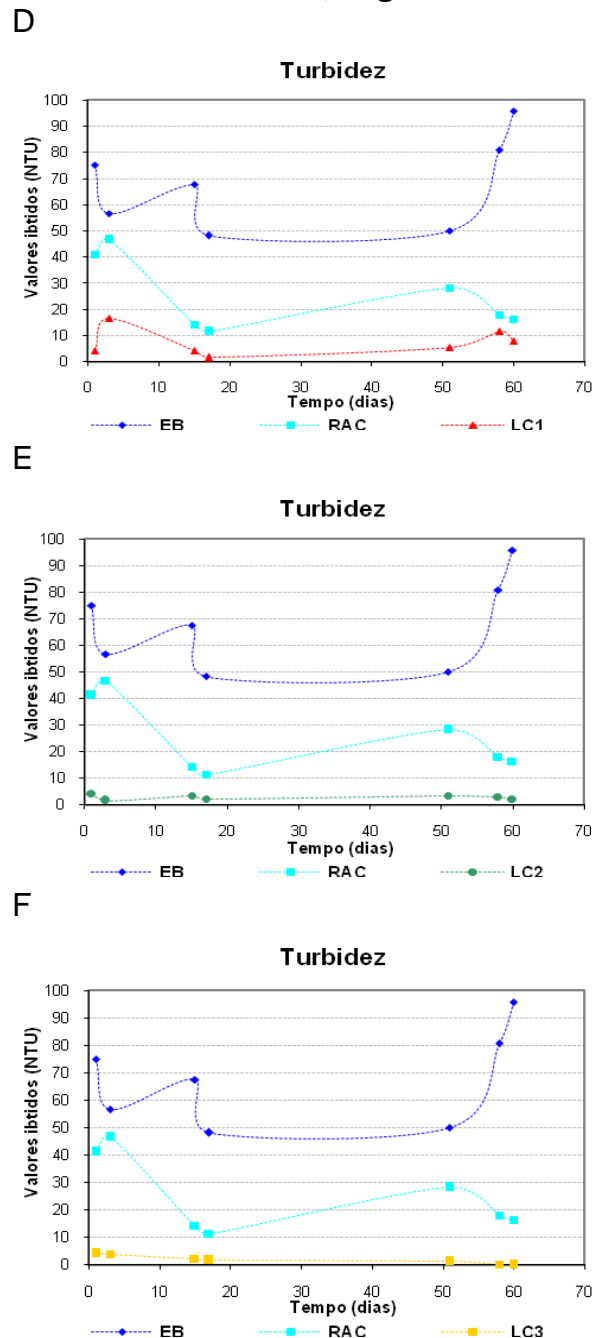


Figura 99 – Séries históricas parciais referentes ao parâmetro turbidez no período de janeiro a março de 2008, com n= 7, vazão de 75mL/s e TDH 12,5h.

## ANEXO F

Carga superficial aplicada em relação à eficiência dos leitos.

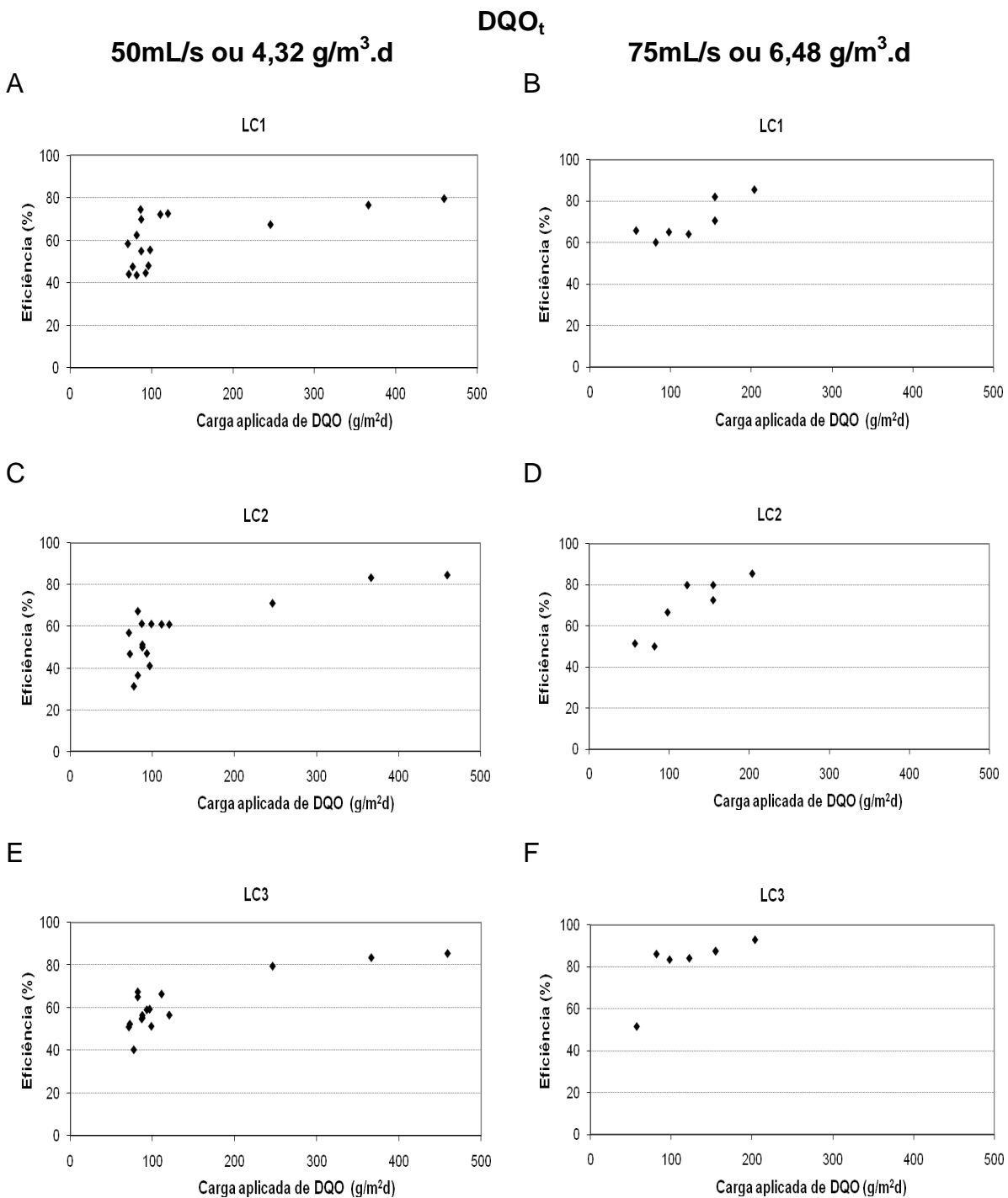


Figura 100 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro DQO<sub>t</sub> nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

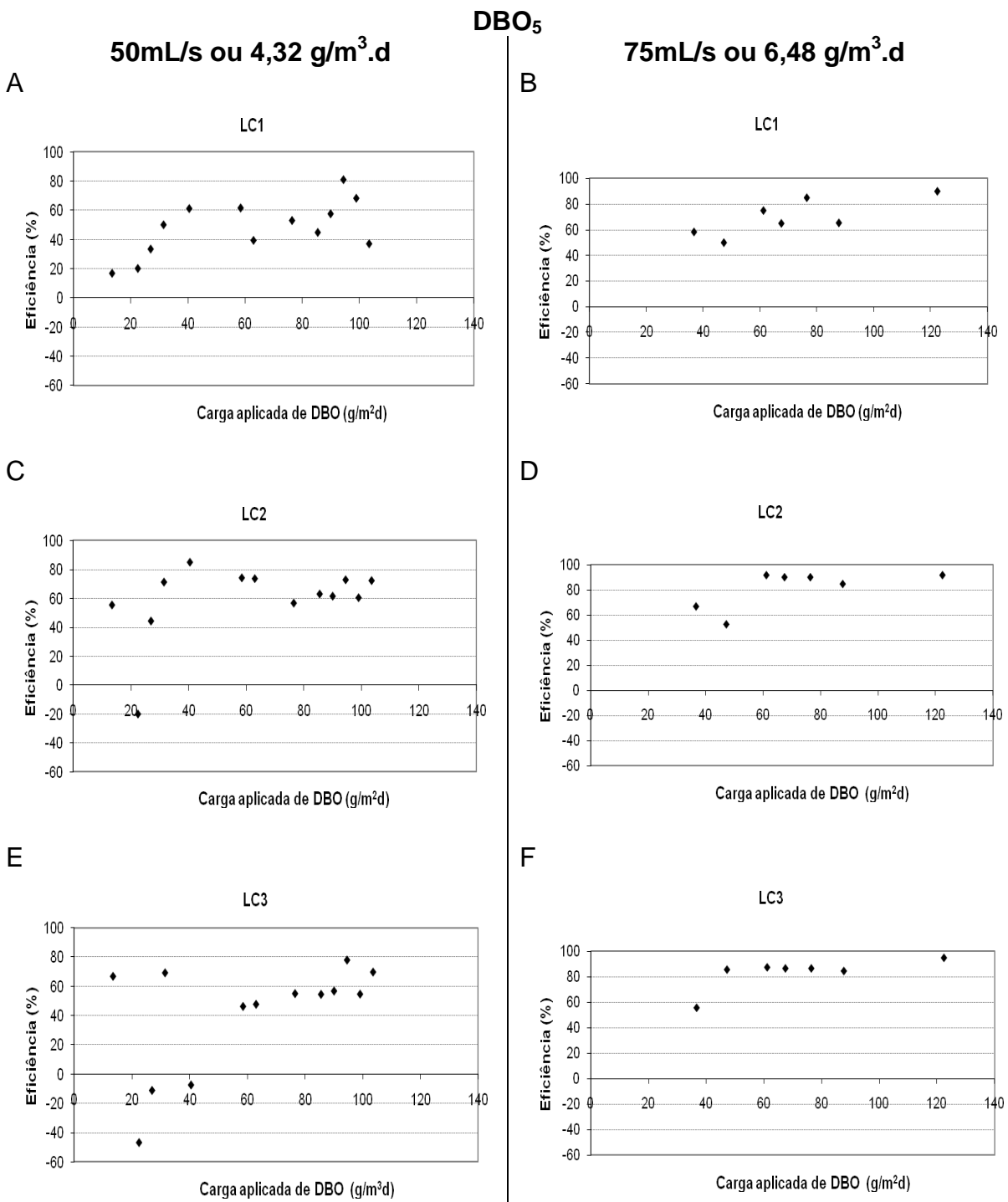


Figura 101 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro DBO<sub>5</sub> nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

NTK

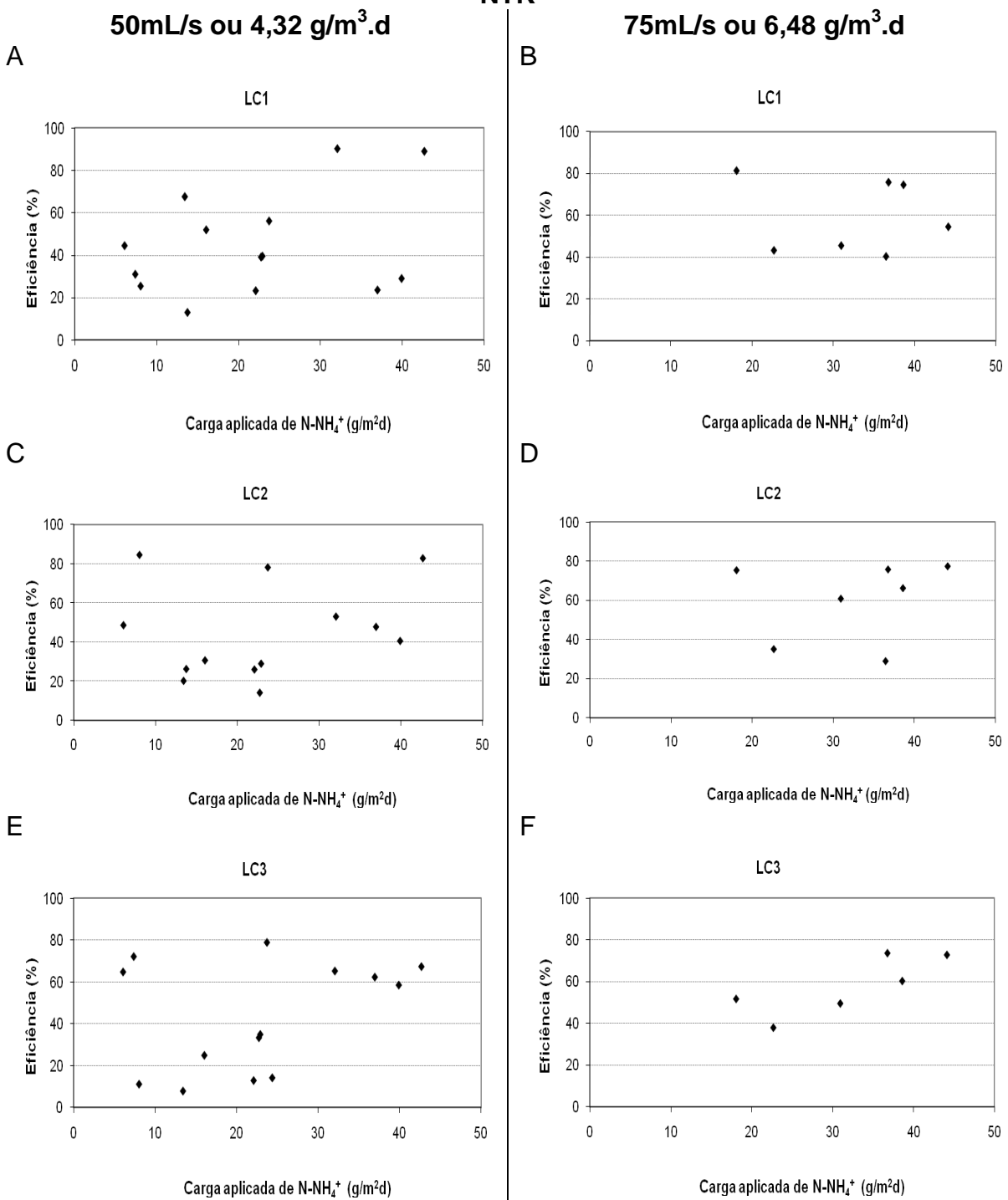


Figura 102 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro NTK nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

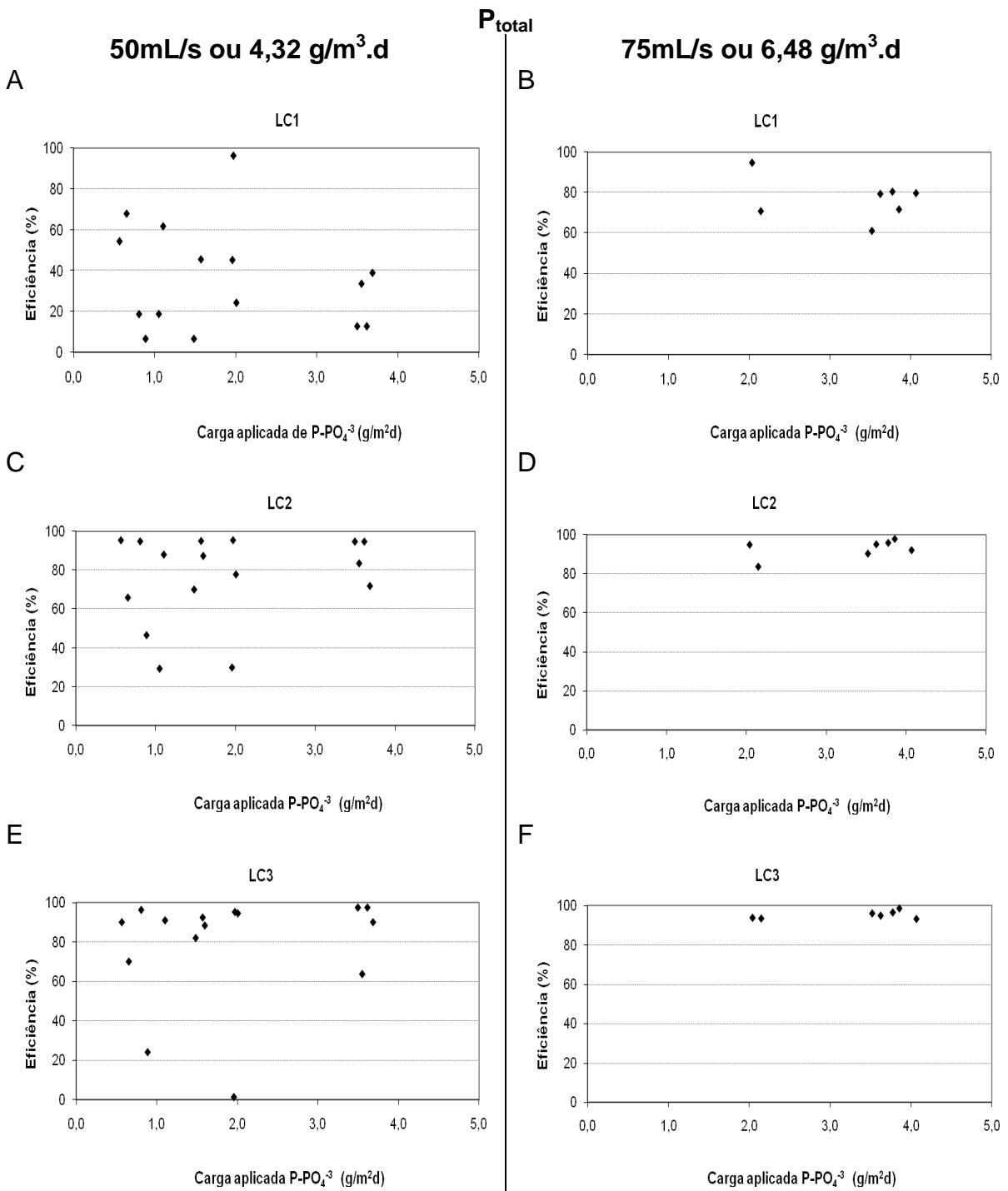


Figura 103 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro  $P_{total}$  nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

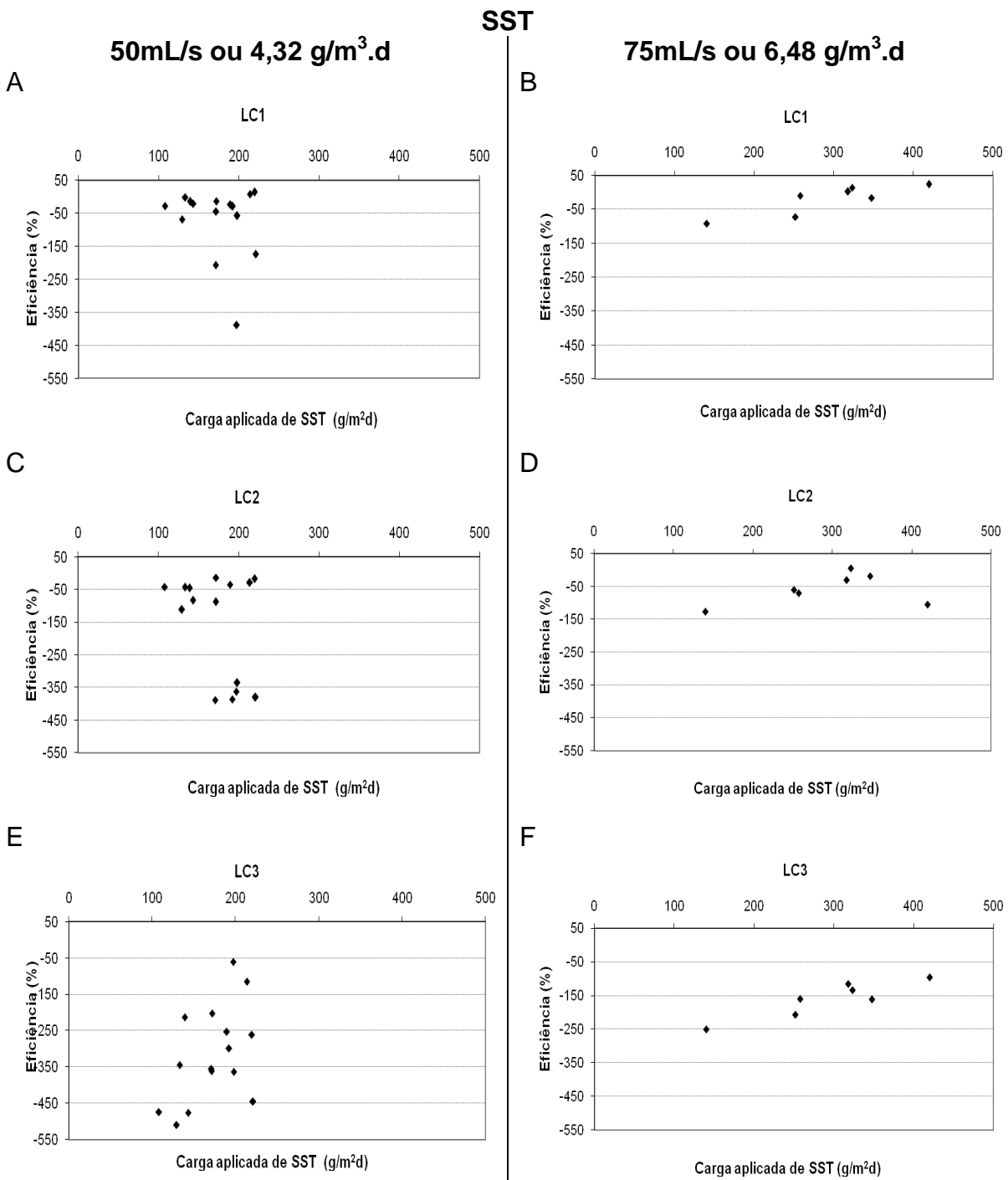


Figura 104 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SST nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

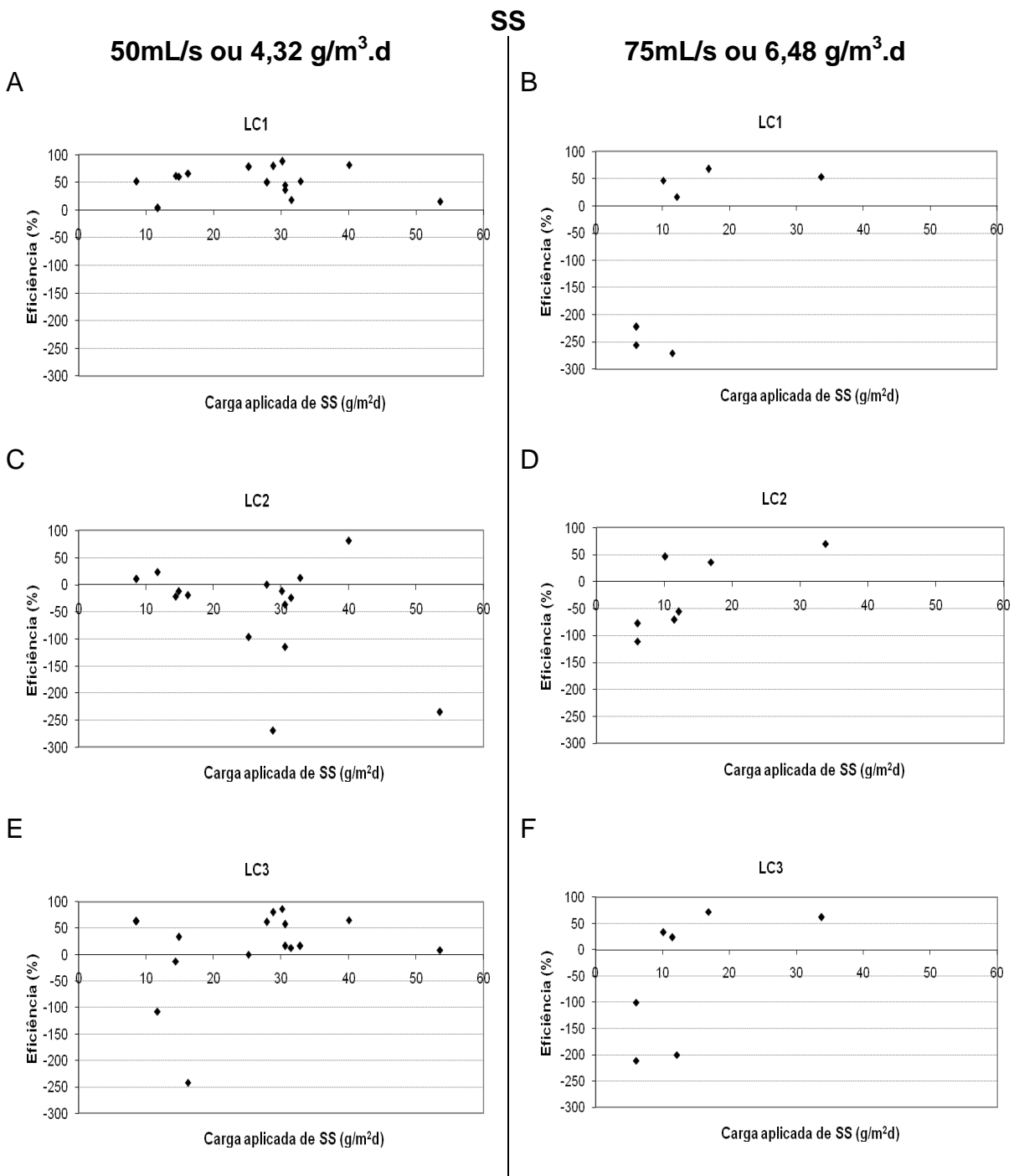


Figura 105 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SS nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).

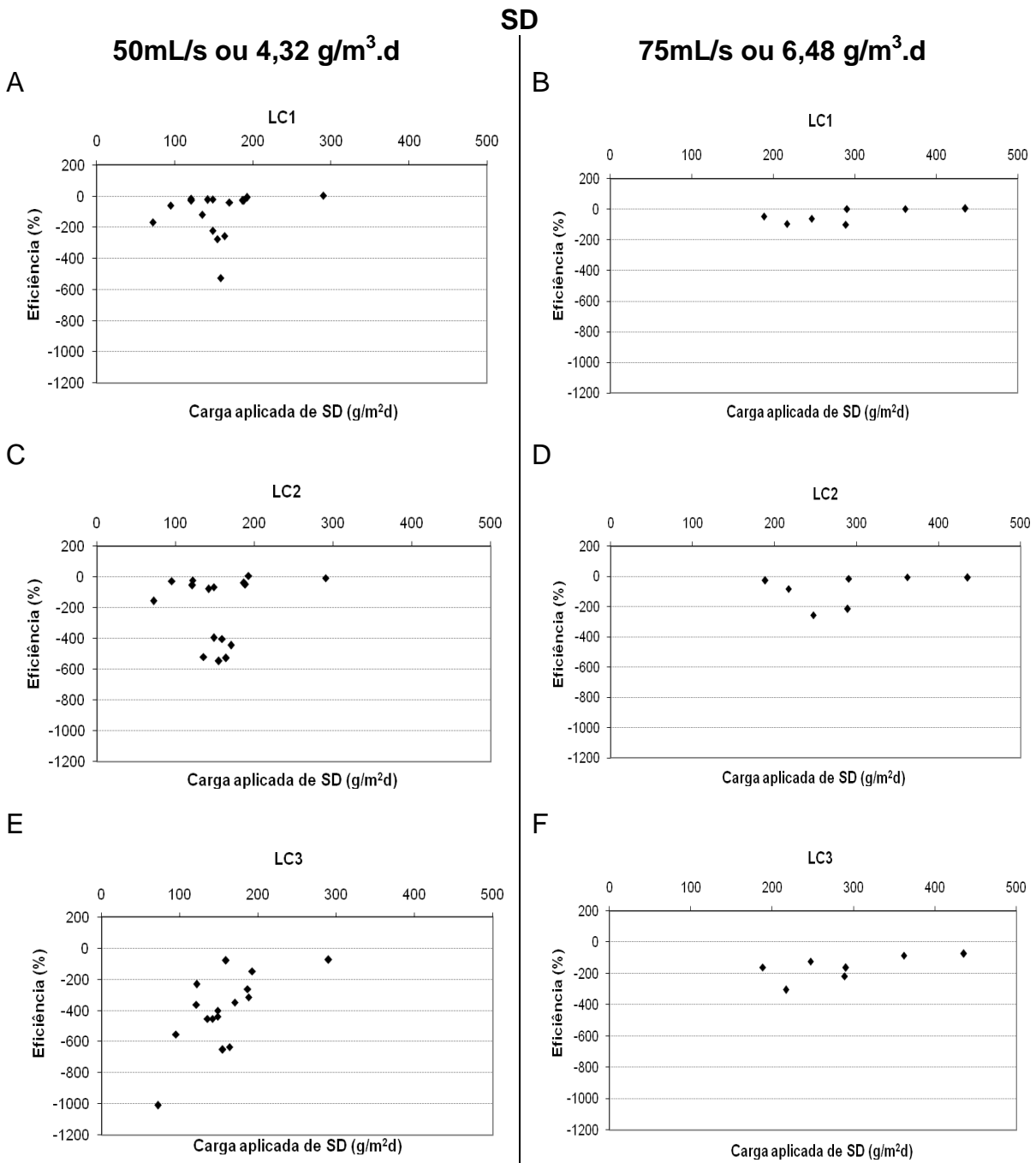


Figura 106 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro SD nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).



Dureza

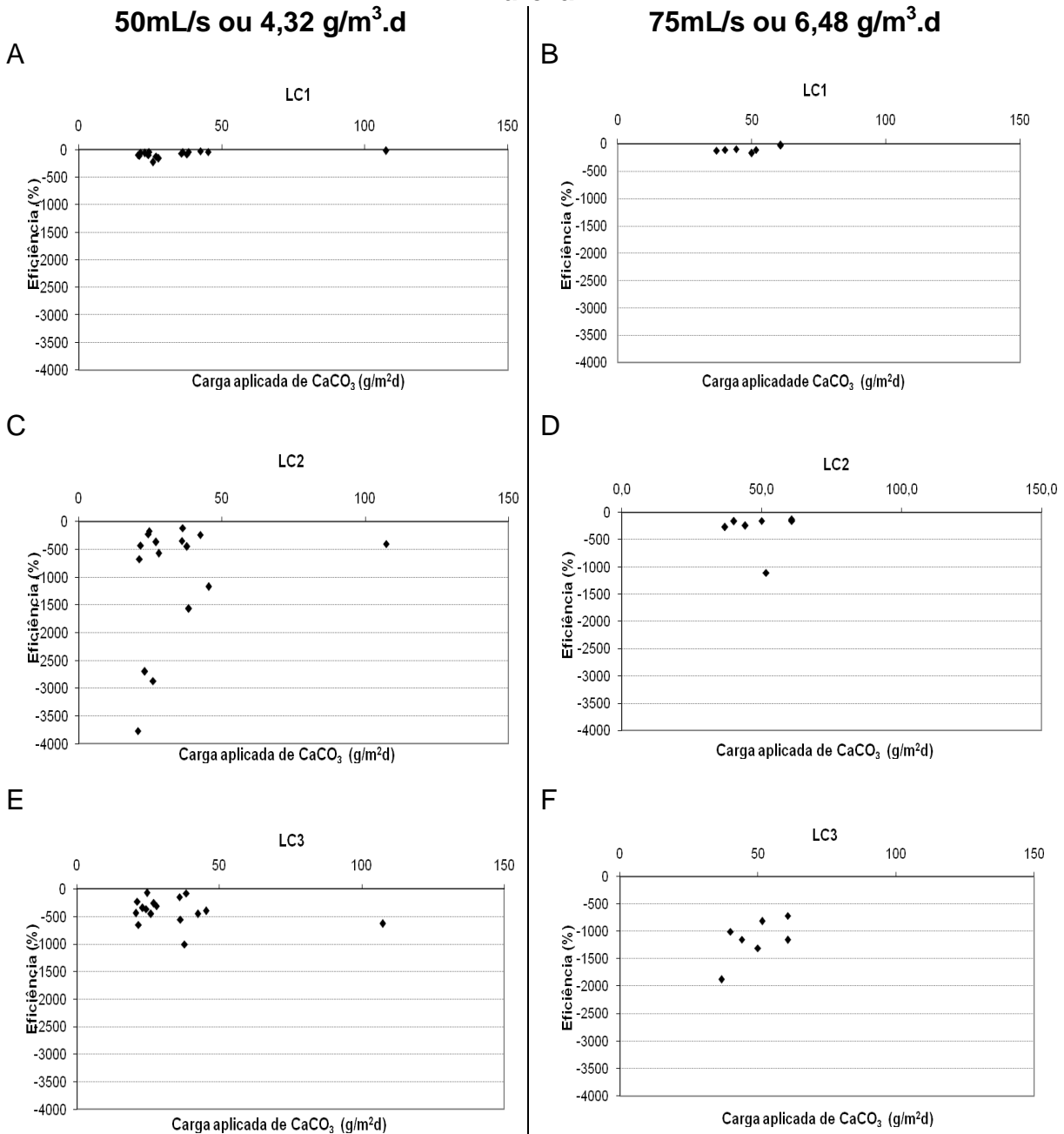


Figura 107 – Análise da variabilidade das eficiências para o parâmetro dureza nas distintas composições dos leitos de acordo com as cargas superficiais aplicadas. A saber: LC1 (brita + areia + vegetação), LC2 (escória de aciaria + areia + vegetação) e LC3 (escória de aciaria).