

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL**

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS
ETAPAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS COM ELEVADAS
CONCENTRAÇÕES DE ALGAS.**

OLGA MARIA TREFZGER DE MELLO

ORIENTADORA: CRISTINA CELIA SILVEIRA BRANDÃO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO EM TECNOLOGIA AMBIENTAL E
RECURSOS HÍDRICOS**

PUBLICAÇÃO: MTARH.DM – 012A/98

BRASÍLIA / DF : AGOSTO - 1998

UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA CIVIL

**AVALIAÇÃO DO DESEMPENHO DA FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS
ETAPAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS COM ELEVADAS
CONCENTRAÇÕES DE ALGAS.**

OLGA MARIA TREFZGER DE MELLO

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO SUBMETIDA AO DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA CIVIL DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE
DE BRASÍLIA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA
OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE.**

APROVADA POR:

PROFA. Cristina Celia Silveira Brandão, PhD (ENC-UnB)
(ORIENTADORA)

PROF. Ricardo Silveira Bernardes, PhD (ENC - UnB)
(EXAMINADOR INTERNO)

PROF. Luiz Di Bernardo, DSc (EESC-USP)
(EXAMINADOR EXTERNO)

DATA: BRASÍLIA / DF, 31 DE AGOSTO DE 1998.

FICHA CATALOGRÁFICA

MELLO, OLGA MARIA TREFZGER DE

Avaliação do desempenho da Filtração em Múltiplas Etapas no tratamento de águas com elevadas concentrações de algas [Distrito Federal] 1998.

xx, 136p., 210 x 297mm (ENC/FT/UnB, M.Sc, Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, 1998)

Dissertação de Mestrado - Universidade de Brasília. Faculdade de Tecnologia.

Departamento de Engenharia Civil.

1. Filtração em Múltiplas Etapas

2. Pré-tratamento

3. Remoção de algas

4. Taxa de filtração

I. ENC/FT/UnB

II. Título (série)

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

MELLO, O. M T. (1998). Avaliação do Desempenho da Filtração em Múltiplas Etapas no Tratamento de Águas com Elevadas Concentrações de Algas. Dissertação de Mestrado, Publicação MTARH.DM-012A/98, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, DF, 136p.

CESSÃO DE DIREITOS

NOME DO AUTOR: Olga Maria Trefzger de Mello

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: Avaliação do Desempenho da Filtração em Múltiplas Etapas no Tratamento de Águas com Elevadas Concentrações de Algas.

GRAU: Mestre

ANO: 1998

É concedida à Universidade de Brasília permissão para reproduzir cópias desta dissertação de mestrado e para emprestar ou vender tais cópias somente para propósitos acadêmicos e científicos. A autora reserva outros direitos de publicação e nenhuma parte desta dissertação de mestrado pode ser reproduzida sem autorização por escrito do autor.

Olga Maria Trefzger de Mello
Rua Brás Cubas, nº 21, Vila Carvalho
CEP 79005-280 Campo Grande - MS - BRASIL

AGRADECIMENTOS

À professora Cristina pela orientação, motivação e apoio durante o desenvolvimento deste trabalho. Ao professor Sérgio Koide pela paciência e disposição em resolver os problemas operacionais da Estação. Ao professor Ricardo Bernardes pelos conselhos sempre oportunos. Aos demais professores do MTARH pelos conhecimentos transmitidos durante o curso.

Aos professores da Universidade Federal de Viçosa: Rafael e José Mauro pelas cartas de recomendação.

À Giovana Wiecheteck pelo profissionalismo, dedicação, incentivo e apoio na realização deste trabalho.

Ao “seu Bispo” pela dedicação e profissionalismo na montagem da ETA-piloto.

Aos funcionários do Laboratório de Análise de Águas: André e “Boy” pelo auxílio na realização dos ensaios.

À Mônica Nobre, pela realização dos ensaios de determinação de biomassa algal.

Ao apoio financeiro do Programa de Pesquisa em Saneamento Básico-PROSAB, particularmente à CAPES pela concessão de bolsa durante o desenvolvimento dessa pesquisa.

Aos colegas: André, Antônio Carlos, “Carramaschi”, Carlos Eduardo, Ercília, Harada, Maria do Carmo, Mauro, Patrícia, “PC”, Raquel, Regina e Renato pela agradável convivência.

Aos amigos:

“Cacá”, Elton, “Gigio”, “Jama”, “Luzi”, Maurício, “Rubão”, Tadeu e “Waldeco”
pelos momentos felizes

Almir, Llíam, Bruno, Daniel, Bárbara e “Barney” pelo apoio, incentivo e acolhida
carinhosa em Brasília.

Cleverson, pela dedicação, carinho, incentivo e compreensão nos
momentos ausentes.

“Dona Lia e my brodinhos” pelo exemplo, incentivo e amizade.

RESUMO

Esse trabalho apresenta uma avaliação do desempenho de um sistema de Filtração em Múltiplas Etapas (FiME), em escala piloto, no tratamento da água do Lago Paranoá (Brasília, DF) que apresenta elevadas concentrações de algas, com predominância de uma cianofícea filamentosa, a *Cylindrospermopsi raciborskii*.

A FiME é uma seqüência de tratamento que envolve pré-filtração em pedregulho e filtração lenta. Esse sistema tem sido testado com freqüência no tratamento de águas com alta turbidez e tem se mostrado eficiente ampliando, dessa forma, a aplicação da filtração lenta às águas com qualidade inferior. Instalações em escala real têm comprovado as eficiências observadas nos estudos piloto. Entretanto, esse sistema não foi testado para água com problemas de algas.

A instalação piloto FiME constitui-se de uma unidade de pré-filtração dinâmica, duas unidades de pré-filtração ascendente em camadas com composição granulométricas diferenciadas e duas unidades de filtração lenta. Adotou-se uma taxa de filtração de 36 m³/m².d no pré-filtro dinâmico, 12 e 18 m³/m².dia nos pré-filtros ascendentes e 3 m³/m².d nos filtros lentos. O arranjo da instalação permitiu não só avaliar o potencial dessa tecnologia de tratamento quando voltada para a remoção de algas, como também a influência da composição granulométrica e da taxa de filtração na unidade de pré-filtração ascendente.

O desempenho de cada unidade da seqüência de tratamento, e do sistema como um todo, foi avaliada a partir de dados de qualidade da água, particularmente teores de clorofila-a e turbidez, e do desenvolvimento da perda de carga em algumas unidades. A água bruta apresentou, durante esse período, turbidez variando de 3,7 a 19,7 uT e teores médios de clorofila-a da ordem de 30 µg/l.

Os resultados obtidos sugerem que o sistema de FiME é bastante eficiente no tratamento de águas com elevadas concentrações de algas, produzindo, nessas condições, efluentes com teores de clorofila-a abaixo de 1µg/l e com turbidez consistentemente menores que 1 uT.

O pré-filtro ascendente dotado de camada de topo com granulometria mais fina mostrou-se mais eficiente, tanto na remoção de turbidez quanto na remoção de clorofila-a, sendo que esse melhor desempenho foi mais acentuado quando se tratou da remoção de clorofila-a.

O aumento da taxa de filtração nos pré-filtros ascendentes resultaram na diminuição da eficiência dos mesmos, destacando-se que o impacto maior foi observado na performance do pré-filtro ascendente mais fino e na remoção de clorofila-a.

A eficiência do pré-tratamento não alterou significativamente a eficiência de remoção de impureza nos filtros lentos mas influenciou no desenvolvimento da perda de carga desses e consequentemente na duração da carreira de filtração.

ABSTRACT

This work presents an evaluation of the performance of a multistage filtration system (MSF), in pilot scale, for the treatment of Paranoá Lake water (Brasília, Brazil), which presents high concentrations of algae, with predominance of a filamentous cyanoficea, the *Cylindrospermopsis raciborskii*.

The MSF is a treatment sequence which involves both gravel roughing filtration and slow sand filtration. This system has shown to be able to treat efficiently high turbidity waters (up to 100 NTU) and to extend the application of the slow sand filtration to waters of less ideal quality. Real scale installations has presented similar efficiency to pilot scale studies. However, this system has not been tested on reservoir or lake waters with high concentrations of algae.

The pilot installation comprises a dynamic roughing filter, two upflow filters, with different granular media composition, and two slow sand filtration units. A filtration rate of $36 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{day}$ was applied to the dynamic roughing filter, $12 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{day}$ and $18 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{day}$ to the upflow filters and $3 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{day}$ to the slow sand filters. The installation arrangement allows to evaluate the potential of this technology for algae removal, as well as the influence of granular media composition and filtration rate on the performance of the upflow roughing filter units.

The performance of each unit, and the system as a whole, was evaluated based on water quality data, mainly chlorophyll-a and turbidity, and head-loss development on specific units. During the experimental work the raw water presented a turbidity varying from 3,7 to 19,7 NTU, and an average value of chlorophyll-a of $33,7 \mu\text{g/l}$.

The results obtained indicate that the MSF system is very efficient for treatment of waters with high concentrations of algae, producing effluents with concentrations of chlorophyll-a and turbidity lower than $1\mu\text{g/l}$ and 1NTU, respectively.

The upflow filter with the finer upper layer was more efficient to remove both turbidity and chlorophyll-a, with a better performance for the latter parameter.

The increase in filtration rate in the upflow filters resulted in a decrease of its performance, with a meaningful impact on the efficiency of the finer upper layer filter and on the removal of chlorophyll-a.

The efficiency of pre-treatment did not influence significantly the efficiency of contaminant removal by the slow sand filters, but affected the head-loss development and, consequently, the filtration run time.

ÍNDICE

1 – INTRODUÇÃO	1
2 – OBJETIVOS	3
3 – REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	4
3.1 – FILTRAÇÃO LENTA	4
3.1.1 – Histórico	4
3.1.2 – Descrição da unidade de filtração lenta	5
3.1.3 – O processo de purificação e a remoção de matéria orgânica	7
3.1.4 – Limitações de aplicabilidade	10
3.2 – FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FiME)	12
3.2.1 – Pré-filtros dinâmicos	15
3.2.2 – Pré-filtros de pedregulhos com escoamento horizontal	18
3.2.3 – Pré-filtros de pedregulhos com escoamento descendente	21
3.2.4 – Pré-filtros de pedregulhos com escoamento ascendente	23
3.2.5 – Aspectos econômicos	32
3.2.6 – Limitações da Filtração em Múltiplas Etapas	32
3.3 – IMPORTÂNCIA DA REMOÇÃO DE ALGAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS	35
4 – METODOLOGIA	40
4.1 – MONTAGEM DA ETA-PILOTO	42
4.2 – DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO	44
4.2.1 – Sistema de captação	44
4.2.2 – Pré-filtro dinâmico (PFD)	46
4.2.3 – Pré-filtros ascendentes (PFA-1 e PFA-2)	49
4.2.4 – Filtros lentos (FL-1 e FL-2)	52
4.3 – DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL	54
5 – RESULTADOS E DISCUSSÃO	58
5.1 – INTRODUÇÃO	58
5.2 – CONDIÇÕES TESTADAS	58
5.3 – PRIMEIRA CARREIRA DE FILTRAÇÃO	59
5.4 – SEGUNDA CARREIRA DE FILTRAÇÃO	69

5.5 – TERCEIRA CARREIRA DE FILTRAÇÃO	80
5.6 – DEMAIS PARÂMETROS MEDIDOS	90
5.6.1 – Temperatura	90
5.6.2 – pH	91
5.6.3 – Condutividade	92
5.6.4 – Alcalinidade e dureza	92
5.6.5 – Ferro total	93
5.6.6 – Nutrientes	93
5.6.7 – Cor verdadeira	94
5.6.8 – Demanda Química de Oxigênio	95
5.6.9 – Coliformes totais e fecais	95
5.7 – ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O COMPORTAMENTO DO SISTEMA DURANTE A 2 ^A E 3 ^A CARREIRAS DE FILTRAÇÃO	96
5.7.1 – A qualidade da água bruta	96
5.7.2 – Análise comparativa entre as carreiras de filtração	98
5.7.3 – Quantificação de fitoplâncton	102
6 – CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES	106
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	109
APÊNDICES	
A – ESTATÍSTICA DESCRITIVA	114
A.1 – DADOS DE TURBIDEZ E CLOROFILA-a.	114
A.2 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DEMAIS PARÂMETROS MEDIDOS.	118
B – ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS	125
B.1 – DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS TESTES UTILIZADOS	125
B.1.1 – Testes de hipóteses	125
B.1.2 – Análise de variância	126
B.1.3 – Comparação entre médias pelo Teste de Tukey	127
B.2 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE TUKEY	128
B.3 – TESTE KOLMOGOROV-SMIRNOV	130
C – DESCRIÇÃO RESUMIDA DA QUANTIFICAÇÃO DE FITOPLÂNCTON	134

LISTA DE TABELAS

Tabela 3.1 – Parâmetros de projeto de diferentes variações da filtração utilizadas no tratamento de água.	6
Tabela 3.2 – Qualidade da água recomendável para tratamento por filtração lenta.	10
Tabela 3.3 – Parâmetros de projeto de pré-filtro dinâmico.	17
Tabela 3.4 – Remoção de algas pelo pré-filtro com escoamento horizontal.	20
Tabela 3.5 – Principais parâmetros de projeto sugeridos por Wegelin para o pré-filtro de pedregulho com escoamento horizontal.	21
Tabela 3.6 – Resumo dos principais trabalhos realizados na EESC-USP sobre pré-filtração em pedregulho com escoamento ascendente.	25
Tabela 3.7 – Eficiências de remoções para os diferentes pré-filtros de pedregulho.	27
Tabela 3.8 – Volume total de água requerido para limpeza dos diferentes pré-filtros de pedregulho.	28
Tabela 3.9 – Tempo requerido para as diferentes atividades nas limpezas semanais dos diferentes pré-filtros de pedregulho.	28
Tabela 3.10 – Tempo requerido para as diferentes atividades nas limpezas mensais dos diferentes pré-filtros de pedregulho.	28
Tabela 3.11 – Parâmetros de projeto para pré-filtros de pedregulho com escoamento ascendente.	31
Tabela 3.12 – Custos de implantação dos diferentes componentes de uma instalação FiME no Vale do Rio Cauca na Colômbia (agosto de 1996).	32
Tabela 3.13 – Algas que causam problemas na água de abastecimento.	37
Tabela 4.1 – Composição granulométrica do pré-filtro dinâmico.	46
Tabela 4.2 – Composição granulométrica dos pré-filtros ascendentes (PFA-1 e PFA-2).	49
Tabela 4.3 – Composição granulométrica dos filtros lentos (FL-1 e FL-2).	53
Tabela 4.4 – Parâmetros de qualidade da água que foram medidos, as frequências de amostragem e os métodos e equipamentos utilizados.	56
Tabela 5.1 – Taxas de filtração adotadas para a primeira carreira de filtração.	58
Tabela 5.2 – Taxas de filtração para as diferentes unidades do sistema adotadas durante a 2ª e a 3ª carreiras de filtração.	59

Tabela 5.3 – Taxa de filtração, tempo de funcionamento e perda de carga atingida pelas diferentes unidades componentes do sistema durante a 1ª carreira de filtração.	60
Tabela 5.4 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 1ª carreira de filtração.	63
Tabela 5.5 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez obtidos nos filtros lentos 1 e 2 durante a 1ª carreira de filtração.	67
Tabela 5.6 – Taxa de filtração, tempo de funcionamento e perda de carga atingida por cada unidade componente durante a 2ª carreira de filtração.	69
Tabela 5.7 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.	74
Tabela 5.8 – Valores médios e máximos de eficiências de remoção obtidos nos filtros lentos 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.	78
Tabela 5.9 – Taxa de filtração, tempo de funcionamento e perda de carga atingida por cada unidade componente do sistema durante a 3ª carreira de filtração.	80
Tabela 5.10 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 3ª carreira de filtração.	84
Tabela 5.11 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos filtros lentos 1 e 2 durante a 3ª carreira de filtração.	89
Tabela 5.12 – Temperaturas médias da água bruta e dos efluentes das unidades componentes do sistema durante as três carreiras de filtração.	91
Tabela 5.13 – Valores médios do pH da água bruta e dos efluentes das unidades componentes do sistema durante as três carreiras de filtração	91
Tabela 5.14 – Valores médios de condutividade na água bruta e no efluente de cada unidade obtidos durante a 2ª e 3ª carreiras de filtração.	92
Tabela 5.15 – Valores de alcalinidade média na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.	92

Tabela 5.16 – Valores médios de dureza na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.	93
Tabela 5.17 – Teores médios de ferro na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.	93
Tabela 5.18 – Teores médios de fósforo total na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	94
Tabela 5.19 – Teores médios de nitrato e de nitrogênio amoniacal presentes na água bruta e no efluente de cada unidade obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	94
Tabela 5.20 – Valores de cor verdadeira obtidos nas determinações realizadas durante a 3ª carreira de filtração.	95
Tabela 5.21 – Valores médios da DQO da água bruta e do efluente de cada unidade do sistema obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	95
Tabela 5.22 – Análise de Variância aplicada aos valores de turbidez da água bruta durante as três carreiras de filtração.	97
Tabela 5.23 – Análise de Variância aplicada aos teores de clorofila-a da água bruta durante as três carreiras de filtração.	97
Tabela 5.24 – Resumo do comportamento das unidades componentes do sistema durante a 1ª carreira de filtração.	98
Tabela 5.25 – Resumo do comportamento das unidades componentes do sistema durante a 2ª carreira de filtração.	99
Tabela 5.26 – Resumo do comportamento das unidades componentes do sistema durante a 3ª carreira de filtração.	99
Tabela 5.27 – Valores médios de biomassa de Algas Filamentosas obtidos na água bruta e nos efluentes de cada unidade do sistema e suas respectivas eficiências de remoção.	103
Tabela 5.28 – Valores médios de biomassa de Algas Não Filamentosas obtidos na água bruta e nos efluentes de cada unidade do sistema.	103
Tabela A.1 – Estatística descritiva dos dados de turbidez (primeira carreira de filtração).	114
Tabela A.2 – Estatística descritiva dos dados de turbidez (segunda carreira de filtração).	114
Tabela A.3 – Estatística descritiva dos dados de turbidez (terceira carreira de filtração).	115

Tabela A.4 – Estatística descritiva dos dados de remoção de turbidez (primeira carreira de filtração).	115
Tabela A.5 – Estatística descritiva dos dados de remoção de turbidez (segunda carreira de filtração).	115
Tabela A.6 – Estatística descritiva dos dados de remoção de turbidez (terceira carreira de filtração).	116
Tabela A.7 – Estatística descritiva dos dados de clorofila-a (primeira carreira de filtração)	116
Tabela A.8 – Estatística descritiva dos dados de clorofila-a (segunda carreira de filtração).	116
Tabela A.9 – Estatística descritiva dos dados de clorofila-a (terceira carreira de filtração).	117
Tabela A.10 – Estatística descritiva dos dados de remoção de clorofila-a (primeira carreira de filtração).	117
Tabela A.11 – Estatística descritiva dos dados de remoção de clorofila-a (segunda carreira de filtração).	117
Tabela A.12 – Estatística descritiva dos dados de remoção de clorofila-a (terceira carreira de filtração).	118
Tabela A.13 – Estatística descritiva dos valores de temperatura (primeira carreira de filtração).	118
Tabela A.14 – Estatística descritiva dos valores de temperatura (segunda carreira de filtração).	119
Tabela A.15 – Estatística descritiva dos valores de temperatura (terceira carreira de filtração).	119
Tabela A.16 – Estatística descritiva dos valores de pH (primeira carreira de filtração).	119
Tabela A.17 – Estatística descritiva dos valores de pH (segunda carreira de filtração).	120
Tabela A.18 – Estatística descritiva dos valores de pH (terceira carreira de filtração).	120
Tabela A.19 – Estatística descritiva dos valores de condutividade (segunda carreira de filtração).	118
Tabela A.20 – Estatística descritiva dos valores de condutividade (terceira carreira de filtração).	121

Tabela A.21 – Estatística descritiva dos valores de alcalinidade (segunda carreira de filtração).	121
Tabela A.22 – Estatística descritiva dos valores de dureza (segunda carreira de filtração).	121
Tabela A.23 – Estatística descritiva dos valores de ferro total (segunda carreira de filtração).	122
Tabela A.24 – Estatística descritiva dos valores de fósforo total (terceira carreira de filtração).	122
Tabela A.25 – Estatística descritiva dos valores de nitrato (terceira carreira de filtração).	122
Tabela A.26 – Estatística descritiva dos valores de nitrogênio amoniacal (terceira carreira de filtração).	123
Tabela A.27 – Valores de cor verdadeira obtidos nas determinações realizadas durante a 3 ^a carreira de filtração.	123
Tabela A.28 – Valores de DQO (Demanda Química de Oxigênio) obtidos durante a terceira de filtração.	123
Tabela A.29 – Coliformes Totais encontrados nas determinações realizadas durante a Segunda carreira de filtração.	124
Tabela A.30 – Coliformes Totais encontrados nas determinações realizadas durante a terceira carreira de filtração.	124
Tabela B.1 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de turbidez da água bruta obtidos nas três carreiras de filtração	128
Tabela B.2 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos teores de clorofila-a da água bruta obtidos nas três carreiras de filtração	128
Tabela B.3 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFD durante a 2 ^a e 3 ^a carreiras de filtração	128
Tabela B.4 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFD durante a 2 ^a e 3 ^a carreiras de filtração.	129

Tabela B.5 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFA-1 durante a 2 ^a e 3 ^a carreiras de filtração	129
Tabela B.6 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFA-1 durante a 2 ^a e 3 ^a carreiras de filtração.	129
Tabela B.7 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFA-2 durante a 2 ^a e 3 ^a carreiras de filtração.	129
Tabela B.8 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFA-2 durante a 2 ^a e 3 ^a carreiras de filtração.	129
Tabela B.9 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFA-1 e do PFA-2 durante as três carreiras de filtração.	130
Tabela B.10 – Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFA-1 e do PFA-2 durante as três carreiras de filtração.	130
Tabela B.11 – Valores críticos de D_2 , para o nível de significância de 5% para diversos tamanhos de amostras.	132
Tabela B.12 – Resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de turbidez e clorofila-a da água bruta obtidos durante as três carreiras de filtração.	132
Tabela B.13 – Resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de eficiência de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidos no PFD, PFA-1 e PFA-2 durante a segunda carreira de filtração.	133
Tabela B.13 – Resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de eficiência de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidos no PFD, PFA-1 e PFA-2 durante a terceira carreira de filtração.	133
Tabela C.1 – Exemplo de planilha de quantificação de fitoplâncton.	136

LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 – Esquema de uma unidade de filtração lenta (Visscher <i>et al.</i> ,1992).	6
Figura 3.2 – Esquema geral da instalação FiME (Galvis <i>et al.</i> , 1998).	12
Figura 3.3 – Esquema de uma unidade de pré-filtração dinâmica (Galvis <i>et al.</i> , 1997).	15
Figura 3.4 – Esquema de uma unidade de pré-filtração horizontal (Wegelin, 1991).	18
Figura 3.5 – Esquema de uma unidade de pré-filtração descendente em série (Wegelin, 1991).	22
Figura 3.6 – Corte esquemático de um pré-filtro ascendente em camadas (Visscher <i>et al.</i> ,1996).	23
Figura 3.7 – Esquema de um pré-filtro ascendente em série (Visscher <i>et al.</i> ,1996).	24
Figura 4.1 – Localização da unidade piloto.	40
Figura 4.2 – Arranjo físico da unidade piloto.	41
Figura 4.3 – Visão geral da instalação piloto.	42
Figura 4.4 – Detalhes da instalação hidráulica dos pré-filtros ascendentes.	43
Figura 4.5 – Esquema do sistema de captação da água no Lago Paranoá (unidades em metros).	45
Figura 4.6 – Detalhe das derivações do “manifold.”	45
Figura 4.7 – Pré-filtro dinâmico: dimensões (em metros) e principais detalhes.	46
Figura 4.8 – Esquema da disposição da tubulação de drenagem de fundo do pré-filtro dinâmico (dimensões em metro).	47
Figura 4.9 – Vista do pré-filtro dinâmico e caixa de distribuição para os pré-filtros com escoamento ascendente.	48
Figura 4.10 – Esquema dos pré-filtros ascendentes (unidade em metros).	49
Figura 4.11 – Tubo para coleta de amostras do pré-filtro ascendente (dimensões em mm).	50
Figura 4.12 – Caixas de distribuição e quadro piezométrico dos pré-filtros ascendentes.	51
Figura 4.13 – Esquema das unidades de filtração lenta (unidades em metros).	52
Figura 4.14 – Curva de distribuição granulométrica da areia.	53
Figura 4.15 – Quadro piezométrico das unidades de filtração lenta.	54

Figura 5.1 – Valores de turbidez afluente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 1ª carreira de filtração.	60
Figura 5.2 – Teores de clorofila-a afluente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 1ª carreira de filtração.	61
Figura 5.3 – Valores de turbidez afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 1ª carreira de filtração.	62
Figura 5.4 – Teores de clorofila-a afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração.	62
Figura 5.5 – Diferença entre os valores de turbidez e clorofila-a afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração.	64
Figura 5.6 – Evolução da perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a 1ª carreira de filtração.	65
Figura 5.7 – Valores de turbidez afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração.	66
Figura 5.8 – Teores de clorofila-a afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração.	66
Figura 5.9 – Perda de carga nos filtros lentos durante a 1ª carreira de filtração.	67
Figura 5.10 – Teores de clorofila-a da água bruta e dos efluentes das diferentes unidades componentes do sistema durante a 1ª carreira de filtração.	69
Figura 5.11 – Valores de turbidez afluente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 2ª carreira de filtração.	70
Figura 5.12 – Teores de clorofila-a afluente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 2ª carreira de filtração.	71
Figura 5.13 – Eficiências de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidas no pré-filtro dinâmico durante a 2ª carreira de filtração.	72
Figura 5.14 – Valores de turbidez afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 2ª carreira de filtração.	72
Figura 5.15 – Teores de clorofila-a afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.	73
Figura 5.16.a – Eficiência de remoção de turbidez dos pré-filtros ascendentes na 2ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.	75

Figura 5.16.b – Eficiência de remoção de clorofila-a dos pré-filtros ascendentes na 2ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.	75
Figura 5.17 – Perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a 2ª carreira de filtração.	76
Figura 5.18 – Valores de turbidez afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.	77
Figura 5.19 – Teores de clorofila-a afluente e efluente dos filtros lentos durante a 2ª carreira de filtração.	78
Figura 5.20 – Perda de carga nos filtros lentos durante a 2ª carreira de filtração.	79
Figura 5.21 – Teores de clorofila-a da água bruta e dos efluentes de cada unidade componente do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.	80
Figura 5.22 – Valores de turbidez afluente e efluente do pré-filtro dinâmico durante a 3ª carreira de filtração.	81
Figura 5.23 – Teores de clorofila-a afluente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	82
Figura 5.24 – Eficiências de remoção de turbidez e de clorofila-a do pré-filtro dinâmico obtidas durante a 3ª carreira de filtração.	82
Figura 5.25 – Valores de turbidez afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	83
Figura 5.26 – Teores de clorofila-a afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	84
Figura 5.27.a – Eficiências de remoção de turbidez dos pré-filtros ascendentes na 3ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.	85
Figura 5.27.b – Eficiências de remoção de clorofila-a dos pré-filtros ascendentes na 3ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.	86
Figura 5.28 – Perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a 3ª carreira de filtração.	87
Figura 5.29 – Valores de turbidez afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	87
Figura 5.30 – Teores de clorofila-a afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.	88

Figura 5.31 – Evolução da perda de carga nos filtros lentos durante a 3 ^a carreira de filtração.	89
Figura 5.32 – Teores de clorofila-a afluente e efluente das diversas unidades do sistema durante a 3 ^a carreira de filtração.	90
Figura 5.33 – Eficiência de remoção média de turbidez e clorofila-a no sistema de pré-tratamento.	100
Figura 5.34 – Valores obtidos de biomassa algal <i>versus</i> teores de clorofila-a.	103
Figura 5.35 – Aspecto da água bruta.	104
Figura 5.36 – Aspecto do efluente do pré-filtro dinâmico.	104
Figura 5.37 – Aspecto do efluente do pré-filtro ascendente 2.	105
Figura 5.38 – Aspecto do efluente do filtro lento 2.	105
Figura B.1 – Exemplo gráfico da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de eficiência de remoção de turbidez obtidos pelo PFA-2 durante a 3 ^a carreira de filtração.	131

LISTA DE SÍMBOLOS, NOMENCLATURA E ABREVIACÕES

AB.....	Água bruta
ABES.....	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental
ASSEMAE.....	Associação Nacional dos Serviços Municipais de Água e Esgoto
cm.....	Centímetro
°C.....	Graus Celsius
CINARA.....	Centro Inter-Regional de Abastecimento y Remoción de Agua
CAESB.....	Companhia de Água e Esgotos de Brasília
CETESB.....	Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental – São Paulo
CO ₂	Gás carbônico
CaCO ₃	Carbonato de Cálcio
d.....	Dia
DQO.....	Demanda Química de Oxigênio
ETA.....	Estação de tratamento de água
Fe.....	Ferro
FiME.....	Filtração em Múltiplas Etapas
FL.....	Filtro lento
GL.....	Graus de Liberdade
H ₀	Hipótese de nulidade
H ₁	Hipótese alternativa
IRC.....	International Water and Sanitation Centre
K.....	Número de tratamentos
L.....	Litro
l.....	Litro
m.....	Metro
Mm.....	Milímetro
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mg.....	Miligrama
Mn.....	Manganês

ml.....	Milímetro
µg.....	Micrograma
NMP.....	Número mais provável
N.....	Nitrogênio
NH ₃ -N.....	Nitrogênio-amoniaco
NO ₃ -N.....	Nitrogênio-nitrato
µm.....	Micrômetro
µS.....	Microsiemens
O ₂	Oxigênio
PO ₄ ⁻³	Fosfato
P.....	Fósforo
PFA.....	Pré-filtro de pedregulho com escoamento ascendente
PFH.....	Pré-filtro de pedregulho com escoamento horizontal
PFD.....	Pré-filtro dinâmico
PFAC.....	Pré-filtro de pedregulho com escoamento ascendente em camadas
PFAS.....	Pré-filtro de pedregulho com escoamento ascendente em série
pH.....	Potencial hidrogeniônico
QM.....	Quadrado médio
SQ.....	Soma dos quadrados
uC.....	Unidade de cor
UPA.....	Unidade padrão de área
uT.....	Unidades de turbidez
uH.....	Unidade Hazen
UFC.....	Unidades formadoras de colônias

1 - INTRODUÇÃO

A questão do tratamento de água assume importância fundamental diante do quadro epidemiológico-sanitário do País. As doenças de veiculação hídrica são responsáveis por um alto número de contágios e morte, principalmente entre a população infantil, constituindo-se em uma ameaça à saúde pública.

Segundo o XVII Catálogo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental (ABES, 1994), em 1992, 33,3% da população brasileira não era beneficiada por serviços de abastecimento de água, sendo que, em algumas regiões, o índice de atendimento era inferior a 50%. Além disso, nem toda população atendida recebia água sanitariamente segura. A insuficiência de investimento no setor de saneamento faz com que esse quadro continue sendo um retrato da situação atual do país.

Na prática do tratamento de água, pode-se dividir as tecnologias de tratamento em dois grupos básicos, um que faz uso da coagulação química e outro que prescinde dessa etapa. Entretanto, seja qual for a tecnologia, o processo de filtração é parte integrante do sistema de tratamento. Quando a coagulação química faz-se necessária, normalmente utilizam-se os chamados filtros rápidos, ao passo que, quando a coagulação é dispensável, adota-se o filtro lento. A filtração lenta tem sido usada no tratamento de água desde o começo do século XIX.

O sistema de filtração lenta oferece diversas vantagens no que se refere ao tratamento de água: (i) é de simples construção e operação (dispensa o uso de coagulantes e da retro-lavagens); (ii) não requer mão-de-obra especializada; (iii) o consumo de energia para operação do sistema é baixo; (iv) é um sistema confiável e produz água de boa qualidade, sendo particularmente eficiente na remoção de bactérias, vírus e cistos de *Giardia*. Entretanto, a filtração lenta necessita grandes áreas para sua instalação, o que praticamente inviabiliza a sua adoção quando se trata do abastecimento de água de grandes centros urbanos, que demandam grandes vazões.

Dessa forma a filtração lenta é considerada como sendo um sistema simples, de baixo custo e confiável, sendo recomendada para o atendimento de comunidades rurais e de cidades de pequeno e médio porte, principalmente em países em desenvolvimento (EPA, 1992; Kawamura, 1991, Visscher *et al.*, 1996, Clarke *et al.*, 1996). A principal limitação da filtração lenta convencional é sua utilização restrita a águas que apresentam valores de cor verdadeira e turbidez relativamente baixos (Galvis, *et al.*, 1998, Di Bernardo, 1993).

A cor verdadeira está relacionada à presença na água de substâncias dissolvidas ou coloidais que não são passíveis de separação da água através de processo unicamente físicos. Dessa forma, a filtração lenta não é capaz de remover eficientemente cor verdadeira. A presença, em quantidades significativas, de turbidez mineral (argila, silte) e/ou algas na água afluenta aos

filtros lentos, pode levar a problemas operacionais, uma vez que se observa a rápida obstrução dos vazios intergranulares das camadas superiores do leito filtrante e a redução drástica da carreira de filtração.

Nas últimas décadas, diversos trabalhos de pesquisa, vêm sendo desenvolvidos com o objetivo de se ampliar a utilização da filtração lenta para águas de qualidades inferiores e ao mesmo tempo, manter a característica de simplicidade operacional do sistema. Nessa linha, vem sendo estudada a adoção de etapas de pré-tratamento, destacando-se o uso da pré-filtração dinâmica e da pré-filtração em pedregulho e areia grossa, seja essa última de escoamento horizontal ou vertical (ascendente ou descendente). Esses sistemas de pré-tratamento, usados de forma individual ou combinada, têm se mostrado capazes de ampliar a aplicação da filtração lenta a águas com valores de turbidez da ordem de 100 uT, além de serem capazes de absorver “picos” de até 700 uT (Cleasby, 1991, Galvis *et al.*, 1992, Di Bernardo, 1993; Clarke *et al.* 1996, Visscher *et al.*, 1996). A tecnologia de tratamento composta por unidades de pré-filtração em pedregulho seguidos de filtração lenta têm sido denominados “Filtração em Múltiplas Etapas”.

Os estudos desenvolvidos em sistemas de Filtração em Múltiplas Etapas-FiME mostram a potencialidade de aplicação desse sistema no tratamento de águas superficiais sujeitas a variação de turbidez. Entretanto, os pré-filtros citados acima não foram amplamente avaliados para tratamento de águas de reservatórios e lagos sujeitos à florescimento de algas. Os poucos estudos relativos à eficiência de filtros de pedregulhos na remoção de algas (Di Bernardo e Rocha, 1990, Saidam e Butler, 1996) apresentam resultados promissores.

A filtração lenta, em função das vantagens citadas acima, e, particularmente, pela sua elevada eficiência de remoção de organismos patogênicos, apresenta-se como uma tecnologia bastante apropriada para a realidade sócio-econômica de diversas regiões do Brasil. Sendo importante ressaltar que, segundo a Associação Nacional dos Serviços Municipais de Água e Esgoto (ASSEMAE, 1996) 87,2% dos municípios brasileiros possuem população inferior a 20 mil habitantes, reforçando a potencialidade de utilização dessa tecnologia no País.

Contraditoriamente, pouco uso se tem feito dessa tecnologia nas últimas décadas. As razões desse abandono são as mais diversas, passando pela questão das limitações do uso da filtração lenta em função da deterioração da qualidade das águas dos corpos d’água, até um certo modismo pela adoção de tecnologias mais sofisticadas. Porém, independentemente das razões, existe no País a necessidade de racionalizar a utilização dos recursos financeiros disponíveis para o setor de saneamento com a adoção de tecnologias simples e eficazes, como é o caso da filtração lenta no tratamento de água para abastecimento público.

2 - OBJETIVOS

O objetivo principal desta pesquisa é estudar a aplicabilidade do sistema de Filtração em Múltiplas Etapas (pré-filtro dinâmico, pré-filtro com escoamento ascendente em camadas e filtro lento) no tratamento de águas com elevadas concentrações de algas.

Procurar-se-á, através de ensaios experimentais, avaliar, a performance do sistema de tratamento, com particular atenção para o papel da pré-filtração. Será avaliada, também, de forma preliminar, a influência da granulometria e da taxa de aplicação na eficiência dos pré-filtros ascendentes, considerando-se a especificidade do problema da presença de algas na água afluyente.

3 - REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 - FILTRAÇÃO LENTA

3.1.1 - Histórico

É remota a utilização de sistemas de tratamento que se valem dos benefícios da passagem da água através de meios granulares como forma de tratamento da água para o consumo humano. Há relatos que os primeiros filtros foram construídos no início do século XIX por John Gibb em Presley (Escócia) e por James Simpson em Londres (Inglaterra), este último projetou e construiu um sistema de filtração lenta para a “Chelsea Water Company”. Nessa época, acreditava-se que esses filtros serviam apenas para remover impurezas da água através de um processo natural de peneiramento, produzindo uma água sem cor, turbidez e sabor, não se conhecendo os mecanismos e processos envolvidos (Bresaola, 1990).

Embora não se cogitasse que a transmissão de doenças se desse através de bactérias, já acreditava-se (com base nos estudos de John Snow sobre transmissão de cólera) na existência de “*materies morbi*,” um material derivado dos doentes, que poderia transmitir a infecção para pessoas que ingerissem água contaminada. Supunha-se que filtração removia a “*materies morbi*” junto com os sólidos contidos na água. Dessa forma, em torno de 1852, estabeleceu-se em Londres, através do “Metropolis Water Act,” que “toda água tomada do rio Tâmisa, na distância de até 8 quilômetros da Catedral de São Paulo, deveria ser filtrada antes de ser distribuídas para consumo público” (Hespanhol, 1987).

Porém, por volta de 1870, quando os métodos de análise química da água passaram a ser utilizados para a verificação da eficiência da filtração, uma onda de decepção reduziu o entusiasmo dos construtores de filtros, ao constatarem que a purificação efetuada pelos leitos filtrantes era muito restrita, do ponto de vista físico e químico (Hespanhol, 1987, Bresaola, 1990, Di Bernardo, 1993).

Diversos autores (Hendricks e Bellamy, 1991; Di Bernardo, 1993, entre outros) relatam que, somente em 1892, a eficiência da filtração lenta foi de fato comprovada através da experiência vivida em duas cidades alemãs vizinhas, Hamburgo e Altona, que utilizavam a água do Rio Elba como fonte de abastecimento. Em Hamburgo, a água não era tratada enquanto em Altona a filtração lenta era usada como forma de tratamento da água. Segundo Hazen (1913, *apud* Hendricks e Bellamy, 1991), com a epidemia de cólera Hamburgo teve 26,31 casos de cólera (13,39 mortos) por cada 1.000 habitantes, ao passo que sua vizinha

Altona teve apenas 3,81 casos (2,13 mortes) por 1.000 habitantes.

No Brasil, um levantamento realizado por Hespanhol, em 1969, detectou a existência de 110 sistemas de tratamento de água para abastecimento público, projetados para operar com filtração lenta (Bresaola, 1990). Desse total, 79 encontravam-se em operação, 8 em obras e os 23 restantes ainda estavam em fase de projeto. A ASSEMAE (1996) registrou, em 1995, que a filtração lenta era adotada como tecnologia de tratamento de água em 14% dos sistemas administrados por Municípios ou pela Fundação Nacional de Saúde (FNS). De acordo com Di Bernardo (1993), a maioria das instalações construídas até a década de 60 foi reformada e transformada em sistemas de tratamento completo, com coagulação química e filtração rápida. Isso ocorreu, principalmente, devido à degradação da qualidade da água de muitos mananciais.

Com o desenvolvimento da pré-filtração, como alternativa para melhorar a qualidade da água afluente aos filtros lentos, esse tipo de tratamento pode voltar a ser a solução mais apropriada para o tratamento de água em algumas regiões do Brasil. A filtração lenta precedida da pré-filtração, já vem sendo estudada e empregada em muitas estações de tratamento, principalmente na Colômbia, Peru, Tanzânia, Tailândia, Índia, China. Nos países europeus, por vezes, a filtração lenta constitui uma etapa final de tratamento em estações mais complexas.

3.1.2 - Descrição da unidade de filtração lenta

Um filtro lento consiste, basicamente, de um tanque com um meio filtrante composto de areia fina, de diâmetro efetivo entre 0,2 a 0,3 mm e profundidade variando entre 0,5 a 0,8m, colocada sobre uma camada suporte constituída de pedregulho (Visscher *et al.*, 1996). A camada suporte situa-se sobre um sistema de drenagem de fundo que pode ser composto, por exemplo, por tubos perfurados. A Figura 3.1 mostra uma unidade de filtração lenta.

Figura 3.1 - Esquema de uma unidade de filtração lenta (Visscher *et al.*, 1992)

Na Tabela 3.1 são mostrados alguns parâmetros de projeto sugeridos para sistemas de filtração lenta, filtração direta e dupla filtração, com o objetivo de salientar as diferenças básicas existentes entre a filtração lenta e estas outras modalidades de filtração.

Tabela 3.1 - Parâmetros de projeto de diferentes variações da filtração utilizadas no tratamento de água.

Parâmetros de projeto		Filtração	Filtração Direta		Dupla Filtração	
		Lenta	Descendente	Ascendente	Filtro Ascen	Filtro Desc.
Taxa de filtração (m ³ /m ² .d)		1,0 – 7,2	< 600	120 – 150	200 – 300	200 - 300
Duração da carreira de filtração		1 - 6 m	1 - 4 d	1 - 4 d	1 - 4 d	1 - 4 d
Meio filtrante	Espessura da camada (m)	0,6 – 0,9	1,0 - 1,5	2,0 - 2,5	1,2 - 1,6	0,6 - 0,7
	Diâmetro efetivo (mm)	0,2 – 0,3	1,0 - 1,3	0,7 - 0,8	0,9 - 1,2	0,45 - 0,55
	Coef. de desuniformidade	1,5 – 3,0	<1,2	<2,0		

Fontes: Visscher *et al.*, 1996 e Di Bernardo, 1993 (modificado).

3.1.3 - O processo de purificação e a remoção de matéria orgânica

A remoção de impurezas na filtração lenta tem sido considerada como resultante da combinação de ações distintas: transporte, aderência e atividade biológica.

A filtração lenta em si é um processo de tratamento de água que não requer o uso de produtos químicos, de equipamentos sofisticados para seu controle, tampouco de mão de obra especializada para sua operação. A inexistência, na filtração lenta, das etapas de mistura rápida, floculação e decantação (etapas constituintes do sistema convencional) permite, de um modo geral, a produção de água com custos mais baixos devido à redução tanto de investimentos iniciais como, principalmente, do custo operacional (Di Bernardo, 1993, Galvis *et al.*, 1997).

Os filtros lentos trabalham com taxas de filtração baixa e usam granulometria fina. O uso de baixas taxas de filtração levam a um maior tempo de detenção da água sobre o leito filtrante e no seu interior, permitindo o desenvolvimento, na interface água - leito filtrante, de uma camada composta por organismos biológicos e detritos, a chamada “schmutzdecke”. Nessa condição, a purificação da água no filtro lento é resultado da combinação da atividade biológica com a retenção física das partículas. Assim, tanto os mecanismos físicos (transporte e aderência) como os biológicos são importantes para o bom desempenho do processo.

Os mecanismos de transporte, que fazem as partículas em suspensão aproximarem-se dos grãos do meio filtrante, são os mesmos que atuam nos filtros rápidos e são eles: ação física de coar, sedimentação, difusão, impacto inercial, interceptação e ação hidrodinâmica. O mecanismo de transporte predominante na superfície da camada filtrante nos filtros lentos é a ação física de coar enquanto que, no seu interior, predominam os mecanismos de interceptação, sedimentação e difusão (Haarhoff e Cleasby, 1991).

Para Haarhoff e Cleasby (1991), o mistério da eficácia dos mecanismos físico-químicos na filtração lenta está na razão pela qual as partículas aderem-se ao grão filtrante após serem transportadas para a proximidade dos mesmos. A razão de tal mistério reside no fato de que em sendo as partículas de impurezas presente na água geralmente eletro-negativas, a tendência natural seria que elas fossem repelidas pelos grãos de areia que também apresentam cargas superficiais eletro-negativas, o que de fato não ocorre. A maioria dos trabalhos que discutem a questão dos mecanismos de aderência no filtro lento sugerem a adsorção como o principal responsável pela adesão de partículas finas ao meio filtrante, e associam a eficiência da adsorção ao grau de amadurecimento biológico do filtro. Haarhoff e Cleasby (1991) apresentam uma boa discussão sobre as principais hipóteses propostas para

explicação da aderência nos filtros lentos.

A ação mais importante que ocorre na filtração lenta é, sem dúvida, a atividade biológica. Essa atividade se desenvolve na superfície da camada de areia, onde há a formação do “schmutzdecke,” e nos primeiros 30 a 50 cm de profundidade da camada filtrante (Di Bernardo, 1991).

O “schmutzdecke,” também conhecida como superfície de coesão, é uma camada biológica constituída de matéria orgânica, grande variedade de organismos (bactérias, plânctons, diatomáceas, algas, rotíferos e protozoários) e partículas inertes. Quando há a presença de ferro e manganês em estado solúvel na água bruta, pode ocorrer a formação dos precipitados desses metais, os quais acabam tomando parte, também, na formação do “schmutzdecke” (Di Bernardo, 1993). A formação do “schmutzdecke” pode levar alguns dias ou até semanas. Esse intervalo de tempo é denominado de período de amadurecimento de um filtro lento.

Segundo Vargas (1992), na superfície de coesão, a matéria orgânica biodegradável é oxidada bioquimicamente, assim como as algas mortas e algumas bactérias contidas originalmente na água. Uma fração considerável de partículas inertes (turbidez mineral) é retida nessa camada pela ação de coar e pela adsorção.

No meio filtrante, abaixo da superfície de coesão, os grãos de areia, durante o processo de amadurecimento do filtro, são gradativamente revestidos com uma película com composição similar ao “schmutzdecke”, entretanto com menor concentração de algas e partículas, e maior conteúdo de microrganismos (bactérias, bacteriófagos, rotíferos, protozoários, *etc.*). Nessa região, a matéria orgânica é degradada e assimilada pelo material celular que, por sua vez, é assimilado por outros microrganismos e convertidos, finalmente, em gás carbônico, água, nitratos e fosfatos, ocorrendo assim a mineralização (Vargas, 1992; Di Bernardo, 1993; Hespanhol, 1987).

A atividade biológica no filtro lento é complexa e segundo Haarhoff e Cleasby (1991) envolve, além dos aspectos citados anteriormente, a predação, a “saprofagia” e a inativação ou morte de organismos.

A remoção de bactéria patogênicas e vírus no filtro lento é atribuída a vários fatores. Segundo Hespanhol (1987), as bactérias patogênicas (normalmente habitantes do intestino humano) encontram no filtro lento um ambiente desfavorável para sua proliferação. Tais bactérias não têm condições de se multiplicar em temperaturas inferiores a 30° C, além do meio não dispor de matéria orgânica de origem animal para satisfazer suas necessidades metabólicas. De acordo com Haarhoff e Cleasby (1991) 98% dos vírus são inativados ao

entrarem no meio filtrante. O efeito da luz do sol (UV) e a predação também podem contribuir para a remoção de microrganismos patogênicos em sistemas de filtração lenta. Para Wheeler *et al.* (1988) os três fatores que mais contribuem para a remoção de vírus nos filtros lentos são a predação microbiana, a adsorção no biofilme e a absorção pelas superfícies não biológicas.

Segundo Hendricks e Bellamy (1991) os filtros lentos são bastante efetivos na remoção de microrganismos. Os autores reportam eficiências de remoção de coliformes totais superiores a 99% para filtros maduros e de menores que 60 % para filtros "novos" e eficiências de remoção de cistos de *Giardia* de 99,991 a 99,981 % em filtros operados com taxas de filtração de 0,96, 2,88 e 9,60 m³/m².dia. De acordo com esses autores o desempenho dos filtros lentos na remoção de microrganismos depende de fatores como a taxa de filtração, temperatura, profundidade do meio filtrante, tamanho dos grãos da areia, maturidade do meio filtrante, entre outros.

Visscher *et al.* (1992) sugerem que, para aumentar o poder de "desinfecção" de um filtro lento, deve-se adotar uma areia com granulometria mais fina e taxas de filtração menores, com o ônus de se diminuir a duração da carreira de filtração. Por outro lado, Wheeler *et al.*(1996) observaram que reduções na eficiência de remoção de microrganismos patogênicos causadas pela adoção de taxas de filtração mais altas podem ser mitigadas aumentando-se a profundidade do meio filtrante. Tais observações estão de acordo com os dados apresentados por Hendricks e Bellamy (1991), entretanto, esses autores ressaltam que a maturidade do meio filtrante é o fator que mais influencia no desempenho dos filtros lentos, com exceção à remoção de cistos de *Giardia* que apresenta-se alta mesmo com areia "nova".

Fogel *et al.* (1993) estudando remoção de *Cryptosporidium* em uma instalação em escala real, encontrou eficiência de remoção média de 48%. Os autores atribuíram a esse baixo desempenho ao fato da areia constituinte do meio filtrante das unidades terem coeficiente de uniformidade variando de 3,5 a 3,8, que excede o valor máximo recomendado para esse parâmetro pela literatura, que é em torno de 3,0. Segundo esses autores um tamanho médio dos poros maior provoca uma diminuição da capacidade de remoção biológica do filtro.

Mais recentemente, Timms *et al.* (1995) também realizaram experiências visando estabelecer a efetividade da filtração lenta na remoção de cistos de *Cryptosporidium*. Essas experiências foram motivadas pelo fato dos cistos do protozoário *Cryptosporidium parvum* serem resistentes à desinfecção por cloro. Esses pesquisadores utilizaram um filtro lento em escala piloto, e água do Rio Tamisa que havia sido pré-tratada em uma série de 3 pré-filtros de pedregulho com escoamento horizontal. Para taxas de filtração variando de 7,2 a 9,6

m³/m².dia, os autores observaram eficiências de remoção de pelo menos 99,997% em relação à concentração afluyente ao filtro lento (4 cisto de protozoário/litro), e concluíram que a filtração lenta é altamente eficiente para a remoção de cistos desses protozoário. Os autores observaram também, que todos os cistos ficaram retidos nos 2,5 centímetros iniciais do meio filtrante.

Apesar de conhecida e comprovada a alta capacidade da filtração lenta em remover patogênicos, o Documento Técnico nº 24 publicado pelo IRC e CINARA (Visscher *et. al.*, 1992) aconselha a utilização da cloração contínua do efluente do filtro lento, para prevenir uma possível produção de água sanitariamente insegura, particularmente quando a água bruta apresenta níveis altos de contaminação fecal.

No Brasil, a Portaria nº 36 do Ministério da Saúde (1990) limita a turbidez efluente aos sistemas de tratamento de água para consumo humano em 1 uT com objetivo de evitar que os microrganismos patogênicos se associem às partículas em suspensão comprometendo, assim, o processo de desinfecção. Porém, a adoção desse limite para sistemas de filtração lenta deve ser contestado visto que a filtração lenta pode ser considerada uma excelente unidade de remoção de microrganismos, de forma que, um efluente final com valor de coliformes totais inferior a 50 NMP/100 ml, pode ser convenientemente desinfetado, desde que a turbidez seja inferior a 5 uT (Di Bernardo, 1991).

3.1.4 - Limitações de aplicabilidade

Segundo Wegelin (1988) nenhum processo unitário de tratamento pode melhorar as qualidades físicas, químicas e bacteriológicas de uma água como o filtro lento, porém a sua utilização é limitada pela qualidade da água bruta afluyente ao filtro. A Tabela 3.2 apresenta alguns critérios de qualidade que as águas a serem tratadas pela filtração lenta, sem pré-tratamento, devem atender.

Tabela 3.2 - Qualidade da água recomendável para tratamento por filtração lenta.

Características da água	VALORES MÁXIMOS RECOMENDÁVEIS	
	Di Bernardo (1993)	Cleasby (1991)
Turbidez (ut)	10	5
Cor verdadeira (uC)	5	-
Ferro (mg Fe/l)	1	0,3
Manganês (mg Mn/l)	0,2	0,05
Algas	250 UPA/ml	5µg clorofila-a/l
Coli. Totais (NMP/100ml)	1 000	-

A cor verdadeira está relacionada à presença na água de substâncias dissolvidas ou coloidais que não são passíveis de separação da água através de processo unicamente físicos. Dessa forma, a filtração lenta não é capaz de remover eficientemente cor verdadeira. A presença, em quantidades significativas, de turbidez mineral (argila, silte) e/ou algas na água afluyente aos filtros lentos, pode levar a problemas operacionais, uma vez que se observa a rápida obstrução dos vazios intergranulares das camadas superiores do meio filtrante e a redução drástica da carreira de filtração.

O filtro lento também é muito sensível aos “picos” de turbidez, acarretando com isso carreiras de filtração de curta duração e necessidade de limpezas mais frequentes. Como consequência tem-se um aumento do custo de manutenção e uma diminuição da qualidade da água filtrada por não se desenvolver adequadamente o “schmutzdecke” e a película biológica no meio granular. Assim, a atividade biológica do filtro é afetada, tornando sua aplicação questionável sob essas condições (Vissher *et al.*,1996).

Segundo Di Bernardo *et al.* (1990) além das características físicas e químicas, o desempenho da filtração lenta pode ser influenciado pela qualidade microbiológica da água bruta, especialmente quando há possibilidade do florescimento de algas no manancial. Esses autores realizaram um trabalho experimental com o objetivo de investigar a influência das algas na filtração lenta. Foi utilizada areia com tamanho efetivo de 0,26 mm e coeficiente de desuniformidade igual a 1,7 e a taxa de filtração adotada foi de 5 m³/m².dia. Esses autores verificaram que as algas promove um desenvolvimento mais acentuado da perda de carga na camada de areia, causada pela obstrução dos vazios intergranulares, principalmente no topo da mesma, reduzindo consideravelmente a duração da carreira de filtração. Os autores observaram, também que a eficiência de remoção de algas no filtro lento depende das características das algas e da concentração delas na água bruta.

Portanto, existem limitações na adoção dessa tecnologia em regiões onde há altos índices pluviométricos, desmatamento, não-aplicação de técnicas de controle de erosão, flutuação de temperatura e presença de ácidos húmicos e de contaminação das fontes superficiais, afetando a qualidade da água bruta (Wegelin, 1984 *apud* Bresaola, 1990). Em consequência, identifica-se a necessidade de pré-tratamentos que permitam condicionar a qualidade da água para continuar seu processo de tratamento através de unidades de filtração lenta. Segundo Visscher *et al.* (1996), tais alternativas devem apresentar os mesmos níveis de complexidade técnica e custos de manutenção que a própria tecnologia de filtração lenta.

Existem vários métodos de pré-tratamento aplicáveis ao sistema de filtração lenta. Entre eles, pode-se destacar: pré-filtros de pedregulhos (pré-filtros dinâmicos, pré-filtro de

pedregulho com escoamento ascendente, descendente ou com escoamento horizontal), reservação prolongada, sedimentação simples, micropeneiras, galerias e poços de infiltração. Cleasby (1991) apresenta uma revisão geral sobre os diversos métodos de pré-tratamento.

De acordo com Di Bernardo (1993), a adoção de um determinado tipo de pré-tratamento depende de vários fatores, como por exemplo, a qualidade da água bruta, topografia no local da captação, distância da captação ao local da estação de tratamento, vazão a ser captada, nível de instrução técnica dos operadores e dos responsáveis pela manutenção, disponibilidade de material granular na região, facilidade de limpeza, entre outros.

3.2 - FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS (FiME)

A sequência de tratamento que envolve a utilização de pré-filtro dinâmico, pré-filtros de pedregulho com escoamento horizontal ou vertical (ascendente ou descendente) e a filtração lenta como barreira microbiológica, tem sido denominado Filtração em Múltiplas Etapas (FiME). A Figura 3.2 mostra um esquema geral de uma instalação de FiME.

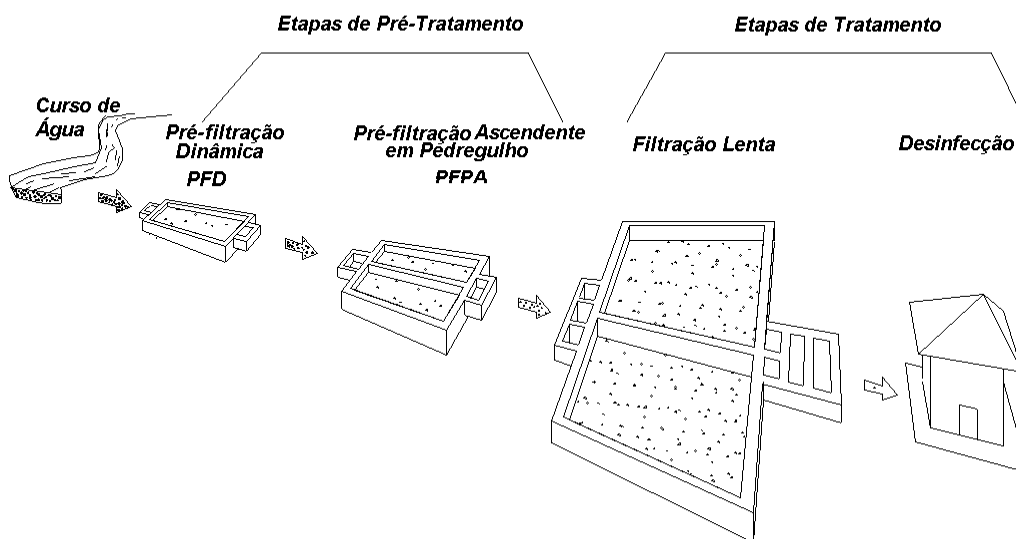


Figura 3.2 - Esquema geral da instalação FiME (Galvis *et al.*, 1998).

O conceito de filtração em múltiplas etapas se origina na busca de opções de acondicionamento ou pré-tratamento para fontes superficiais de água, cuja a qualidade pode interferir nos mecanismos de purificação ou superar a capacidade de remoção da filtração lenta produzindo-se efluentes de qualidade deficiente, se esta fosse a única etapa de tratamento antes da desinfecção (Visscher *et al.*, 1996).

É interessante observar que o primeiro filtro usado em abastecimento público de água, construído por John Gibb em Presley (Escócia), 1804, consistia de uma instalação composta por uma câmara de sedimentação anelar, envolvendo dois filtros de fluxo lateral preenchidos, respectivamente, com pedregulho e areia, e um tanque central de água tratada, sendo, segundo Wegelin (1988), uma aplicação de filtros de pedregulho antecedendo filtros lentos.

Galvis *et al.* (1992) realizaram um estudo comparativo entre as diferentes alternativas de pré-tratamento. Esses pesquisadores avaliaram a utilização da sedimentação simples, da sedimentação em placas, de pré-filtro de pedregulho raso com escoamento descendente e pré-filtro dinâmico como primeira etapa de condicionamento da água, com objetivo de absorver “picos” de sólidos suspensos. Como segunda etapa do sistema de tratamento foram avaliadas quatro alternativas: pré-filtro de pedregulho com escoamento horizontal, pré-filtro de pedregulho com escoamento ascendente em camadas, pré-filtro com escoamento ascendente em série com três unidades e pré-filtro de pedregulho com escoamento descendente. Unidades de filtração lenta foram utilizadas como última etapa de tratamento do sistema. Para o desenvolvimento do trabalho utilizou-se água do Rio Cauca (Colômbia) que apresentou turbidez média de 157,9 uT e cor verdadeira de 94 uH no período chuvoso, e turbidez média de 34,9 uT e 42 uH de cor verdadeira no período de estiagem. Esses autores concluíram que:

- o pré-filtro dinâmico configurou-se como melhor alternativa para primeira etapa de condicionamento da água, obtendo eficiências de remoção de até 77% para sólidos suspensos e de até 65% para coliformes fecais;
- considerando-se o comprimento total do meio filtrante como indicador de capital de investimento, e facilidade de limpeza como um indicador de custos reincidentes, a combinação de pré-filtro dinâmico com pré-filtro ascendente em camadas seria a melhor alternativa de pré-tratamento para a água estudada;
- a alternativa pré-filtro ascendente em camadas pareceu ter maior potencial de aplicação para fontes de água com baixa a média concentrações de sólidos suspensos (<150 mg/l) e pré-filtro ascendente em série de duas ou três unidades para concentrações maiores que 300 mg/l;

- a importância do pré-tratamento não está somente na redução de sólidos suspensos e turbidez mas também na melhora da qualidade microbiológica da água.

Como já foi visto, existem várias forças e mecanismos que afetam o processo de filtração de um modo geral. Visscher *et al.* (1996) alertam para o fato de que a contribuição de cada mecanismo na remoção das impurezas pode ser distinta quando trata-se da filtração em pedregulho ou da filtração lenta. De acordo com esses autores, a eficiência do processo de filtração em pedregulho se fundamenta no fato dos interstícios do meio granular funcionarem como câmaras de sedimentação, promovendo uma sedimentação eficiente e possibilitando também a existência de mecanismos de remoção de natureza física, química ou biológica em função das características da água a tratar.

Apesar da sedimentação ser considerada o principal mecanismo de remoção das partículas em pré-filtros de pedregulhos ascendente e pré-filtros dinâmicos, vários autores citados por Visscher *et al.* (1996) atribuem parte da eficiência dos filtros de pedregulho à atividade biológica. A atividade biológica no filtro de pedregulho atua de forma similar à atividade biológica observada nos primeiros centímetros do material granular no filtro lento.

Saidam e Butler (1996) atribuem a remoção de algas em pré-filtros de pedregulho a uma combinação de mecanismos físicos e biológicos. Os poros do meio filtrante retêm as impurezas presentes na água, funcionando como câmaras de deposição, enquanto que na superfície dos grãos é formada uma película de aderência, favorecendo o crescimento biológico. Quando as algas aderem à superfície dos grãos elas passam por metabolismo endógeno resultando na liberação de substrato solúvel que pode ser utilizado por outros microorganismo.

Segundo Boller (1993), o desempenho dos pré-filtros de pedregulhos depende, principalmente, dos seguintes parâmetros: concentração de sólidos, distribuição do tamanho das partículas, tamanho do grão do meio filtrante, espessura da camada que constitui o meio filtrante e taxa de filtração. Para esse autor, considerando que a taxa de filtração tem que ser selecionada de uma faixa estreita de valores (12 a 48 m³/m².d), a arte de se projetar esses tipos de unidades consiste na escolha da combinação mais satisfatória do tamanho dos grãos do e espessura da camada que constitui o meio filtrante para uma suspensão particular, de forma que os depósito de sólidos ocorra de forma uniforme no meio filtrante.

3.2.1 - Pré-filtros dinâmicos

Esse tipo de pré-filtro de pedregulho consiste, basicamente, de uma unidade com um leito composto de camadas de material granular de composição granulométrica crescente de forma que o material mais fino localiza-se no topo da unidade. Essa forma de composição granulométrica difere das demais tecnologias de filtração em pedregulho onde o tamanho dos grãos do meio filtrante diminui no sentido do fluxo (Galvis e Fernandez, 1991). Essa configuração permite que, na presença de valores elevados de sólidos suspensos de curta duração (picos), a camada mais superficial do meio filtrante obstrua protegendo, dessa forma, as demais unidades do sistema.

Nesse pré-filtro, uma parcela da vazão afluyente escoar superficialmente e é extravasada, enquanto a outra infiltra e é recolhida em um sistema de drenagem de fundo, constituído por tubos com orifícios de onde é então encaminhada para as etapas posteriores do tratamento. A fração que extravasa é retornada, preferencialmente, ao corpo de água. A Figura 3.3 apresenta um esquema de uma unidade de pré-filtração dinâmica.

Figura 3.3 - Esquema de uma unidade de pré-filtração dinâmica (Galvis *et al.* 1997).

De acordo com Latorre *et al.*(1996) o principal mecanismo de remoção das impurezas no pré-filtro dinâmico é a sedimentação no topo e no interior do material granular. Entretanto, a partir de estudos realizados em escala piloto utilizando-se água do Rio Cauca e taxas de filtração de 48, 72, 96 e 120 m³/m².dia, esses autores verificaram que a sedimentação no leito

é muito mais efetiva que a sedimentação na superfície, sendo responsável por mais de 87% da eficiência de remoção global. Os autores observaram, também, que não houve diferença relevante entre as eficiências de remoção de sólidos suspensos para as taxas de filtração de 48, 72 e 96 m³/m².dia. Entretanto, eficiências de remoção significativamente mais baixas foram obtidas para uma taxa de aplicação de 120 m³/m².dia sugerindo, a adoção de 96 m³/m².dia como taxa de filtração quando o objetivo for a remoção de sólidos suspensos.

De acordo com Di Bernardo (1993), os pré-filtros dinâmicos além de reterem parcialmente os sólidos presentes na água bruta, também evitam, através de sua obstrução, que valores elevados de turbidez ou de sólidos suspensos atinjam os demais pré-filtros e os filtros lentos, funcionando, dessa forma, como uma proteção ao sistema de tratamento. Latorre *et al.* (1996) destacam a importância dessa unidade no tratamento de águas sujeitas a variações bruscas de turbidez.

Esse sistema já é utilizado em diversas Estações de Tratamento de Água na Colômbia, onde pesquisas vêm sendo desenvolvidas pelo Centro Inter-regional de Abastecimento y Remocion de Agua-CINARA (Cáli, Colômbia) em colaboração com o *International Water and Sanitation Center- IRC* (Haia, Holanda). Vissher *et al.*(1996) apresentam resultados de estudos realizados com a água do Rio Cauca, onde a porcentagem de remoção encontrada nesses pré-filtros foi da ordem de 50% para turbidez, 70 a 80% para sólidos suspensos, 10 a 25% para cor verdadeira e 50 a 90 % para coliformes fecais. Os autores destacam que a eficiência do pré-filtro dinâmico diminui para águas de melhor qualidade.

Em estudos realizados na Índia, Smet (1989 *apud* Bresaola, 1990) relata remoções de sólidos suspensos na faixa de 88,2 a 91,5 % e de coliformes totais de cerca de 98% em pré-filtros dinâmicos tratando uma água com alta turbidez.

De acordo com Di Bernardo (1993), a taxa de aplicação, a constituição e a espessura total do meio granular e a velocidade de escoamento sobre o topo do meio granular são adotados em função do objetivo principal do pré-filtro dinâmico, qual seja, a amortização de “picos” de turbidez ou a remoção de impurezas. A Tabela 3.3 apresenta os parâmetros de projeto sugeridos por Galvis e Fernandez (1991).

Tabela 3.3 - Parâmetros de projeto de pré-filtro dinâmico.

Parâmetro		OBJETIVO PRINCIPAL	
		Remover impurezas	Amortecer “picos” (turbidez ou sólidos suspensos)
Taxa de aplicação (m ³ /m ² .d)		12 – 48	120 – 240
Velocidade de escoamento sobre o topo do meio granular(m/s)		0,10 - 0,30	<0,05
Sub-camada Inferior	Espessura (m):	0,2 - 0,3	0,1 - 0,2
	Tamanho (mm):	15,9 - 25,4	6,4 – 15,9
Sub-camada Intermediária	Espessura (m):	0,2 - 0,3	0,1 - 0,2
	Tamanho (mm):	6,4 - 12,7	3,2 - 6,4
Sub-camada Superior	Espessura (m):	0,2 - 0,3	0,2 - 0,3
	Tamanho (mm):	3,2 - 4,8	1,41 - 2,8

Fonte: Galvis e Fernandes (1991), modificada por Di Bernardo (1995).

No pré-filtro dinâmico, a camada superior (camada composta de material granular mais fino) se obstrui gradualmente. Vissher *et al.* (1996) relatam que, de um modo geral, as obstruções serão mais rápidas na presença de valores elevados de sólidos suspensos de curta duração (picos) e, eventualmente, dependendo das características das partículas, a obstrução poderá ser total. De acordo com Latorre *et al.* (1996) a obstrução gradual da camada superior do pré-filtro dinâmico provoca um aumento da resistência ao escoamento da água no meio filtrante acarretando uma diminuição da taxa de filtração e aumento da vazão da parcela que é descartada. Quando a taxa de filtração fica muito pequena é indicativo da necessidade de limpeza.

A limpeza dessas unidades é realizada através da lavagem manual da parte mais superficial do meio filtrante e da realização de descargas de fundo (Galvis *et al.* 1997). Segundo Wegelin (1988), a limpeza do filtro deve ser realizada através do revolvimento da parte superior do meio filtrante. Esse procedimento provocará a resuspensão dos sólidos depositados que, juntamente com excesso de água, retornarão à fonte de água bruta. Entretanto, quando se verifica a presença de níveis elevados de sólidos suspensos no interior do meio filtrante, deve-se remover todo o material filtrante para que possa ser lavado e recolocado, de tal forma que se possa manter a capacidade de filtração de água na unidade (Galvis *et al.*, 1992).

3.2.2 - Pré-filtros de pedregulhos com escoamento horizontal

Esta unidade consiste em um tanque retangular, onde a água esco horizontalmente através de três a quatro seções com material granular de tamanhos diferentes, decrescendo o sentido do fluxo. A água bruta verte em uma câmara de entrada, na qual a parte sólida grosseira se sedimenta e o material flutuante é barrado por uma parede. Essa parede possui uma série de orifícios para distribuição do fluxo d'água através da seção do filtro. Após a água atravessar horizontalmente o meio filtrante, a mesma é coletada em uma câmara de saída e encaminhada aos filtros lentos.

De acordo com Wegelin (1991) a altura do filtro é limitada em 1,5 m, para facilitar a limpeza, e a largura da caixa do filtro varia de acordo com a capacidade do filtro situando-se, geralmente entre 2 e 5 m. O filtro é equipado com um sistema de drenagem usado para a limpeza hidráulica. Ainda, segundo Wegelin (1988), o topo dos filtros horizontais é seco e a superfície livre da água permanece sob a superfície de pedregulho para prevenir o crescimento de algas. A Figura 3.4 mostra uma unidade de pré-filtração com escoamento horizontal.

Figura 3.4 - Esquema de uma unidade de pré-filtração horizontal (Wegelin, 1991).

De acordo com Bresaola (1990) e Di Bernardo (1993), Than e Quano (1977) foram os pioneiros no estudo do desempenho de pré-filtro de pedregulho com escoamento horizontal antecedendo o filtro lento. Esses pesquisadores utilizaram uma unidade de pré-filtração horizontal de 1,5 m de largura, dividida em seções de 0,30 m, e material filtrante de diâmetro efetivo compreendido entre 2,8 e 9,1 mm. A taxa de filtração adotada foi de 14,4 m³/m².dia para o pré-filtro horizontal e de 3,6 m³/m².dia para o filtro lento. Esses autores obtiveram efluente com valores de turbidez abaixo de 15 uT para o pré-filtro e entre 1 e 5 uT para o filtro lento. A remoção global de turbidez pelo sistema foi de 94%, enquanto a de coliformes foi de 95 a 98%. A remoção de ferro foi de 58% no pré-filtro e de 23% no filtro lento. Eles concluíram que a qualidade da água obtida no pré-filtro era função das características da água bruta.

Experiências com a utilização da pré-filtração horizontal são relatadas em vários países, alguns exemplos são descritos a seguir.

Mbwette (1992) analisou o desempenho das unidades de pré-filtração com escoamento horizontal em quatro sistemas de tratamento existentes na Tanzânia. Essas unidades apresentaram, em média, eficiência de remoção de turbidez entre 40 e 60%; 25 a 77% de remoção de cor aparente e, eficiências de remoção de coliformes fecais entre 66 e 97%.

Pardón (1992) cita que, em 1992, dos 21 sistemas com pré-filtração em pedregulho, existentes no Peru, 19 eram pré-filtração com escoamento horizontal. A partir da análise desses sistemas, esse autor observou que ocorria a remoção de partículas orgânicas nessas unidades, salientando o fato de que o depósito de matéria orgânica pode promover a atividade biológica na superfície do material granular.

Wegelin (1988) descreve um sistema de tratamento existente em Gana constituído por dois pré-filtros de escoamento horizontal e dois filtros lentos para tratar água de um pequeno reservatório. O pré-filtro horizontal tem 7 m de comprimento e opera com uma taxa de filtração 18 m³/m².dia. Segundo o autor a unidade mostrou-se capaz de reduzir uma variedade de diferentes espécies de algas. A Tabela 3.4 a seguir mostra algumas observações microscópicas preliminares relatadas nesse estudo.

Tabela 3.4 -Remoção de algas pelo pré-filtro com escoamento horizontal.

Espécies de algas	Tamanho	Afluente		Efluente	
		a	B	a	b
Cyclotella	10 – 15	++	+	+	0
Staurastrum	45 – 80	++	++	-	0
Chloophyta	2 – 10	++	++	+	0
Tracholomonas	14	++	+	+	-
Mesismopedia	0,5	++	++	++	0
Gomphosphaeria (em colônia)	50 – 60	++	++	++	-

Fonte: Wegelin (1988).

Nota: a = amostragem após 3 dias de operação do pré-filtro;
b = amostragem após 30 dias de operação do pré-filtro;
++ = muitíssimo; + = muito; - = pouco e 0 = nulo.

Investigações realizadas no laboratório do *International Reference Center for Water Disposal* (IRCWD-Suíça), mostraram que o mecanismo de remoção predominante nesse tipo de filtro é a sedimentação. Os sólidos suspensos sedimentam no topo dos grãos do meio filtrante e, com o tempo, pequenas quantidades desse material se movem para o fundo do filtro. Desse modo a retenção na parte superior do filtro é restaurada ao mesmo tempo que o meio filtrante é preenchido com material sedimentado (de baixo para cima). Esse mecanismo faz com que esse tipo de pré-filtro tenha grande capacidade de armazenamento de lodo e, conseqüentemente, longa carreira de filtração. Entretanto, o acúmulo de sólidos não é distribuído uniformemente no meio filtrante, sendo registrados acúmulos maiores na região de entrada de cada camada de pedregulho (Wegelin, 1991).

De acordo com Di Bernardo (1993), cada camada do meio granular, nesse pré-filtro, torna-se gradualmente colmatada com a retenção de material, até que a eficiência diminui significativamente, quando deverá ser efetuada a limpeza, por meio de descargas de fundo.

A eficiência da limpeza hidráulica foi analisada por Wegelin (1991) em um estudo, em escala piloto, onde se comparou diferentes sistemas de drenagem de fundo em unidades de pré-filtração com escoamento horizontal e com escoamento ascendente. Um tipo de sistema de drenagem de fundo consistia de um fundo falso composto por placas de concreto de 25X50 cm dispostas com aberturas de 2mm de largura. Outro sistema analisado era composto por tubos perfurados. O autor observou que a eficiência da limpeza hidráulica é proporcional a taxa de drenagem aplicada. O autor observou, também, que a eficiência da limpeza realizada nos filtros equipados com tubos perfurados era maior para taxas de drenagem inferiores a 480 m³/m².dia, atribuindo isso ao fato de uma distribuição de fluxo mais regular ser obtida nesse

sistema. Ainda segundo Wegelin (1991) a limpeza do pré-filtro ascendente é mais fácil e eficiente do que do pré-filtro com escoamento horizontal.

A Tabela 3.5 mostra os principais parâmetros de projeto sugeridos por Wegelin (1991 *apud* Di Bernardo, 1993) para o pré-filtro de pedregulho com escoamento horizontal.

Tabela 3.5 - Principais parâmetros de projeto sugeridos por Wegelin para o pré-filtro de pedregulho com escoamento horizontal.

Parâmetro	Concentração de sólidos suspensos no afluente	
	≥ 100 mg/l	< 100 mg/l
Taxa de filtração	12 - 24	18 - 36
Número de compartimentos	3	3
Comprimento dos compartimentos (m)		
Compartimento 1	2,0 - 4,0	1,5 - 3,0
Compartimento 2	2,0 - 3,0	1,5 - 2,5
Compartimento 3	1,5 - 2,5	1,0 - 2,0
Compartimento 4	1,0 - 2,0	-
Tamanho do pedregulho (mm)		
Compartimento 1	15,9 - 25,4	15,9 - 25,4
Compartimento 2	9,6 - 15,9	9,6 - 15,9
Compartimento 3	4,8 - 9,6	4,8 - 9,6
Compartimento 4	2,4 - 4,8	-
Altura útil máxima (m)	1,5	1,5
Largura máxima (m)	5,0	5,0
Taxa de descarga (m ³ /m ² .d)	≥ 1 400	≥ 1 400

Fonte: Wegelin, (1991 *apud* Di Bernardo, 1993).

A escolha dos parâmetros de projeto deve ser feita considerando-se as determinações de sólidos suspensos do afluente, a filtrabilidade da água bruta e existência de pessoal qualificado para operação.

3.2.3 - Pré-filtros de pedregulhos com escoamento descendente

Nessa modalidade de pré-filtração, duas variantes podem ser encontradas a pré-filtração descendente em camadas e a pré-filtração descendente em série. Em ambas a água é alimentada pelo topo e escoada através do material filtrante sendo recolhida pelo sistema de drenagem de fundo. No caso da pré-filtração descendente em camadas esse processo ocorre em uma única unidade onde o material filtrante é composto de sub-camadas de pedregulho

decrecente na direção do fluxo. Por outro lado, no caso da pré-filtração em série, cada camada filtrante é disposta em um compartimento separado, sendo portanto, que a água coletada no sistema de drenagem de fundo é encaminhada para a uma segunda câmara e desta para uma terceira (Figura 3.5).

Figura 3.5 - Esquema de uma unidade de pré-filtração descendente em série (Wegelin, 1991).

A utilização de pré-filtros de pedregulho com escoamento descendente, foi investigada por Peres, (1985 *apud* Bresaola, 1990) usando unidades em série e em paralelo. A disposição dos filtros em paralelo permitiu o estudo do comportamento de diferentes meios filtrantes perante a mesma qualidade da água bruta. Em cada unidade, variou-se a espessura do meio filtrante (entre 0,50 e 2,0 m) e a taxa de filtração (de 2,4 a 19,6 m³/m².dia), concluindo-se que a eficiência do processo dependia essencialmente da qualidade da água bruta. Investigando a disposição dos filtros em série e utilizando taxas de filtração decrescentes o autor obteve remoções de turbidez variando de 50 a 86%. Verificou-se ainda que a eficiência de remoção de turbidez aumenta com o aumento da turbidez da água bruta e com o tempo de funcionamento unidade.

Segundo Peres, (1985 *apud* Bresaola, 1990), a lavagem desses filtros com água escoando com uma velocidade de 120 m/h. durante um intervalo de tempo de 5 minutos remove cerca de 25% do material retido no meio filtrante. Wegelin (1996) ressalta que, embora a eficiência do filtro seja restaurada periodicamente por lavagem hidráulica, após vários anos, o leito filtrante deve ser removido manualmente, lavado e recolocado nas caixas dos filtros.

Vários trabalhos apresentam estudos onde a pré-filtração descendente é avaliada e comparada com outras alternativas de pré-filtração em pedregulho. Alguns desses estudos são

apresentados no item 3.2.4 que se segue.

Uma variação dessa alternativa de pré-tratamento foi estudada por Ives e Rajapakse (1988). Os autores utilizaram uma unidade piloto, onde o pré-filtro com escoamento descendente era constituído por um meio granular composto por seixos rolados com 50 mm de tamanho, que na sua parte inferior tinha os espaços vazios preenchidos com areia fina. Para uma taxa de filtração de cerca de $17 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, diâmetro efetivo da areia de 0,38 mm, e sólidos suspensos na água bruta variando de 100 a 5 000 mg/l, esse filtro produziu um efluente com menos de 1 mg/l de sólidos suspensos. Para outras taxas testadas na faixa de 12 a $36 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$, e areia com diâmetro efetivo de até 1 mm, a qualidade da água efluente foi sempre inferior a 25 mg/l de sólidos suspensos.

3.2.4 - Pré-filtros de pedregulho com escoamento ascendente

Nessa alternativa de pré-tratamento, a água escoar de forma ascendente através de um meio filtrante composto por pedregulho com granulometria decrescente no sentido do escoamento e utiliza taxas de aplicação da ordem de 12 a $48 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. Nessa modalidade de pré-filtração, dois arranjos físicos podem ser utilizados: o pré-filtro ascendente em camadas, onde as sub-camadas de pedregulhos de diferentes granulometrias são sobrepostas em uma mesma unidade de filtração, e o pré-filtro ascendente em série, onde o leito de pedregulho é instalado em duas ou três unidades de filtração, cada uma com uma granulometria predominante de pedregulho, decrescente no sentido do fluxo. As Figuras 3.6 e 3.7 mostram esquemas de pré-filtro com escoamento ascendente em camadas, e em série, respectivamente.

Figura 3.6 - Corte esquemático de um pré-filtro ascendente em camadas (Vissher *et al.*,1996).

Figura 3.7 - Esquema de um pré-filtro ascendente em série (Vissher *et al.*,1996).

Em uma análise comparativa realizada no CINARA entre as diferentes opções de pré-filtração em pedregulho (com fluxo horizontal, ascendente e descendente), em escala piloto, verificou-se que a filtração ascendente constituía a melhor opção técnica em termos de custos e de comportamento hidráulico (Vissher *et al.*,1996).

Várias publicações, que apresentam resultados obtidos em estudos-piloto ou em unidades em funcionamento regular (escala real), demonstram a aplicabilidade da pré-filtração ascendente como pré-tratamento para águas com elevados teores de turbidez e de coliformes. Resultados obtidos em uma instalação modelo para transferência de tecnologia instalada em Puerto Mallarino (Colômbia) mostraram que um pré-filtro de escoamento ascendente em camadas, operando com taxas de filtração de 7 a 18 m³/m².dia, pode alcançar remoções de turbidez da ordem de 70%, coliformes totais na faixa de 70 a 98 % e cor verdadeira entre 10 e 45 % (Visscher *et al.* 1996). Outra estação de tratamento de água operando a mais de 6 anos na localidade de El Retiro (Colômbia), trata água do Rio Pance que apresenta teores médio de turbidez de 15 uT e coliformes fecais em torno de 7000 UFC/100 ml. Essa estação de tratamento é composta por uma unidade de pré-filtração dinâmica, uma unidade de pré-filtração com escoamento ascendente em camadas e filtração lenta como etapa final do tratamento. O pré-filtro ascendente opera a uma taxa de filtração em torno de 15 m³/m².dia e obtêm eficiências médias de remoção de turbidez da ordem de 50% e coliformes fecais em torno de 88,6% (Galvis *et al.*, 1997).

Resultados mais expressivos foram obtidos em estudos realizados por Wegelin *et al.* (1996), em Cochabamba, Bolívia. Foram avaliadas alternativas para a modificações de um

sistema constituído de pré-filtros de pedregulhos horizontais e filtros lentos por não funcionarem adequadamente. Esses autores sugeriram, após estudo em planta piloto, a transformação dos pré-filtros de pedregulhos horizontais em pré-filtros de pedregulhos com escoamento ascendente em série. O sistema, após as modificações, produziu um efluente com turbidez em torno de 5 uT, sendo que a turbidez da água bruta afluenta ao filtro oscilava em torno de 100 uT. Foi sugerido, também, que o critério a ser adotado para a lavagem dos pré-filtros ascendentes fosse a turbidez efluente. Assim, a lavagem seria necessária quando o efluente da primeira etapa atingisse 25 uT ou o da segunda etapa atingisse 5 uT.

No Brasil, não se tem notícias de utilização de unidades de pré-filtração ascendente, ou qualquer outra pré-filtração em pedregulho. Entretanto essa alternativa de pré-tratamento tem sido estudada na Escola de Engenharia de São Carlos (EESC/USP) desde 1984 (Di Bernardo, 1991). A Tabela 3.6 apresenta, resumidamente, os principais trabalhos de pesquisa sobre pré-filtração ascendente realizados nessa Instituição.

Tabela 3.6 – Resumo dos principais trabalhos realizados na EESC/USP sobre pré-filtração em pedregulho com escoamento ascendente.

Oswaldo Ramiro Rugno (1988)
A pré-filtração em pedregulho com escoamento ascendente e taxas entre 6 e 36 m ³ /m ² .dia é responsável por remoção considerável de turbidez, cor aparente, ferro e manganês, coliformes totais, a menos por ocasião da ocorrência de variações bruscas de qualidade.
Adan Ernesto Pocasangre Collazos (1990)
A eficiência da pré-filtração em pedregulho com escoamento ascendente é similar à conseguida quando o escoamento é descendente para taxas de aplicação inferiores a 36 m ³ /m ² .dia; a ocorrência de “picos” de turbidez no afluenta piora a qualidade do efluente, mostrando que tais unidades possuem baixa capacidade de atenuação de variações bruscas na Qualidade do afluenta. A remoção de coliformes totais e do número de colônias de bactérias nos dois pré-filtros foi similar e parece não ter sido influenciada pela taxa de filtração. A taxa de crescimento da perda de carga no pré-filtro de escoamento descendente foi, geralmente, superior quando comparada à da unidade de escoamento ascendente e a duração da carreira do pré-filtro de escoamento descendente é muito influenciada pela qualidade do afluenta, o que não ocorreu no pré-filtro de escoamento ascendente. Uma simples descarga de fundo no pré-filtro de escoamento ascendente mostrou-se suficiente para recolocá-lo em operação, enquanto que, no descendente era necessária a introdução de água no sentido ascensional para a lavagem do meio granular;

Tabela 3.6 – Continuação

Odete Rocha (1990)

Pré-filtro de pedregulho e areia grossa com escoamento ascendente, operando com taxas de entre 12 e 36 m³/m².dia , apresentou boa remoção de algas em águas contendo cerca de 10³ células/l e picos de até 10⁶ células/l. Maiores eficiências de remoção foram obtidas para algas filamentosas de dimensões maiores. O aumento da taxa de filtração não acarretou prejuízo ao desempenho dos pré-filtros na remoção de algas, entretanto observou-se uma tendência de redução da eficiência de remoção de algas quando da ocorrência de picos de turbidez e cor aparente na água afluyente.

Ruben Bresaola Jr. (1990)

A Qualidade da água produzida no conjunto pré-filtro de areia grossa/filtro lento (PFAG/FLA) foi superior à obtida no pré-filtro de pedregulho/filtro lento (PFP/FLA) para taxas nos pré-filtro de 12 a 36 e de 3 a 6 m³/m².dia nos filtros lentos; por ocasião da ocorrência de “picos” de turbidez no afluyente ao sistema, o PFAG/FL produz um efluente de melhor qualidade que o PFP/FLA; a limpeza do PFP é mais simples que a do PFAG.

Martin Gerardo Rivera Valenzuela (1991)

Para água bruta com qualidade praticamente constante, a eficiência de remoção de impurezas em uma instalação contendo pré-filtro de pedregulho com escoamento ascendente (taxa menor que 24 m³/m².dia) em série com filtro lento de areia e mantas (taxa 6 m³/m².dia), aumenta com o tempo de funcionamento; é fundamental que a operação do filtro lento seja iniciada com água bruta , para depois o pré-filtro ser colocado em operação.

Carlos Eduardo Aggio (1994)

A remoção de algas em sistemas constituído por pré-filtro de pedregulho com escoamento ascendente seguido de filtro lento de areia é superior a de 90% para taxas de 12 a 18 m³/m².dia no pré-filtro e de 6 m³/m².dia no filtro lento; a formação da camada biológica depende essencialmente da taxa no pré-filtro e no filtro lento, sendo recomendados valores menores que, respectivamente, 36 m³/m².dia no PFP e 6 m³/m².dia no filtro lento. A

Carolina Ruiz Bojorge (1996)

Com uso de mantas sintéticas é possível utilizar taxas de até 24 m³/m².dia na pré-filtração ascendente em pedregulho, com produção de efluente de melhor qualidade e carreiras mais longas quando comparadas a uma unidade sem mantas.

Fonte: Di Bernardo e Rocha (1990), Di Bernarndo e Collazos (1990), Bresaola (1990),

Di Bernardo (1991), Di Bernardo (1995) e Di Bernardo *et al.*, 1998 (modificada).

Di Bernardo (1991) cita algumas conclusões que tiradas desses estudos utilizando a pré-filtração ascendente e filtração lenta precedida da pré-filtração ascendente:

- quando a qualidade do afluente permanece praticamente constante, a eficiência de remoção de turbidez, cor aparente, ferro total, sólidos totais e coliformes totais aumenta com o tempo de funcionamento;
- variações repentinas da qualidade da água bruta causam variações simultâneas da qualidade efluente do pré-filtro, configurando uma pequena capacidade dessas unidades em absorver tais “picos”;
- com taxas de até 36 m³/m².dia no pré-filtro e de até 6 até 36 m³/m².dia no filtro lento, o sistema tem capacidade para produzir um efluente final com turbidez consistentemente menor que 5 UT, independente da turbidez afluente, desde que o valor seja menor que 100 UT;
- a comunidade biótica presente no pré-filtro e filtro lento, foi bastante variada, sendo mais diversificada neste último, incluindo cerca de 50 gêneros de algas, diversos protozoários, nemátodos, oligoquetos, rotíferos e copépodo;
- tanto a remoção de algas quanto a de partículas totais foi maior no pré-filtro que no filtro lento.

Em recente publicação, Galvis *et al.* (1996) apresentou a comparação entre três alternativas de pré-tratamento como segunda etapa de acondicionamento da água (após o pré-filtro dinâmico): pré-filtro com escoamento horizontal, pré-filtros com escoamento horizontal em série; pré-filtro com escoamento ascendente em série. Em todas as unidades uma taxa de filtração de 16,8 m³/m².dia foi aplicada durante o período de estudo. Utilizou-se a água do Rio Cauca (Colômbia) que apresenta uma alta carga de sólidos suspensos, representando um considerável desafio para o pré-tratamento. A comparação incluiu eficiência de tratamento, desempenho hidráulico e exigências de operação e manutenção. As Tabelas 3.7 a 3.10 mostram alguns resultados obtidos nesse estudo.

Tabela 3.7 - Eficiências de remoções para os diferentes pré-filtros de pedregulho.

Parâmetro	Eficiência de remoção (%)		
	PFA em série	PFH em série	PFH
Coliformes Fecais	99,4	95,6	95,4
Turbidez	80	66	68,4
Sólidos suspensos	97	94	93

Fonte: Galvis *et al.*, 1996 (modificada).

Tabela 3.8 - Volume total de água requerido para limpeza dos diferentes pré-filtros de pedregulho.

Tipo de limpeza	Volume de água (m ³ /m ²)		
	PFA em série	PFH em série	PFH
Semanal	0,3	0,6	0,6
Mensal	1,3	1,6	0,9
Volume total (*)	2,2	3,4	2,7

Fonte: Galvis *et al.* (1996).

(*) No período de um mês e três semanas

Tabela 3.9 - Tempo requerido para as diferentes atividades nas limpezas semanais dos diferentes pré-filtros de pedregulho.

Tempo requerido para limpeza semanal em homem hora/m ² de filtro			
Atividade	PFA em série	PFH em série	PFH
Limpeza hidráulica	0,04	0,06	0,03
Operação de reaterro	1,31	2,14	1,36
Tempo para limpeza	1,35	2,20	1,39

Fonte: Galvis *et al.* (1996).

Tabela 3.10 - Tempo requerido para as diferentes atividades nas limpezas mensais dos diferentes pré-filtros de pedregulho.

Tempo requerido para limpeza mensal em homem hora/m ² de filtro			
Atividade	PFA em série	PFH em série	PFH
Limpeza hidráulica	1,1	4,6	2,4
Drenagem e	1,0	-	-
Raspagem	0,7	-	-
Total de limpezas	2,8	4,6	2,4

Fonte: Galvis *et al.* (1996).

Sendo que:

PFA em série = pré-filtro com escoamento ascendente constituído por três unidades em série;

PFH em série = pré-filtro com escoamento horizontal constituído por três unidades em série;

PFH = pré-filtro com escoamento horizontal.

Da observação das tabelas apresentadas percebe-se que o pré-filtro ascendente em série apresentou-se mais eficiente na remoção de turbidez, sólidos suspensos e coliformes fecais. Nota-se, também, que o pré-filtro em série demanda menos água no procedimento de limpeza e, quando se compara somente as unidades em série, o tempo requerido para a limpeza do pré-filtro ascendente também é menor. Os autores salientam ainda que a recuperação da perda de carga inicial no pré-filtro ascendente foi muito boa indicando que o procedimento de limpeza foi bastante efetivo nessa unidade.

Diante dos resultados obtidos nos estudos comparativos realizados por Di Bernardo e Collazos (1990) e Galvis *et al.* (1992 e 1996), onde foram comparadas diversas alternativas de pré-filtração em pedregulho, pode-se verificar que a pré-filtração com escoamento ascendente constitui-se em uma opção bastante atraente, apresentando os melhores desempenhos e menores custos em termos de operação e manutenção com relação tanto a pré-filtração horizontal quanto à pré-filtração descendente.

Em estudo realizado pelo CINARA (Visscher *et al.*, 1996) foi avaliado o desempenho das duas alternativas de pré-filtração ascendente, em série e em camadas, para águas com diferentes níveis de qualidade. O pré-filtro com escoamento ascendente em série apresentou sempre melhor eficiência de remoção de impurezas (turbidez, cor verdadeira, sólidos em suspensão e coliformes fecais), entretanto para água com menor grau de contaminação sua ascendência sobre o pré-filtro em camadas foi menos significativa.

Segundo esses autores a decisão de selecionar uma alternativa de pré-tratamento depende tanto da qualidade da água bruta quanto do risco sanitário envolvido. Quando o risco sanitário é maior, é preferível selecionar o pré-filtro ascendente em série, pois tem um maior número de unidades e, conseqüentemente, maior eficiência de remoção de patogênicos.

A comparação entre diferentes arranjos de pré-filtro ascendente é também objeto do trabalho de Vargas *et al.* (1996). Foram avaliados sistemas constituídos de um pré-filtro dinâmico, com três opções de filtros de pedregulho (ascendente em camadas, ascendente em série de 2 e 3 etapas) e um filtro lento. O objetivo desse estudo era definir um guia para a seleção dessa tecnologia, considerando risco sanitário, eficiência e custos. Para a determinação do risco microbiológico foi utilizado o parâmetro coliformes fecais, e para o risco físico-químico foi utilizado o parâmetro turbidez. Dentre as conclusões dos autores destacam-se:

- a tecnologia FiME é uma alternativa tecnológica com grande potencial de uso, devido às eficiências de remoção apresentadas para fontes superficiais com níveis de turbidez até 100 ut e 100.000 UFC/100 ml de Coliformes Fecais. Os custos de

investimento inicial, administração, operação e manutenção são muito competitivos comparados aos das outras tecnologias;

- o pré-filtro de pedregulho com escoamento ascendente em camadas é uma alternativa tecnológica que pode ser utilizada como segunda etapa de pré-tratamento na FiME para fontes com turbidez até 50 uT e 20.000 UFC/100 ml de coliformes fecais. O pré-filtro de pedregulho ascendente em série, por sua vez, pode ser utilizado em fontes superficiais com turbidez até 100 uT e coliformes fecais até 100.000 UFC/100 ml.

Entretanto, no processo de seleção desse tipo de pré-filtro, é necessário considerar também os custos de implantação, uma vez que, em média, o custo do pré-filtro ascendente em série é duas vezes maior que o pré-filtro ascendente em camadas. Outro fator a se levar em conta é o fato de o leito do pré-filtro ascendente em camada ser mais delicado em termos de construção, operação e manutenção, pois existe o risco das camadas do leito se misturarem trazendo implicações negativas. Diante desses fatores, em áreas mais retiradas, Vargas *et al.* (1996) sugerem que é mais recomendável o uso do pré-filtro ascendente em série.

Ao comparar alguns parâmetros indicativos de quantidades de obras de construção para as alternativas de pré-tratamento com filtro de pedregulho com escoamento ascendente em camada e em série, tem-se que é preferível, em termos de custos de construção, utilizar pré-filtro em camadas, com velocidade de filtração de 7 m³/m².dia à pré-filtros em série com taxas de filtração de 14 m³/m².dia (Galvis *et al.*, 1992 *apud* Vargas *et al.*, 1996).

Tabela 3.11 mostra os parâmetros de projetos sugeridos por Galvis *et al.* (1997) para o uso da filtração em pedregulho ascendente em série e em camada.

Tabela 3.11 – Parâmetros de projetos para pré-filtros de pedregulho com escoamento ascendente.

Parâmetros		Valores recomendados				
Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)		7,2 – 14,4				
Altura da água sobrenadante (m)		0,10 – 0,20				
Carga estática para descarga de fundo (m)		2,5 – 3,0				
Área de filtração por unidade (m ²)		15 – 25				
Faixa granulométrica (mm)	Espessura do meio filtrante ou subcamada (m)					
	PFAC	PFAS-2		PFAS-3		
19 – 25	0,30	0,30		0,30	0,20	
13 – 19	0,20 - 0,30	0,30 - 0,45	0,20	0,15	0,15	0,15
6 – 13	0,15 - 0,20	0,30 - 0,45	0,15	0,45 - 0,75	0,15	0,15
3 – 6	0,15 - 0,20		0,30 - 0,45		0,40 – 0,70	0,15
1,6 – 3	0,10 - 0,20		0,25 - 0,40			0,45 - 0,75
Altura total (m)						
Camada suporte	0,30	0,30	0,35	0,30	0,50	0,45
Meio filtrante	0,60 - 0,90	0,60 - 0,90	0,55 - 0,85	0,60 - 0,90	0,40 – 0,70	0,45 - 0,75

Fonte: Galvis *et al.*, 1997 (modificada).

Onde:

PFAC = Pré filtro com escoamento ascendente em camadas;

PFAS-2 = Pré filtro com escoamento ascendente em série com duas unidades;

PFAS-3 = Pré filtro com escoamento ascendente em série com três unidades.

Em relação à operação de pré-filtros ascendentes recomenda-se (Galvis *et al.* 1997) que sejam efetuadas descargas de fundo semanalmente para evitar a compactação do material depositado e posterior ineficiência do procedimento de lavagem.

Di Bernardo e Collazos (1990), por sua vez, recomendam que o pré-filtro ascendente seja coberto para evitar o desenvolvimento acentuado de algas. Isso ocorre devido ao fato de nos pré-filtros ascendente o sobrenadante é relativamente clarificado, promovendo a fácil penetração da luz solar. Por essa mesma razão tem sido proposta também, a disposição de pedras de grande tamanho (geralmente de 50 a 200 mm) após a camada de pedregulho de menor tamanho (ou de areia grossa), sobre as tubulações de coleta do efluente, para reduzir a penetração dos raios solares e, conseqüentemente, atenuar os efeitos de um dos principais fatores para o desenvolvimento de algas (Di Bernardo, 1993). Segundo Galvis *et al.* (1996), a limpeza manual da camada superficial de pedregulho após a drenagem hidráulica também

permite controlar o crescimento de algas e controlar o acúmulo de lodo nesta zona.

3.2.5 - Aspectos econômicos

Em recente artigo Galvis *et al.* (1998) apresentam uma estimativa da distribuição percentual de custos das etapas de tratamento de diferentes opções de FiME, tomando como base os custos de implantação dessa tecnologia na Colômbia (Tabela 3.12).

Tabela 3.12 - Custos de implantação dos diferentes componentes de uma instalação FiME no Vale do Rio Cauca na Colômbia (agosto de 1996).

ALTERNATIVAS DE FIME (%)				
Componente de FiME	PFD FL	PFD PFAC FL	PFD PFAS2 FL	PFD PFAS3 FL
PFD (Pré-filtro Dinâmico)	10	9	8	7
PFAC (unidade com subcamadas)		15		
PFAS2 (duas unidades em série)			24	
PFAS3 (três unidades em série)				32
FL (Filtro Lento em areia)	55	46	42	37
Área de armazenamento de areia	12	10		8
Outros	23	20	17	16
Total	100	100	100	100

Fonte: Galvis *et al.*,1998.

Observa-se da Tabela 3.12 que a componente de custo da pré-filtração ascendente cresce significativamente quando opta-se pela filtração em série. Os autores ressaltaram o fato do custo da pré-filtração dinâmica variar, apenas entre 7 e 10 % do custo total, e recomendam sempre incluir essa etapa de tratamento nas instalações de FiME, tendo em vista sua elevada capacidade de retenção de sólidos suspensos.

3.2.6 – Limitações da Filtração em Múltiplas Etapas

Apesar das reconhecidas vantagens da tecnologia FiME em termos de eficiência de tratamento, simplicidade de projeto, operação, manutenção, administração, moderados custos de investimento inicial e baixos custos de manutenção, essa tecnologia apresenta limitações que podem afetar a confiabilidade que sobre ela existe. De acordo com Visscher *et al.* (1996),

essas limitações podem ser agrupadas nas seguintes categorias:

- Níveis de contaminação que superam a eficiência do processo

Os parâmetros básicos podem ter um nível que superam a capacidade do sistema. Para turbidez, pode-se aceitar valores médios até 80 uT, com “picos” de até 700 uT ou muito mais altos, considerando que inicialmente se colmate o pré-filtro dinâmico. Em termos de cor verdadeira, pode-se admitir um valor médio de 60 uC, com “picos” até 230 uC. São admissíveis, por outro lado, coliformes fecais até 90.000 UFC/100ml com “picos” de 300.000 UFC/100 ml. Existem outros elementos como a salinidade, encontrados na água bruta, que não são afetados pelo processo de FiME. Há compostos químicos que podem originar problema no tratamento, como os resíduos de fungicidas e herbicidas.

Em um sistema de tratamento FiME, como em outra tecnologia, se a quantidade de água a tratar se modifica significativamente, superando as condições de projeto estabelecidas previamente, a eficiência do processo é comprometida. No entanto, Latorre e Hincapie (1996) relatam que, em Yacuanquer (Colômbia), mesmo com uma sobrecarga de vazão de 88%, o sistema de FiME está respondendo corretamente a condições extremas de operação, indicando que se faz necessário maior investigação a fim de potencializar essa alternativa de tratamento.

- Problemas que reduzem ou inibem a eficiência do processo

Os sólidos suspensos podem constituir-se, em sua maioria, de material coloidal que não é removido facilmente. As temperaturas baixas aumentam a viscosidade da água a ser filtrada e reduzem a atividade biológica. A experiência com FiME vem sendo desenvolvida em zonas com temperaturas acima de 10°C, justamente pelo fato de que, em zonas mais frias, a eficiência pode ser mais baixa. A escassez de nutrientes e níveis baixos de oxigênio podem interferir no processo biológico.

- Carreiras de filtração curtas

Em casos relativamente excepcionais pode ocorrer que a frequência intensa de “picos” de turbidez reduza demasiadamente a carreira de filtração. Outro problema, e no qual não se tem muita experiência a respeito, é o crescimento de algas.

Cleasby (1991) relata outra limitação da FiME, quando em sua visão sobre sistemas de pré-tratamento para filtração lenta, destaca: “Os estudos recentes sobre filtração em pedregulho (ascendente, descendente e horizontal) revelam o seu potencial no tratamento de águas de rios turvos. Contudo, esses filtros não foram testados com águas de reservatórios ou

lagos durante o processo de florescimento de algas”.

De fato, pouco foi feito no que diz respeito à eficiência de remoção de algas pela FiME. Do levantamento bibliográfico realizado apenas os trabalhos de Di Bernardo e Rocha (1992), Aggio (1993 *apud* Di Bernardo, 1995) e Saidam e Butler (1996) enfocam a aplicação da pré-filtração em pedregulho para a remoção de algas.

Saidam e Butler (1996) realizaram estudos em filtros grossos com escoamento horizontal utilizando seis unidades piloto configuradas em três linhas de dois filtros em série. Os pré-filtros eram alimentados com o efluente de um sistema de lagoas de estabilização com elevada concentração de algas. Foram testados quatro tipos de meio filtrante e taxas de filtração variando de 4 a 18 m³/m².dia. Dos resultados obtidos, os autores observaram que:

- o melhor desempenho de cada filtro foi alcançado com a taxa de filtração mais baixa;
- sinais de entupimento precoce foram observados no filtro com meio filtrante composto por agregados de tamanho médio. A razão disso, segundo o autor, está mais associada ao fato desse meio ser rico em finos do que à deposição de sólidos nos vazios intergranulares;
- eficiências encontradas variaram de 31 a 61% para remoção de algas; 33 a 90% para remoção de coliformes fecais; 10 a 46 % para remoção de fósforo total; 19 a 62% para DBO₅ e 19 a 36% para DQO. A alta variação nos resultados obtidos é função das diferentes granulometrias adotadas nos três pré-filtros estudados.
- os filtros de pedregulho parecem possuir maior potencial para atingir remoções globais mais altas se comparados a outros materiais experimentados pelos autores.

Aggio (1993, *apud* Di Bernardo, 1997) realizou um estudo utilizando uma instalação piloto com pré-filtro de pedregulho de escoamento ascendente, precedendo filtro lento com meio filtrante constituído de mantas sintéticas não tecidas e areia, e utilizando taxas de filtração no pré-filtro de 6, 12 e 36 m³/m².dia com o propósito de estudar a comunidade biótica presente em tais unidades. Esse autor observou que a eficiência de remoção de algas aumenta com o tempo de funcionamento das unidades.

O comportamento do pré-filtro ascendente diante da presença de “picos” de concentrações de algas foi objeto de estudos desenvolvidos por Di Bernardo e Rocha (1992). Nesse trabalho, utilizou-se um pré-filtro ascendente em camadas sendo que, em alguns dias específicos, foram introduzidas na água bruta, suspensões algais preparadas com a clorófitica *Ankistrodesmus densus* e com as diatomáceas *Melosira granulata* e *Melosira italica*. Foram

estudadas taxas de filtração de 12, 24 e 36 m³/m².dia. Dos resultados obtidos, os autores apresentam as seguintes conclusões:

- é de fundamental importância o conhecimento da composição qualitativa da comunidade algal da água bruta quando se pretende utilizar pré-filtro de pedregulho e areia grossa com escoamento ascendente, como unidade de pré-tratamento;
- o aumento do número total de algas no efluente conduz a um implemento na eficiência de remoção de algas, especialmente quando há predominância de algas filamentosas (em torno de 90%);
- o aumento da taxa de filtração de 12 para 24 ou 36 m³/m².dia não acarretou prejuízo ao desempenho da unidade;
- houve uma tendência à redução da eficiência de remoção de algas quando ocorriam “picos” de turbidez e cor aparente no afluente

A observação de que o desempenho da unidade foi diferente para cada uma das espécies testadas sugere a importância do conhecimento da composição qualitativa da comunidade algal da água bruta.

Dos estudos de Di Bernardo e Rocha (1992), Aggio (1993) e Saidam e Butler (1996), verifica-se que a filtração em pedregulho apresenta um bom potencial para remoção de algas tanto em situações onde a água bruta apresenta valores consistentemente altos de teores de algas, como em situações onde ocorrem “picos” de concentração. Isso reforça a potencialidade do uso desse sistema como condicionador de águas de reservatórios e lagos a serem tratados por filtração lenta.

3.3 - IMPORTÂNCIA DA REMOÇÃO DE ALGAS NO TRATAMENTO DE ÁGUAS

A proliferação excessiva de algas em reservatórios de abastecimento de água tem tornado-se um fato cada dia mais comum. A crescente utilização de fertilizantes na lavoura e a descarga de efluentes domésticos e industriais nos corpos d'água têm promovido uma contínua modificação das características das águas dos mananciais de abastecimento, provocando o enriquecimento de nutrientes e o desenvolvimento de populações planctônicas.

A proliferação de algas nos mananciais pode acarretar sérios problemas, não só no tratamento como também na distribuição de água potável. A presença de grandes concentrações de algas, e sub-produtos resultantes de sua degradação, exercem enorme sobrecarga nos processos básicos de separação mais comumente utilizados (sedimentação e

filtração) no tratamento de água.

Algas de grande tamanho (diatomáceas) podem causar rápido entupimento nas camadas superiores dos filtros, aumentando a necessidade de constantes limpezas, reduzindo, assim, a capacidade de produção de água tratada. Pequenas algas (*Nitzschia*, *Synedra*, *Chlamidomonas*, *Euglena Navicula* e *Phacus*), devido à sua forma, tamanho ou mobilidade, por outro lado, podem atravessar os filtros provocando problemas nos estágios posteriores de tratamento e/ou no sistema de abastecimento, comprometendo a qualidade da água a ser consumida.

Os problemas associados a presença de algas na água (bruta e/ou tratada) são apresentados por Lacerda (1997). Alguns desses problemas são listados a seguir:

- Sabor e odor

Algumas algas e seus sub-produtos produzem desagradáveis odores e podem imprimir indesejável sabor à água, tornando-se necessário, em algumas situações, introduzir na seqüência de tratamento filtros de carvão ativado para remoção de odor e sabor, encarecendo o custo de tratamento da água.

- Formação de Trihalometanos

Pesquisas desenvolvidas a partir da década de 70, mostram que a cloração de algumas águas levam à formação de diversos sub-produtos clorados, entre os quais os chamados trihalometanos (THM). Os efeitos da ingestão de tais produtos na saúde humana ainda não são totalmente conhecidos, entretanto está comprovado que o clorofórmio, um dos mais comuns dos trihalometanos, é potencialmente cancerígeno. Estudos recentes sugerem que, além das substâncias húmicas, às quais tradicionalmente se atribui a formação de THM, as algas também se constituem em potenciais precursores de trihalometanos. Isso reforça algumas evidências estatísticas que mostram uma correlação entre concentrações de algas na água afluenta e concentrações de THM na água tratada. Nesse sentido, Echelberger *et al.* (1971, *apud* Lacerda, 1997) sugerem que a remoção de alga deve ser seriamente considerada antes da cloração da água ou dos efluentes de águas residuárias.

- Corrosão no sistema de abastecimento

A presença de materiais orgânicos, tais como algas e seus sub-produtos dissolvidos, na rede de distribuição de água, pode promover o crescimento de microrganismos, resultando tanto em corrosão da tubulação, como na deterioração da qualidade bacteriológica da água.

- Espécies tóxicas

Certas substâncias tóxicas produzidas por algumas espécies de algas podem afetar a saúde do homem, constituindo-se em um problema de saúde pública. Esses efeitos podem variar de distúrbios intestinais (diarréias e vômitos) a danos orgânicos, disfunção neuro-muscular, hepáticas e morte (como no recente caso de pacientes de hemodiálise em Caruaru-PE).

É importante ressaltar que certa quantidade de algas na superfície de coesão do filtro lento é importante, pois elas têm papel importante na atividade biológica que ocorre nessas unidades (Di Bernardo, 1993).

É sabido também que a presença de algas na água afluenta aos filtros lentos causam a sua rápida obstrução, já que tais unidades utilizam areia com granulometria fina, impondo a necessidade de limpeza freqüente, operação que causa grande impacto na atividade biológica do filtro causando redução na qualidade bacteriológica da água (Wegelin, 1991). Varesche (1989 *apud* Di Bernardo, 1993) confirma essa afirmação mas também verifica que algumas espécies são capazes de penetrar no leito filtrante mais profundamente. Essa observação, por sua vez, confirma a possibilidade de que algumas espécies, dotadas de maior mobilidade, sejam capazes de atravessar o leito filtrante e permanecerem na água tratada. A Tabela 3.13 apresenta as espécies de algas associadas aos diversos problemas relatados acima.

Tabela 3.13 - Algas que causam problemas na água de abastecimento.

Algas que produzem lodo:
<i>Anacystis</i> (<i>Aphanocapsa</i> , <i>Gloecapsa</i>) (Azul); <i>Batrachospermum</i> (Vermelha); <i>Chaetophora</i> (Verde); <i>Cymbella</i> (Diatomácea); <i>Euglena sanguínea var furcata</i> (Flagelado); <i>Gloeotrichia</i> (Azul); <i>Gomphonema</i> (Diatomácea); <i>Oscillatoria</i> (Azul); <i>Palmell</i> (Verde); <i>Phormidium</i> (Azul); <i>Spirogyra</i> (Verde); <i>Tetraspora</i> (Verde)
Algas que causam coloração na água:
<i>Anacystis</i> (Azul); <i>Ceratium</i> (Flagelado); <i>Chamydomonas</i> (Flagelado); <i>Chorella</i> (Verde); <i>osmarium</i> (Verde); <i>Euglena orientalis</i> (Flagelado); <i>Euglena rubra</i> (Flagelado); <i>Euglena sanguínea</i> (Flagelado); <i>Oscillatoria prolifica</i> (Azul); <i>Oscillatoria rubescens</i> (Azul).
Algas persistentes no sistema de distribuição:
<i>Anacystis</i> (Azul); <i>Asterionella</i> (Diatomácea); <i>Chlorella</i> (Verde); <i>Chlorococcum</i> (Verde); <i>Closterium</i> (Verde); <i>Coelastrum</i> (Verde); <i>Cosmarium</i> (Verde); <i>Cyclotella</i> (Diatomácea); <i>Dinobryon</i> (Flagelado); <i>Elakatothrix gelatinosa</i> (Verde); <i>Epithemia</i> (Diatomácea); <i>Euglena</i> (Flagelado); <i>Gomphosphaeria aponina</i> (Azul); <i>Scenedesmus</i> (Verde); <i>Synedra</i> (Diatomácea).

Tabela 3.13 – Continuação

Algas tóxicas de água doce:

Anabaena (Azul); *Anabaena circinalis* (Azul); *Anabaena flos-aquae* (Azul); *Anabaena lemmermanni* (Azul); *Anacystis* (*Microcystis*) (Azul); *Anacystis cyanea* (*Microcystis aeruginosa*) (Azul); *Anacystis cynea* (*Microcystis flo-aquae*) (Azul); *Anacystis cynea* (*Microcystis tóxica*) (Azul); *Aphanizomenon flos-aquae* (Azul); *Gloetrichia echinulata* (Azul); *Gloetrichia pisum* (Azul); *Gomphosphaeria lacustris* (Azul); *Coeloshaerium kuetzinglanum* (Azul); *Lyngbva contorta* (Azul); *Nodularia spumigena* (Azul); *Rivularia fluitans* (Azul)

Algas que causam corrosão do concreto:

Anacystis (*Chrococcus*) (Azul); *Chaetophora* (Verde), *Diatoma* (Diatomácea); *Euglena* (Flagelado); *Phormidium* (Azul); *Phytoconis* (*Protococcus*) (Verde).

Algas que interfere na coagulação:

Anabaena (Azul); *Asterionella* (Diatomácea); *Euglena* (Flagelado); *Gomphosphaeria* (Azul); *synedra* (Diatomácea).

Algas que causam corrosão no aço:

Oscillatoria (Azul).

Algas que diminuem a dureza da água:

Anabaena (Azul); *Aphanizomenon* (Azul); *Cosmarium* (Verde); *Scenedesmus* (Verde); *Synedra* (Diatomácea).

Algas aquáticas parasitas:

Oodinium ocellatum (Dinoflagelado); *Oodinium limneticum* (Dinoflagelado).

Algas que causam obstrução de filtros lentos:

Anabaena flos-aquae (Azul); *Anacystis dimidata* (Azul); *Oscillatoria amphibia* (Azul); *Oscillatoria chalybea* (Azul); *Oscillatoria ornata* (Azul); *Oscillatoria princeps* (Azul); *Oscillatoria pseudogeminata* (Azul); *Rivularia dura* (Azul); *Chlorella pyrenoidosa* (Verde); *Closterium moniliferum* (Verde); *Spirogyra porticalis* (Verde); *Tribonema bombycinum* (Verde); *Ulothrix variabilis* (Verde); *Palmella mucosa* (Verde); *Asterionella formosa* (Diatomácea); *Cyclotella meneghiniana* (Diatomácea); *Cymbella ventricosa* (Diatomácea); *Diatoma vulgare* (Diatomácea); *Fragilaria crotonensis* (Diatomácea); *Melosira granulata* (Diatomácea); *Melosira varians* (Diatomácea); *Navicula graciloides* (Diatomácea); *Navicula lanceolata* (Diatomácea); *Nitzschia palea* (Diatomácea); *Synedra acus* (Diatomácea); *Synedra pulchella* (Diatomácea); *Tabellaria fenestrata* (Diatomácea); *Peridinium wisconsinense* (Diatomácea); *Trachelomonas aebea* (Flagelado pigmentado)

Fonte: Di Bernardo, 1993 e 1995 (adaptada).

No caso da presença de algas na água bruta afluente aos filtros lentos, a literatura tradicional recomenda o uso de micropeneiras (Ridley, 1967 *apud* Visscher *et al.*, 1996). A adoção deste tipo de pré-tratamento em áreas rurais ou regiões menos desenvolvidas pode comprometer uma das grandes vantagens da filtração lenta, que é a simplicidade de operação e a não utilização de equipamentos que exijam mão de obra especializada. Assim, é fundamental o desenvolvimento de sistemas simples de pré-tratamento que sejam aplicáveis a tais situações.

Os resultados promissores obtidos nos trabalhos de Di Bernardo e Rocha (1992) e Saidam e Butler (1996), ao mesmo tempo que mostram a potencialidade da pré-filtração em pedregulho no caso de águas contendo algas, reforçam a necessidade de avaliar melhor a aplicação desse pré-tratamento e de se buscar parâmetros de projeto específicos a serem utilizados nesse tipo de problema.

4 - METODOLOGIA

Para atingir os objetivos propostos, foi realizado um trabalho experimental utilizando uma instalação de Filtração em Múltiplas Etapas, em escala-piloto.

Essa estação piloto de tratamento piloto (ETA-piloto) é composta de um pré-filtro dinâmico de pedregulho (PFD), que alimenta dois pré-filtros com escoamento ascendente em camadas (PFA-1 e PFA-2). Cada pré-filtro com escoamento ascendente alimenta, respectivamente, um filtro lento (FL-1 e FL-2). Esse sistema foi instalado na Estação Experimental da Biologia, ao lado da Estação Hidrometeorológica do Departamento de Engenharia Civil da Universidade de Brasília, às margens do Lago Paranoá em Brasília-DF. A Figura 4.1 apresenta a localização, enquanto a Figura 4.2 mostra o arranjo físico da unidade piloto. A Figura 4.3 mostra uma vista geral da instalação.

Figura 4.1 - Localização da unidade piloto

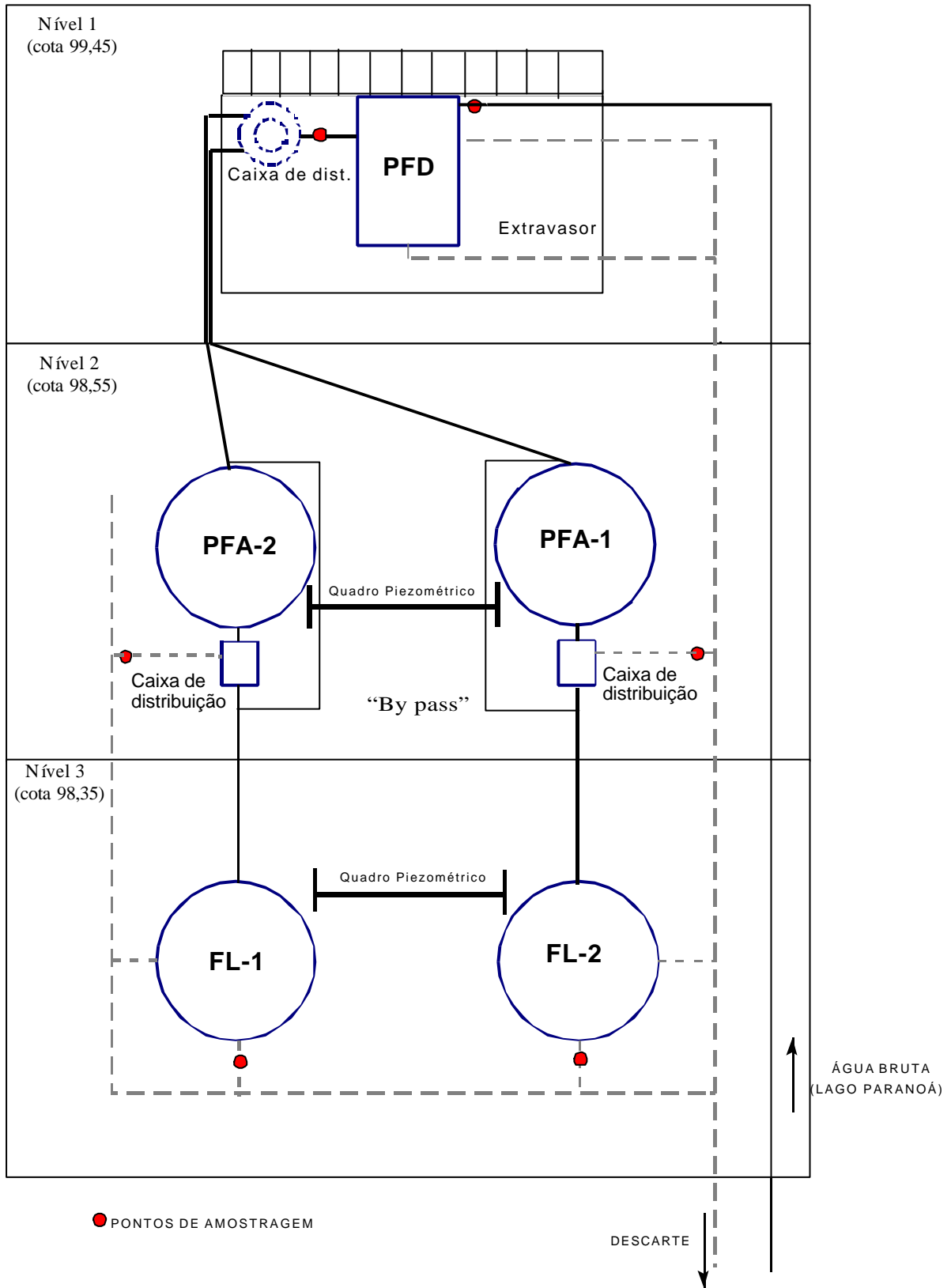


Figura 4.2 - Arranjo físico da unidade piloto

Figura 4.3 – Visão geral da instalação piloto.

4.1 - MONTAGEM DA ETA-PILOTO

Inicialmente, foi feita a preparação do terreno de forma que o mesmo apresentasse desníveis suficientes para permitir o escoamento da água, por gravidade, de uma unidade para outra. Assim, três níveis foram concebidos. No primeiro foi disposto o pré-filtro dinâmico sobre um pórtico metálico, no segundo nível, localizado em cota 0,9 m abaixo do primeiro, foram instalados os pré-filtros ascendentes (1 e 2) e, no terceiro nível, 0,2 m abaixo do segundo, foram colocados os filtros lentos (1 e 2).

Para a sustentação das unidades constituintes da ETA-piloto foram executadas, em cada nível, fundações do tipo estaca (moldadas “*in loco*”) com 3,0 m de profundidade. Sobre essas estacas, foram construídos blocos de concreto de 0,3 m de altura que serviram de suporte para as diversas unidades.

As unidades componentes do sistema foram construídas em chapa metálica de 3,0 mm de espessura e foram submetidas a um tratamento superficial (pintura com tinta Epoxi) para diminuir o efeito da corrosão.

Para a interligação hidráulica das unidades, utilizou-se tubulação de PVC soldável, com exceção das junções com os registros onde foram utilizados PVC rosqueável. Terminada a instalação hidráulica, foi feita a verificação de vazamentos sendo que alguns problemas foram detectados e sanados. É importante lembrar que na instalação hidráulica foram previstas linhas de “by-pass” para as diversas unidades (como mostrado na Figura 4.2) para permitir alterações na seqüência do tratamento. Os detalhes da instalação hidráulica dos pré-filtros ascendentes que permitem as alterações na seqüência do tratamento é ilustrado na Figura 4.4.

Figura 4.4 - Detalhes da instalação hidráulica dos pré-filtros ascendentes.

O material granular para compor os meios filtrantes das diversas unidades foi fornecido em sacos de 50 kg separados por faixas granulométricas. O material mais grosseiro foi lavado utilizando-se jatos d’água sob pressão para a retirada dos finos da superfície dos grãos e posterior submersão para separação dos materiais com densidade menor que a da água (pedaços de madeira, *etc.*) que, ao flutuarem, foram retirados manualmente. O material de granulometria mais fina foi lavado colocando-se uma certa quantidade do material (cerca a 50 kg) em uma caixa d’água de 250 litros, e introduzia-se água no sentido ascensional durante o tempo necessário para que a água de lavagem apresentasse visualmente clarificada. Esse

material foi submetido a uma segunda lavagem dentro dos próprios filtros.

Os materiais filtrantes dos pré-filtros ascendentes foram colocados com auxílio de escadas internas (tipo marinheiro) até que atingissem a altura pré determinada de cada sub-camada. A camada suporte dos filtros lentos foi colocada da mesma maneira que as sub-camadas dos pré-filtros ascendentes. Após a colocação da camada suporte, foi introduzida água no sentido ascensional e, em seguida, foi colocada areia, tomando-se o cuidado de não compactar o material. Terminada a colocação da areia, novamente introduziu-se água lentamente no sentido ascensional para retirar o ar no interior do meio filtrante.

4.2 - DESCRIÇÃO DA INSTALAÇÃO PILOTO

4.2.1 - Sistema de captação

A água utilizada nos estudos era proveniente do Lago Paranoá (Brasília-DF). Esse lago recebe os esgotos tratados (tratamento terciário) oriundos de duas estações de tratamento apresentando elevados níveis de nutrientes, coliformes e algas.

Em geral, os lagos apresentam variações tanto de parâmetros físicos e químicos, como hidrobiológicos com a profundidade. Assim, procurou-se conceber um sistema de captação que permitisse a adução da água à uma profundidade constante de aproximadamente 40 cm abaixo do nível da água. Como o nível da água do Lago Paranoá varia significativamente ao longo do ano, adotou-se um sistema “manifold” como mostrada na Figura 4.5. Durante a operação da ETA-piloto apenas uma das derivações do “manifold” era mantida aberta, aquela cerca de 40 cm abaixo do nível d’água, enquanto as demais eram mantidas fechadas (ver Figura 4.5). A água assim captada é bombeada constantemente através de uma bomba centrífuga de potência de 1,5 C.V. e conduzida por tubulação de 2” até a unidade de pré-filtração dinâmica.

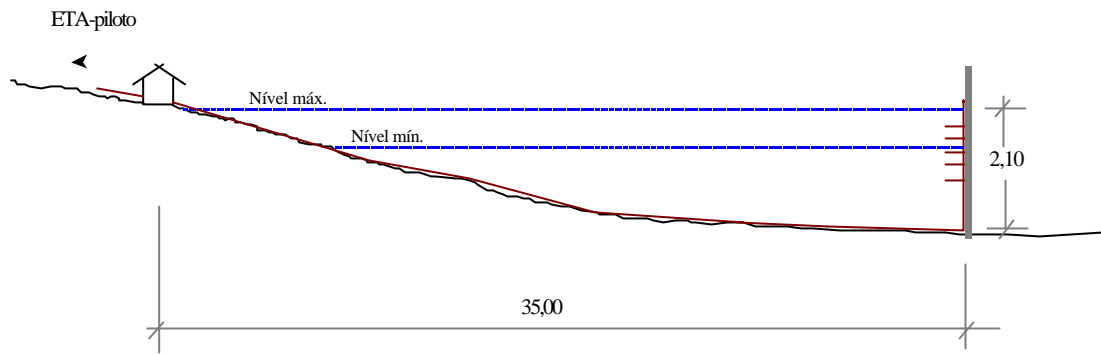


Figura 4.5 - Esquema do sistema de captação da água no Lago Paranoá (unidades em metros)

Figura 4.6 - Detalhe das derivações do “manifold.”

4.2.2 - Pré-filtro dinâmico (PFD)

O pré-filtro dinâmico constitui-se basicamente de uma caixa retangular com as dimensões mostradas na Figura 4.7.

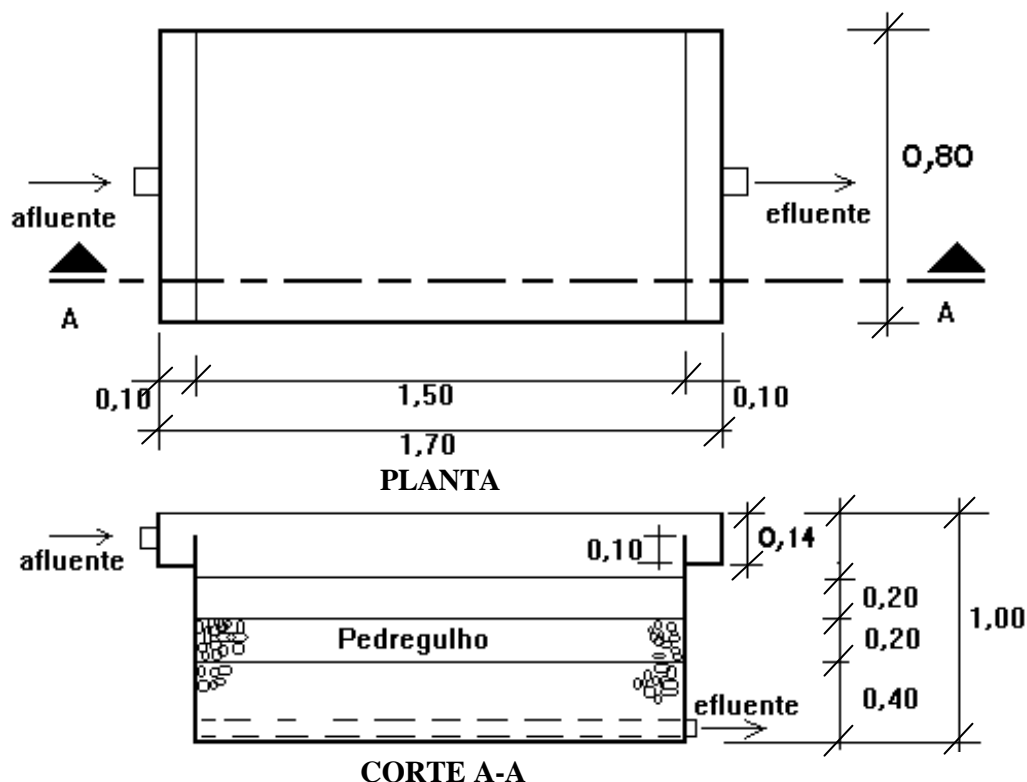


Figura 4.7 - Pré-filtro dinâmico: dimensões (em metros) e principais detalhes

O meio filtrante é composto por três camadas de material granular de composição granulométrica crescente na direção do escoamento, de forma que o material mais fino localiza-se no topo e o mais grosseiro no fundo.

A composição granulométrica adotada foi sugerida por Di Bernardo (1996) e é mostrada na Tabela 4.1. A taxa de filtração adotada durante o trabalho experimental no pré-filtro dinâmico foi fixa de $36 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$.

Tabela 4.1 - Composição granulométrica do pré-filtro dinâmico

Camada	Espessura (m)	Granulometria (mm)
Topo	0,2	6,4 a 12,7
Intermediária	0,2	12,7 a 19,0
Fundo	0,4	19,0 a 25,4

Para a coleta da água filtrada nessa unidade foi adotado um sistema de drenagem de fundo que consiste de uma tubulação de 2" de diâmetro com orifícios de 1/4" e que atende a disposição sugerida por Galvis e Fernandez (1991) para pré filtros dinâmicos com largura entre 0,8 a 1,5 m (Figura 4.8).

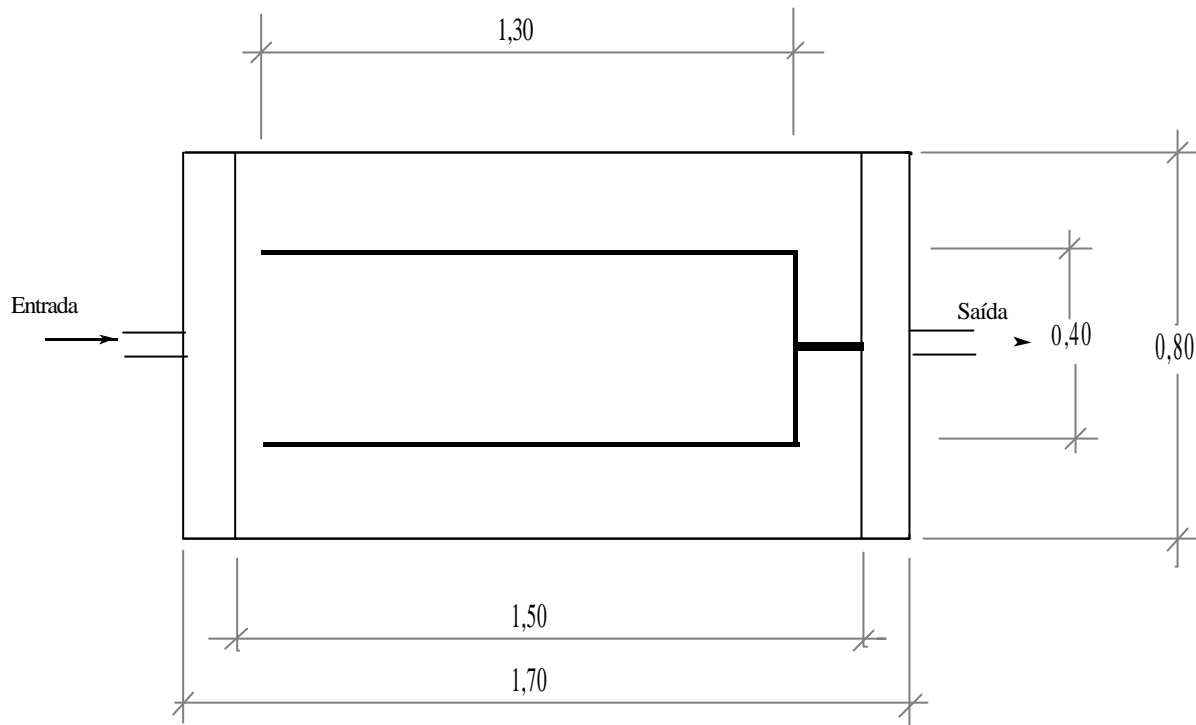


Figura 4.8 - Esquema da disposição da tubulação de drenagem de fundo do pré filtro dinâmico (dimensões em metro)

O efluente do pré-filtro dinâmico é encaminhado para uma caixa cilíndrica, dotada de um vertedor tubular concêntrico, que distribui as vazões para os pré-filtros ascendentes, sendo o excesso de água continuamente descartado. Nessa caixa a carga hidráulica é mantida constante e a vazão de saída para cada um dos pré-filtros ascendentes é controlada por meio de registros tipo “globo”. Durante os experimentos, essas vazões eram monitoradas através de medições volumétricas com auxílio de cronômetro e recipiente graduado. A Figura 4.9 mostra a disposição do pré-filtro dinâmico, suas interligações hidráulicas e a caixa de distribuição.

Figura 4.9 - Vista do pré-filtro dinâmico e caixa de distribuição para os pré filtros com escoamento ascendente.

Para ter-se melhor acesso ao pré-filtro dinâmico, foi construída uma escada e plataforma de madeira. O pórtico metálico foi contraventado com barras de aço soldadas na direção de menor estabilidade.

4.2.3 - Pré-filtros ascendentes (PFA-1 e PFA-2)

Os pré-filtros com escoamento ascendentes consistem em unidades cilíndricas de fundo cônico com 0,80 m de diâmetro e altura total de 2,30 m, sendo 1,50 m ocupados pelo material filtrante. A Figura 4.10 apresenta um desenho esquemático dos pré-filtros ascendentes.

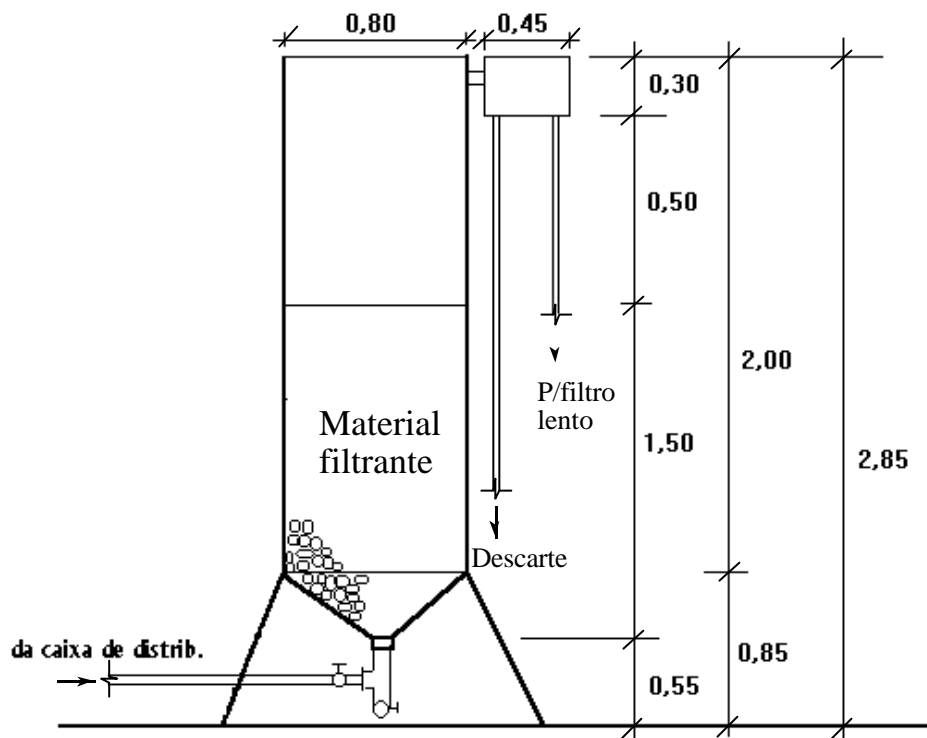


Figura 4.10 - Esquema dos pré-filtros ascendentes (unidade em metros).

Para permitir o estudo da influência da composição granulométrica das diversas camadas de pedregulho que compõem o meio filtrante dos pré-filtros ascendente, foram utilizados os dois arranjos distintos de sub-camadas, como mostrado na Tabelas 4.2.

Tabela 4.2 - Composição granulométrica dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 (PFA-1 e PFA-2).

Camada	Pré-filtro ascendente 1 (PFA-1)		Pré-filtro ascendente 2 (PFA-2)	
	Espessura (m)	Granulometria (mm)	Espessura (m)	Granulometria (mm)
Topo	0,4	3,2 a 6,4	0,3	1,4 a 3,2
Intermediária superior	0,4	7,9 a 12,7	0,3	3,2 a 6,4
Intermediária			0,3	9,6 a 15,9
Intermediária inferior	0,4	15,9 a 25,4	0,3	19,0 a 25,4
Fundo	0,3	31,4 a 50,0	0,3	31,4 a 50,0

Com o objetivo de se possibilitar a análise da contribuição individual de cada camada no desempenho dos pré-filtros ascendentes, foram colocados pontos de coleta de amostra nas interfaces de cada sub-camada do meio filtrante. Nesses pontos de coleta, foram colocados tubos perfurados de cobre de aproximadamente 5mm de diâmetro e 35 cm de comprimento (ver Figura 4.11) com a finalidade de se obter uma amostra mais representativa.

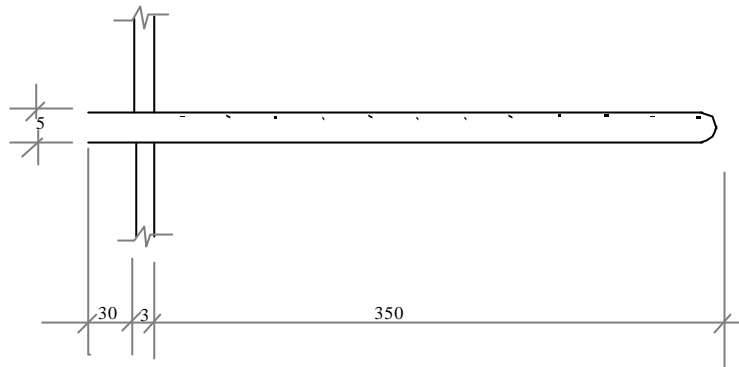


Figura 4.11 - Tubo para coleta de amostras do pré-filtro ascendente (dimensões em mm)

O efluente dos pré-filtros ascendentes é coletado através de tubulação de 2" de diâmetro, dotada de orifícios de 1/4", situada na parte superior da unidade, sendo, em seguida, encaminhado a uma caixa de distribuição de vazão que alimenta os filtros lentos.

Essa caixa de distribuição de vazão era inicialmente provida de um vertedor triangular para monitorar a vazão afluyente aos filtros lentos. Com a posterior instalação de rotâmetros na linha afluyente aos filtros lentos, dispensou-se a utilização desse vertedor.

Sendo a vazão afluyente aos filtros lentos inferior à efluente dos pré-filtros ascendentes, faz-se necessário o descarte de uma parte do efluente produzido nesses pré-filtros. Esse descarte é feito na parte anterior ao vertedor triangular.

Durante a 1ª carreira de filtração as vazões afluentes aos filtros lentos foram controladas através da abertura e fechamento do registro de descarte, sendo a vazão afluyente aos filtros lentos obtida pela diferença entre efluente produzido pelos PFAs e as determinações volumétricas realizadas no descarte. Pelas dificuldades encontradas nessa forma de monitoramento, durante a 2ª carreira de filtração, optou-se por controlar a vazão afluyente aos filtros lentos, pela abertura e fechamento do registro de saída da caixa de distribuição, porém com medidas volumétricas de vazão realizadas diretamente na entrada da unidade. Para a 3ª carreira de filtração foram colocados rotâmetros à montante das unidades de filtração lenta.

Os pré-filtros ascendentes e os filtros lentos foram dotados de tomadas de pressão para a medida da perda de carga nas referidas unidades. Nos pré-filtros ascendentes, essas tomadas de pressão foram situadas entre cada camada constituinte do meio filtrante

Nos pré-filtros ascendentes, foram adotadas as taxas de 12 e 18 $\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$. A taxa de filtração foi variada com o objetivo de estudar a influência desse parâmetro de projeto/operação na remoção de algas. A Figura 4.12 mostra os pré-filtros ascendentes, as caixas de distribuição e o quadro piezométrico dessas unidades.

Figura 4.12 - Caixas de distribuição e quadro piezométrico dos pré-filtros ascendentes.

4.2.4 - Filtros lentos (FL-1 e FL-2)

Os filtros lentos constituem-se em unidades cilíndricas de 2,75 m de altura e 0,80 m de diâmetro preenchido com 1,15 m de material granular, sendo, 0,70 m de meio filtrante e 0,45 m de camada suporte. Os Filtros lentos operaram com taxas de filtração de 6 e 3 m³/m².dia. Um esquema desse filtro é apresentado na Figura 4.13.

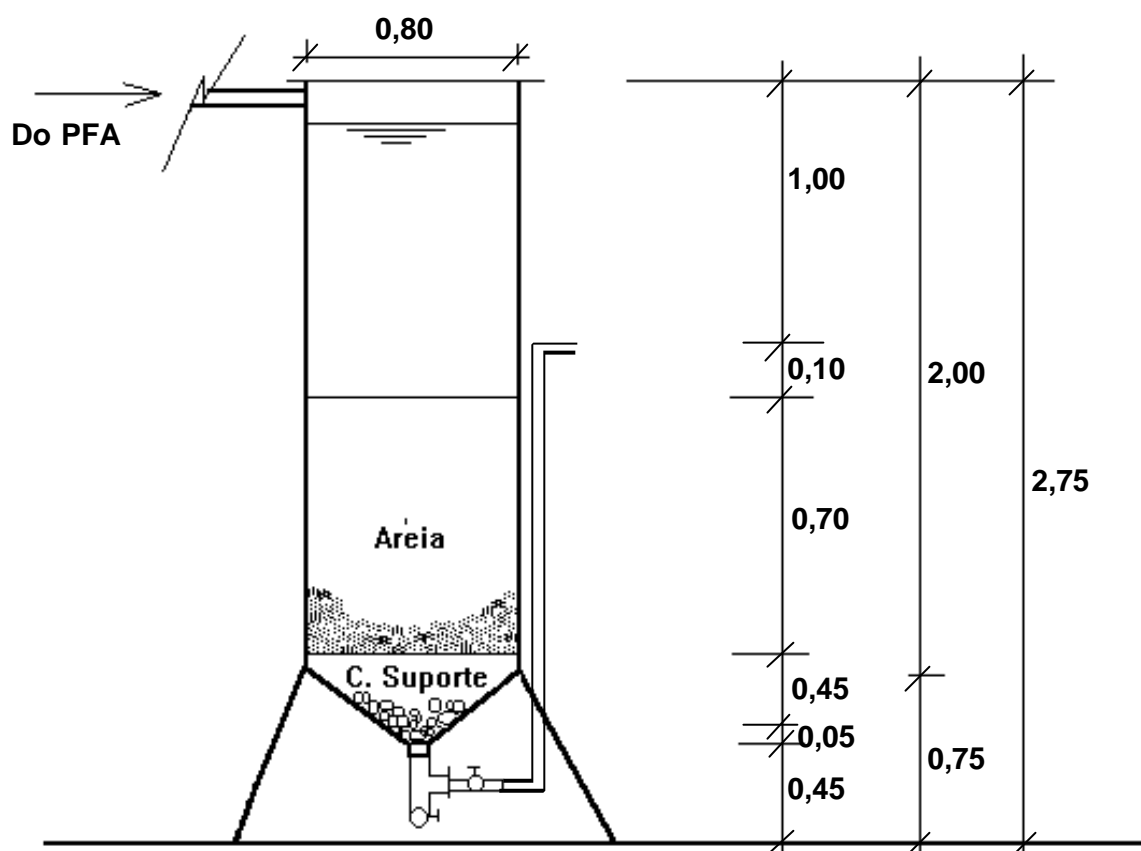


Figura 4.13 – Esquema das unidades de filtração lenta (unidades em metros).

A areia adotada como meio filtrante das unidades de filtração lenta apresenta as características granulométricas recomendadas por Galvis *et al.* (1991) e Di Bernardo (1993), com exceção ao que se refere ao diâmetro efetivo, que esses autores recomendam que esteja entre 0,15 e 0,30 mm. A Figura 4.14 mostra a curva de distribuição granulométrica da areia e a Tabela 4.3 apresenta a composição granulométrica adotada para essas unidades.

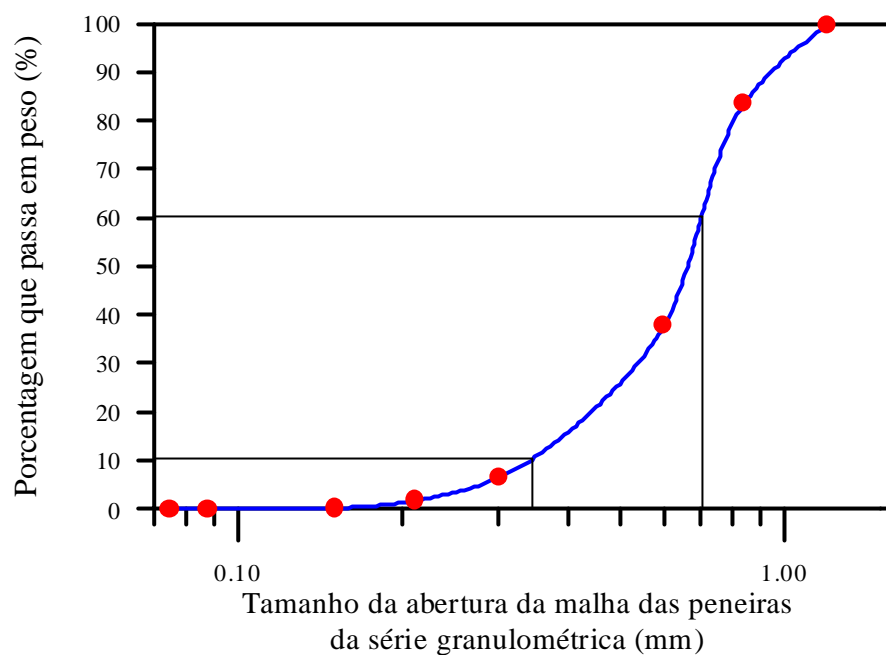


Figura 4.14 - Curva de distribuição granulométrica da areia

Tabela 4.3 - Composição granulométrica dos filtros lentos (FL-1 e FL-2).

Filtro lentos 1 e 2	
Meio filtrante	
Espessura da camada (m)	0,70
Tamanho dos grãos (mm)	0,08 - 1,00
Tamanho efetivo (mm)	0,34
Coefficiente de desuniformidade	2,0
Camada suporte	
Espessura (m)	Granulometria (mm)
0,075	1,41 a 3,20
0,075	3,20 a 6,40
0,075	7,90 a 12,70
0,075	15,90 a 25,40
0,150	31,40 a 50,00

Os filtros lentos foram dotados de 9 pontos de tomadas de pressão, sendo menos espaçados no início do meio filtrante. Nos pontos de ligação das mangueiras nos filtros lentos, foi colocada uma malha fina para evitar a perda de material (areia) através das mangueiras. A Figura 4.15 mostra o quadro piezométrico das unidades de filtração lenta e os pontos de ligação das mangueiras no filtro.

Figura 4.15 – Quadro piezométrico das unidades de filtração lenta.

A instalação hidráulica de saída dessa unidade foi realizada de forma que o efluente seja descartado 10 cm acima do meio filtrante com o objetivo de impedir o esvaziamento do filtro quando da interrupção de sua alimentação (ver Figura 4.13).

4.3 - DESENVOLVIMENTO DO TRABALHO EXPERIMENTAL

Como parte do desenvolvimento do trabalho experimental foram realizadas 3 carreiras de filtração (experimentos) cujas as condições operacionais são descritas no item 5.2 do capítulo de resultados.

Ao longo de cada carreira de filtração a água bruta captada no lago era bombeada até o pré-filtro dinâmico, onde, em função das características operacionais desse pré-filtro, parte da água percola pelo meio filtrante e parte era descartada, retornando ao Lago Paranoá. A fração que infiltrava, que corresponde a vazão efluente do PFD, era encaminhada ao dispositivo de distribuição de vazões (vertedor circular concêntrico). Além de distribuir as vazões para as unidades de pré-filtração ascendente esse dispositivo permite descartar o excesso de água efluente do pré-filtro dinâmico. Também nesse ponto eram realizadas as coletas de amostras do efluente da unidade de pré-filtração dinâmica.

A alimentação de cada pré-filtro ascendente era realizada pela parte inferior da unidade, sendo o efluente foi coletado na sua parte superior através de tubulação perfurada e encaminhado para a caixa de distribuição. Em função das taxas de aplicação adotadas nos pré-filtros ascendentes e filtros lentos, apenas uma fração do efluente dos pré-filtros ascendentes era encaminhada para o filtro lento, ao passo que o restante era descartado, retornando para o Lago Paranoá. Na tubulação de descarte dessas unidades foi instalado uma torneira que permitia a coleta de amostras de água tratada nos pré-filtros ascendentes.

Os filtros lentos eram alimentados pela parte superior por meio chuveiros para melhor distribuir o afluente sobre a área do filtro. O efluente dos filtros lentos também era encaminhado para o Lago Paranoá. A coleta de amostras da água tratada nessas unidades era realizada na linha de saída da unidade descrita no item anterior.

Para monitorar a eficiência do tratamento em suas diversas etapas, e no todo, amostras de água foram coletadas, como visto, na entrada e saída de cada unidade da ETA-piloto. Os parâmetros de qualidade da água que foram analisados, a frequência de amostragem, as metodologias e os equipamentos utilizados são mostrados na Tabela 4.4. Foram adotadas as metodologias propostas pelo “Standard Methods” (APHA *et al.*, 1995) para a determinação dos parâmetros de qualidade, sendo que em algumas situações, adaptações foram feitas em função do equipamento utilizado.

O procedimento para a determinação do teor de clorofila-a seguiu a Normalização Técnica L5.306 (CETESB, 1978), que baseia-se na extração, em solvente orgânico, da clorofila-a retida em filtro de microfibras de vidro de 1,2 µm de poro. A concentração de clorofila-a é determinada em função da diferença entre a densidade ótica obtida no comprimento de onda de 663 nm, antes e após a acidificação (correção para feofitina).

A contagem de algas foi realizada por uma bióloga, que utilizou as instalações do Laboratório de Limnologia da CAESB – Companhia de Água e Esgotos de Brasília, e adotou a metodologia lá utilizada. Uma descrição sucinta da metodologia é mostrada no Apêndice C.

Tabela 4.4 - Parâmetros de qualidade da água que foram medidos, as frequências de amostragem e os métodos e equipamentos utilizados.

Parâmetro	Frequência	Método/equipamento	Carreira
Temperatura (°C)	Diária	Termômetro de mercúrio	1 ^a , 2 ^a e 3 ^a
pH	Diária	Medidor potenciométrico Schotte-Gerät	1 ^a , 2 ^a e 3 ^a
Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)	Semanal	Titulação com ácido sulfúrico 0,02 N	2 ^a
Condutividade (µS/cm)	3 vezes/semana	Condutímetro Sprite 600	2 ^a e 3 ^a
Cor verdadeira (uC)	Semanal	Colorimétrico Espectrofotômetro Hach - DR 4000	3 ^a
Dureza (mg CaCO ₃ /L)	Semanal	Volumétrico EDTA	2 ^a
Ferro total (mg Fe/L)	Semanal	Fenantrolina/Colorimétrico Espectrofotômetro Micronal B380	2 ^a
Fósforo total (mg PO ₄ ⁻³ /L)	Semanal	Digestão ácida com persulfato/colorimétrico Espectrofotômetro Hach - DR 4000	3 ^a
Nitrato (mg NO ₃ -N/L)	Semanal	Redução com cádmio/colorimétrico Espectrofotômetro Hach - DR 4000	3 ^a
Nit. amoniacal (mg NH ₃ -N/L)	Semanal	Reagente de Nessler/colorimétrico Espectrofotômetro Hach - DR 4000	
Turbidez (uT)	Diária	Nefelométrico Turbidímetro Micronal B250 e Hach 2100 P	1 ^a , 2 ^a e 3 ^a
DQO (mg O ₂ /L)	Semanal	Digestão em refluxo fechado dicromato/color. Espectrofotômetro Hach - DR 4000	3 ^a
Algas – Clorofila-a (µg/L)	3 vezes/sem.	Extração com solvente / colorimétrico Espectrofot. Micronal B380 e Hach DR 4000	1 ^a , 2 ^a e 3 ^a
Algas – Biomassa (mg/L)	Semanal	Decantação em câmara Utermol Microscópio invertido	2 ^a e 3 ^a
Coli. Tot. e Fecais (NMP/100ml)	Semanal	Fermentação em Tubos Múltiplos	2 ^a e 3 ^a

As frequências indicadas na Tabela 4.4 basearam-se, inicialmente, nas recomendações propostas por Leland e Logsdon (1991). A determinação dos parâmetros: temperatura, pH, alcalinidade, dureza, ferro total, fósforo, manganês, nitrogênio e oxigênio dissolvido permitirão avaliar as condições ambientais de sustentabilidade do ecossistema de cada unidade; enquanto que a determinação de turbidez, algas (clorofila-a e biomassa), DQO,

coliformes totais e fecais, cor aparente e verdadeira servirão para avaliação da eficiência das mesmas.

Além dos parâmetros de qualidade de água, foram realizadas, diariamente, controle da vazão nas diversas unidades da ETA- piloto e leituras piezométricas da perda de carga nos pré-filtros ascendentes e filtros lentos.

É importante salientar que o período experimental teve uma fase de pré-operação que foi caracterizada pelos primeiros ajustes dos equipamentos, detecção e controle dos vazamentos, verificação do comportamento hidráulico das unidades e das condições de fluxo, e realização das modificações necessárias. Os testes hidráulicos foram ,realizados antes e após a colocação e a acomodação do meio filtrante.

Os dados obtidos durante o trabalho experimental, foram armazenados em planilha eletrônica. Ao final de cada carreira de filtração foi realizada uma análise estatística descritiva, onde foram determinados, basicamente, a média, o desvio padrão, o coeficiente de variação e os valores máximos e mínimos encontrados. Também foram analisadas, para cada determinação de clorofila-a , turbidez, cor verdadeira, DQO e coliformes fecais, as eficiências de remoção atingidas por cada unidade, sendo que para esses resultados, também foi realizada a análise estatística descritiva.

Ao final do trabalho experimental, de posse de todos os resultados obtidos durante as três carreiras de filtração, os resultados relativos a turbidez e clorofila-a foram submetidos a testes de hipótese (Análise de Variância) e à comparações entre as médias observadas com a utilização do Teste de Tukey, com o objetivo principal de se comparar o desempenho obtido pelas unidades componentes do sistema nas diversas condições testadas. Uma descrição sucinta dos testes adotados é apresentada no Apêndice B, item B.1.

Para aplicação desses testes é necessário que os dados se ajustem a uma distribuição Normal. Para a verificação do ajuste dos dados obtidos à uma função de distribuição Normal, optou-se por aplicar o teste de Kolmogorov-Smirnov que, embora não seja o mais indicado para aplicação nos casos em que os parâmetros da função de distribuição acumulada são estimados a partir da amostra, apresenta, nesses casos, resultados conservadores (Pinto *et al.*, 1976). Ou seja, quando a aplicação do teste indicar boa aderência dos dados a uma distribuição Normal, significa que, em se aplicando outro teste de aderência, a probabilidade de se concluir o contrário é pequena.

5 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 - INTRODUÇÃO

Esse capítulo propõe-se a apresentar e discutir os resultados obtidos durante a fase experimental do trabalho.

Inicialmente será apresentado um resumo das condições adotadas nas três carreiras de filtração. Em seguida, serão mostrados e discutidos os resultados obtidos para turbidez e clorofila-a, em cada carreira de filtração, dando ênfase ao desempenho de cada unidade em separado e comparando, com destaque, o desempenho obtido nos dois pré-filtros ascendentes (PFA-1 e PFA-2). Na seqüência serão apresentados também, os resultados obtidos para os demais parâmetros medidos.

Finalmente será feita uma análise comparativa do comportamento do sistema durante a 2ª e a 3ª carreira de filtração.

5.2 - CONDIÇÕES TESTADAS

Durante o período de realização dos experimentos a água bruta proveniente do Lago Paranoá apresentou-se com valores de turbidez variando de 3,7 a 19,7 uT enquanto que o teor de clorofila-a variou de 3,5 a 61,4 µg/l, sendo o valor médio igual a $33,7 \pm 13,8$ µg/l. Os valores de turbidez podem ser considerados baixos enquanto o teor médio de clorofila-a é característico de águas de lagos considerados eutróficos. De acordo com Palmer (1959, *apud* Di Bernardo 1993) um corpo de água pode ser considerado eutrófico quando apresenta valores de clorofila-a superiores a 10 µg/l.

Para a primeira carreira de filtração foram adotadas, para cada unidade, as taxas de filtração mostradas na tabela a seguir.

Tabela 5.1 - Taxas de filtração adotadas para a primeira carreira de filtração.

Unidades componentes do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	Vazão (m ³ /dia)
Pré-Filtro Dinâmico (PFD)	36	30,0
Pré-Filtro Ascendente 1 (PFA-1)	18	35,8
Pré-Filtro Ascendente 2 (PFA-2)	18	35,8
Filtro Lento 1 (FL-1)	6	11,9
Filtro Lento 2 (FL-2)	6	11,9

Essa primeira parte do trabalho caracterizou-se por apresentar subsídios para as tomadas de decisões com relação às eventuais necessidades de ajustes e, principalmente, permitir a familiarização quanto ao comportamento das unidades componentes do sistema. Nesse sentido, procurou-se avaliar a pertinência das taxas de filtração e os procedimentos operacionais adotados.

A partir da análise dos resultados obtidos nessa fase, optou-se por adotar, nos experimentos posteriores, as taxas de filtração mostradas na Tabela 5.2.

Tabela 5.2 - Taxas de filtração para as diferentes unidades do sistema adotadas durante a 2^a e a 3^a carreira de filtração.

Unidades componentes do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)		Vazão (m ³ /dia)	
	2 ^a carreira	3 ^a carreira	2 ^a carreira	3 ^a carreira
Pré-Filtro Dinâmico (PFD)	36	36	30,0	30,0
Pré-Filtro Ascendente 1 (PFA-1)	12	18	23,9	35,8
Pré-Filtro Ascendente 2 (PFA-2)	12	18	23,9	35,8
Filtro Lento 1 (FL-1)	3	3	6,0	6,0
Filtro Lento 2 (FL-2)	3	3	6,0	6,0

A opção de se mudar a taxa de filtração nos filtros lentos de 6 para 3 m³/m².dia originou-se do fato de que durante a 1^a carreira de filtração essas unidades apresentaram carreiras de filtração bastante curtas. Segundo Di Bernardo (1997), em filtros lentos sem manta sintética, taxas de filtração mais conservadoras geralmente são necessárias.

5.3 - PRIMEIRA CARREIRA DE FILTRAÇÃO

Durante a primeira carreira de filtração, a turbidez da água bruta variou de 3,7uT a 12,0 uT enquanto a clorofila-a variou de 29,0 µg/l a 52,9 µg/l apresentando um valor médio de 39,6 µg/l.

A Tabela 5.3 mostra a taxa de filtração, o tempo de funcionamento e a perda de carga atingida por cada unidade do sistema durante a 1^a carreira de filtração. É importante observar que o experimento foi interrompido em função do comportamento dos filtros lentos em relação à perda de carga, porém os pré-filtros ascendentes tinham carga hidráulica disponível para operarem por períodos de tempo mais longos. Após apenas 7 dias de funcionamento os filtros lentos atingiram a perda de carga limite e, optou-se por retirar os filtros lentos de operação sem, porém, interromper o funcionamento das demais unidades componentes do sistema. Os filtros lentos foram submetidos a

limpeza através da raspagem da superfície do meio filtrante e posteriormente recolocados em operação. Nesta segunda fase, os filtros continuaram apresentando um desenvolvimento acentuado da perda de carga, embora menor que na fase anterior.

Tabela 5.3 - Taxa de filtração, tempo de funcionamento e perda de carga atingida pelas diferentes unidades componente do sistema durante a 1ª carreira de filtração.

Unidades componentes do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .dia)	Tempo de funcionamento (dia)	Perda de carga atingida (cm)
Pré-Filtro Dinâmico (PFD)	36	20	
Pré-Filtro Ascendente 1 (PFA-1)	18	20	0,5
Pré-Filtro Ascendente 2 (PFA-2)	18	20	2,6
Filtro Lento 1 (FL-1)	6	7 e 7	105 e 30,7
Filtro Lento 2 (FL-2)	6	7 e 7	85 e 62,4

Durante essa carreira, o PFD apresentou uma eficiência de remoção média de turbidez de 32,5 % chegando a atingir um valor máximo de 66,2% de remoção. A Figura 5.1 mostra os valores de turbidez da água bruta e do efluente do PFD obtidos durante a primeira carreira de filtração.

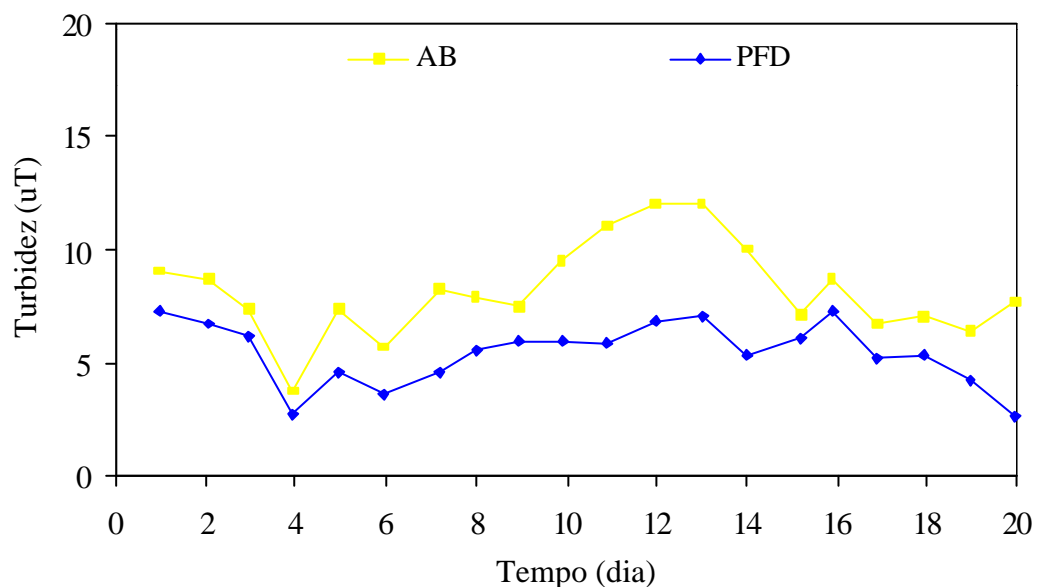


Figura 5.1 – Valores de turbidez afluyente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 1ª carreira de filtração.

O teor médio de clorofila-a na saída dessa unidade foi de 29,8 µg/l sendo a eficiência de remoção média de 25,4%, chegando a atingir 38,5%. A Figura 5.2 apresenta os valores de clorofila-a da água bruta e do efluente do PFD obtidos durante a primeira carreira de filtração.

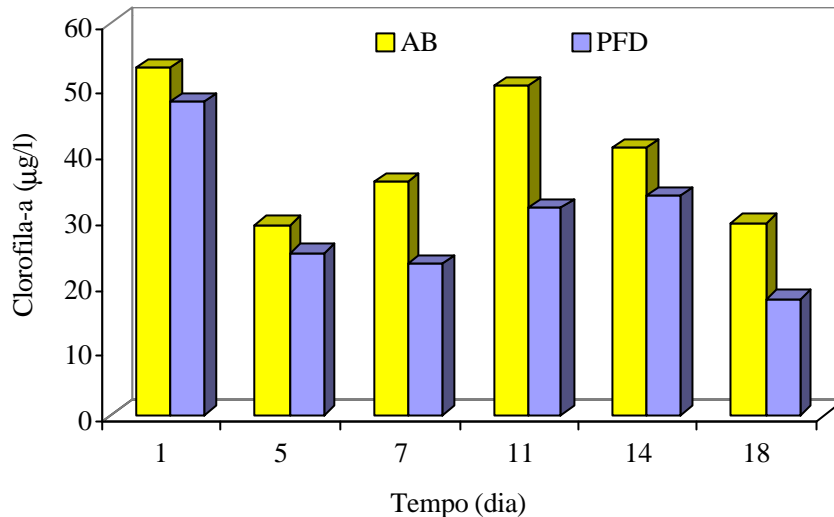


Figura 5.2 - Teores de clorofila-a afluente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 1^a carreira de filtração.

Essa unidade apresentou problemas operacionais demonstrando a necessidade de ajustes hidráulicos, como por exemplo, a colocação de um dispositivo que impedisse o seu esvaziamento quando da interrupção do fluxo de água bruta em função da ocorrência de falta de energia elétrica provocadas, principalmente, por descargas atmosféricas. Apesar desses problemas percebeu-se, nessa unidade, uma tendência de acréscimo na eficiência de remoção de turbidez e de clorofila-a no decorrer do tempo de funcionamento, sugerindo a existência de um período de “amadurecimento,” evidenciando o que já foi preconizado por diversos autores, entre eles Visscher *et al.* (1996), que atribuem parte da eficiência dos pré-filtros de pedregulhos à atividade biológica.

Nessa carreira de filtração, 90% das medidas de turbidez do efluente do PFA-1 apresentaram-se com valor inferior a 5 uT enquanto que a totalidade das medidas realizadas no efluente do PFA-2 apresentou-se com valor menor que esse limite. Os teores médios de clorofila-a no efluente do PFA-1 e PFA-2 foram, respectivamente, 23,1 µg/l e 16,5 µg/l. O PFA-2 apresentou efluente com valores de turbidez e clorofila-a consistentemente mais baixos do que o efluente do PFA-1. Tal comportamento pode ser observado nas Figuras 5.3 e 5.4 que se seguem.

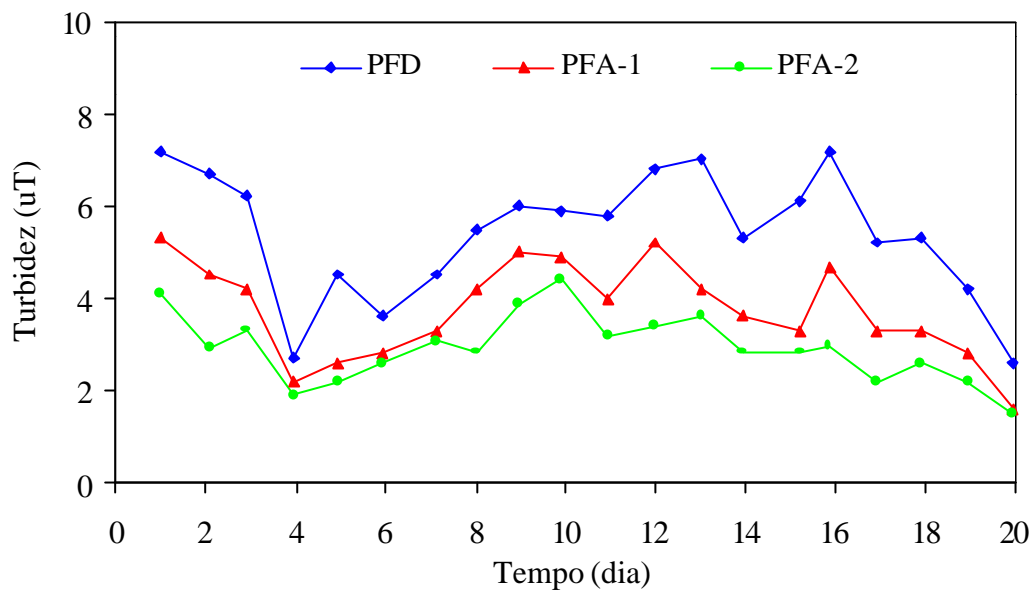


Figura 5.3 – Valores de turbidez afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 1ª carreira de filtração.

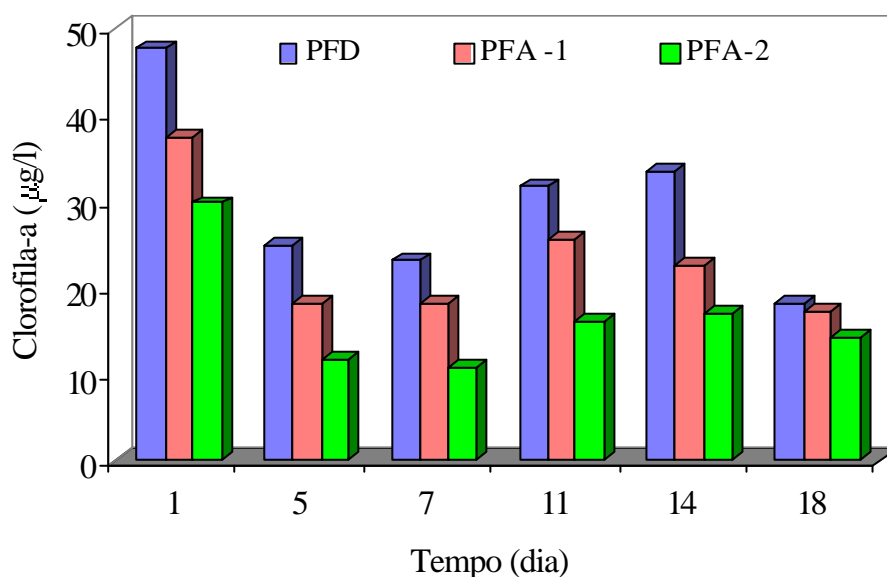


Figura 5.4 - Teores de clorofila-a afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração.

O valor médio da eficiência de remoção de turbidez obtida no PFA-1 foi de 30,6%, enquanto no PFA-2 foi de 44,9%. Da Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiências de remoção de turbidez dessas unidades verifica-se que o PFA-2 apresentou, em média, eficiência de remoção de turbidez estatisticamente superior ao PFA-1 durante a primeira

carreira de filtração, a um nível de significância de 5%. A análise estatística encontra-se detalhada no Apêndice B.

O PFA-2 apresentou-se consistentemente mais eficiente que o PFA-1 também com relação à remoção de clorofila-a, sendo que da Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a nessas unidades é possível concluir que, em média, o PFA-2 apresentou-se estatisticamente mais eficiente que o PFA-1 na remoção de clorofila-a, a um nível de significância de 5% (resultados apresentados no Apêndice B). A Tabela 5.4 apresenta os valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante essa carreira de filtração. É importante lembrar que o cálculo da eficiência de remoção média foi feito tomando-se a média das eficiências de remoção obtidas em cada dia durante toda a carreira de filtração.

Tabela 5.4 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 1ª carreira de filtração.

	Eficiência de remoção de turbidez (%)		Eficiência de remoção de clorofila-a (%)	
	PFA-1	PFA-2	PFA-1	PFA-2
Média	30,6	44,9	21,2	44,2
Máxima	45,9	58,3	33,0	53,5

A eficiência dessas unidades, com relação à remoção de turbidez, apresentou-se, em média, menor que as eficiências atribuídas aos pré-filtros ascendentes por diversos autores (Vissher *et al.*, 1996, Di Bernardo, 1991 entre outros). Saliencia-se porém, que essas unidades trabalharam com valores de turbidez afluentes relativamente baixos, o que deve ter contribuído para o desempenho relativamente baixo dessas unidades, visto que, de uma forma geral, a eficiência dessas unidades de pré-tratamento aumentam com a piora da qualidade da água afluente.

A Figura 5.5 apresenta, para dias específicos, a diferença entre valores de turbidez e clorofila-a afluentes e efluentes de cada pré-filtro ascendente.

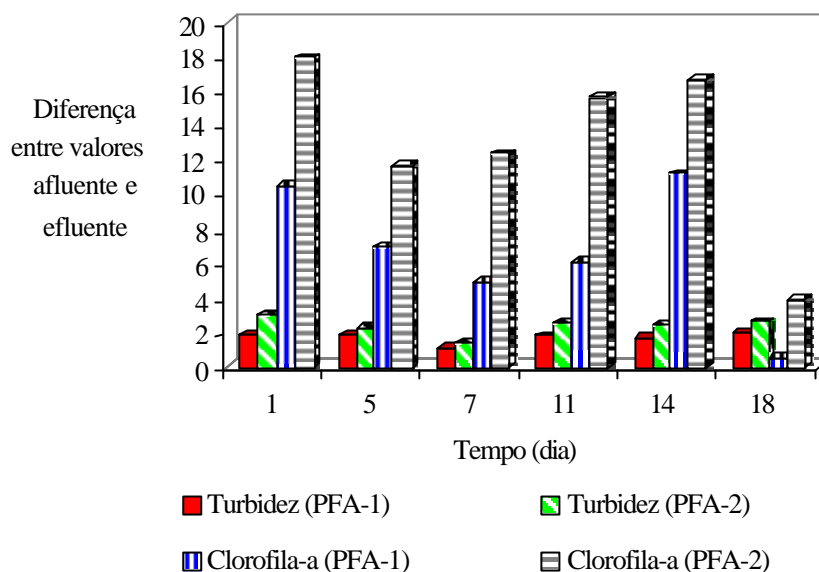


Figura 5.5 – Diferença entre os valores de turbidez e clorofila-a afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração

Da análise das Figuras 5.3, 5.4 e 5.5 destaca-se o melhor desempenho do PFA-2, particularmente no que tange à clorofila-a, lembrando que esse pré-filtro é constituído de 5 camadas, com camada de topo de granulometria mais fina que o PFA-1. Observa-se também nessas figuras, uma tendência de melhora de eficiência de retenção de material passados os primeiros dias de operação dos pré-filtros. Esse comportamento sugere a existência de um “período de amadurecimento” semelhante ao verificado no pré-filtro dinâmico.

Os pré-filtros ascendentes (assim como o PFD) operaram durante 20 dias e a perda de carga desenvolveu-se de forma mais acentuada no PFA-2 tornando mais pronunciada com o decorrer do tempo de funcionamento. Após esse período de funcionamento, a perda de carga no PFA-2 atingiu cerca de 2,6 cm contra 0,5 cm no PFA-1. Essa perda de carga atingida pelos pré-filtros ascendentes representam menos de 5% da carga hidráulica disponível indicando a disponibilidade dessas unidades de operarem durante períodos de tempo mais longos. A Figura 5.6 mostra a evolução da perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a primeira carreira de filtração.

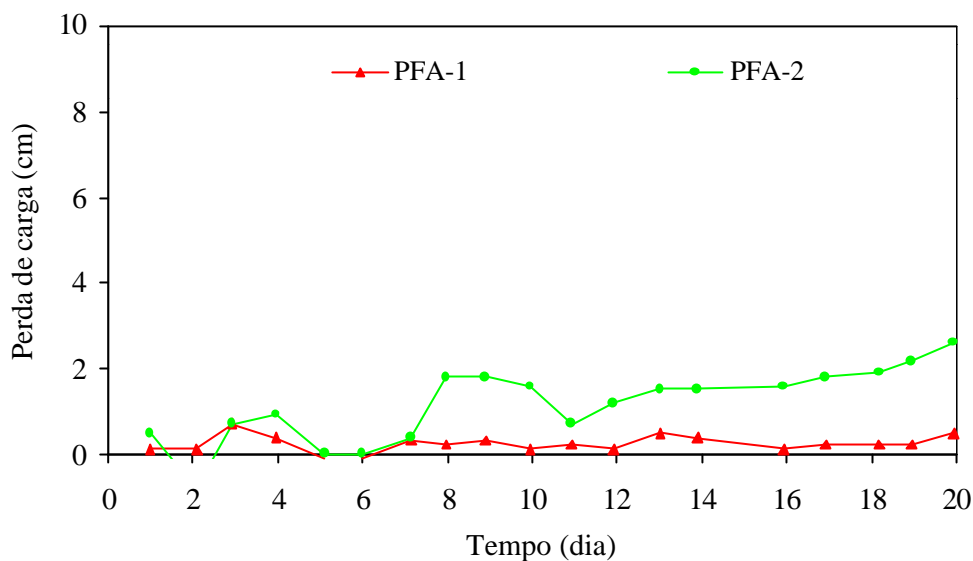


Figura 5.6 - Evolução da perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a 1ª carreira de filtração.

É importante ressaltar que essas unidades operaram com uma taxa de filtração de $18 \text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ que foi monitorada através de medições volumétricas da vazão e controladas através da abertura e fechamento de registro. Devido às dificuldades encontradas nessa forma de controle admite-se a ocorrência de variações da vazão e conseqüente oscilações na determinação da perda de carga.

Nessa primeira carreira de filtração os Filtros Lentos entraram em operação juntamente com as demais unidades componentes do sistema sendo que com apenas 7 dias de funcionamento atingiram a perda de carga de 105 cm no FL-1 e de 85 cm no FL-2 e foram retirados de operação e submetidas a limpeza. Posteriormente, foram recolocados em operação.

Os filtros lentos produziram efluentes com turbidez menor que 1 uT em 69% das determinações realizadas no FL-1 e em 62% das leituras realizadas no efluente do FL-2. A Figura 5.7 mostra os valores de turbidez efluente e afluente aos filtros lentos.

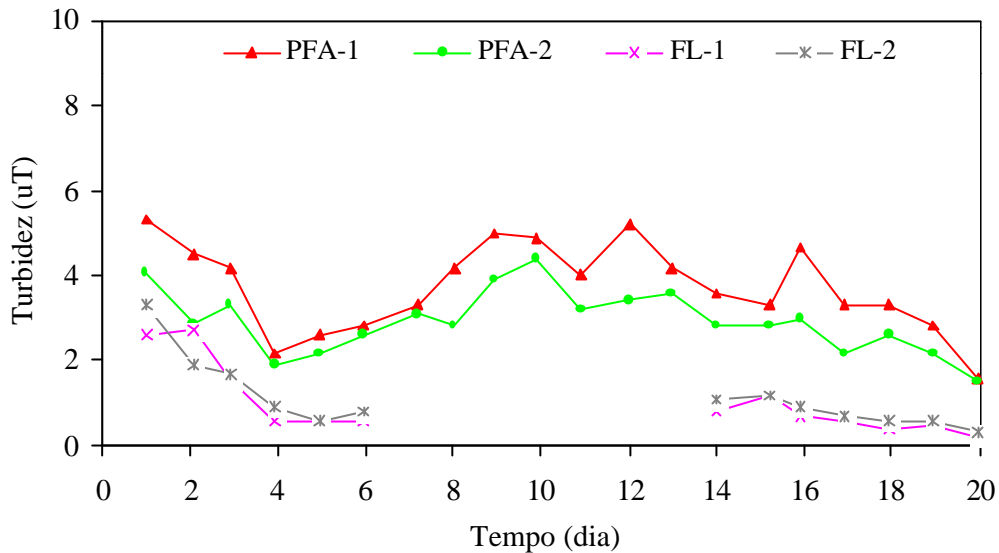


Figura 5.7 – Valores de turbidez afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração.

Os filtros lentos apresentaram curta carreira de duração e alta eficiência de remoção, principalmente no que tange a clorofila-a. As poucas medidas de clorofila-a realizadas mostraram eficiências superiores a 90 % tanto no FL-1 como no FL-2, sendo que a eficiência total de remoção de clorofila-a do sistema (PFD ⇨ PFA ⇨ FL) chegou a atingir 97,2%. O efluente do FL-1 apresentou valor médio de clorofila-a de 1,7 µg/l e do FL-2 de 1,4 µg/l. A Figura 5.8 mostra os teores de clorofila-a efluente e afluente a essas unidades.

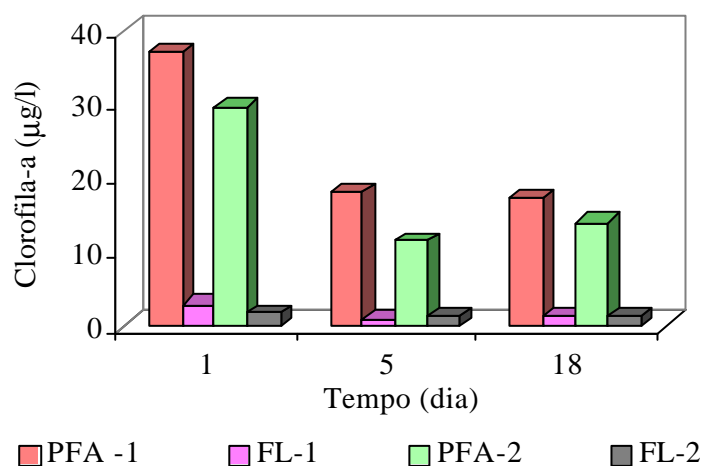


Figura 5.8 - Teores de clorofila-a afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 1ª carreira de filtração.

A tabela 5.5 apresenta as eficiências de remoção de turbidez média e máxima obtidas pelos filtros lentos 1 e 2 durante essa carreira de filtração. Tais estatísticas não são apresentadas para clorofila-a em função do número restrito de dados observados.

Tabela 5.5 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez obtidos nos filtros lentos 1 e 2 durante a 1ª carreira de filtração.

	Eficiência de remoção de turbidez (%)	
	FL-1	FL-2
Média	72,8	60,2
Máxima	87,9	80,8

Apesar da curta carreira de filtração, os filtros lentos apresentaram elevada eficiência de remoção de turbidez e clorofila-a. Nos dois períodos de funcionamento essas unidades apresentaram acréscimo na eficiência de remoção de turbidez com o tempo de funcionamento, sendo essa característica mais evidente no primeiro período de funcionamento. Esse comportamento está associado, provavelmente, à predominância dos fenômenos físicos de clarificação sobre os biológicos, com rápida colmatação da superfície do meio filtrante pelo mecanismo de peneiramento.

A Figura 5.9 mostra a evolução da perda de carga nos filtros lentos durante a primeira carreira de filtração.

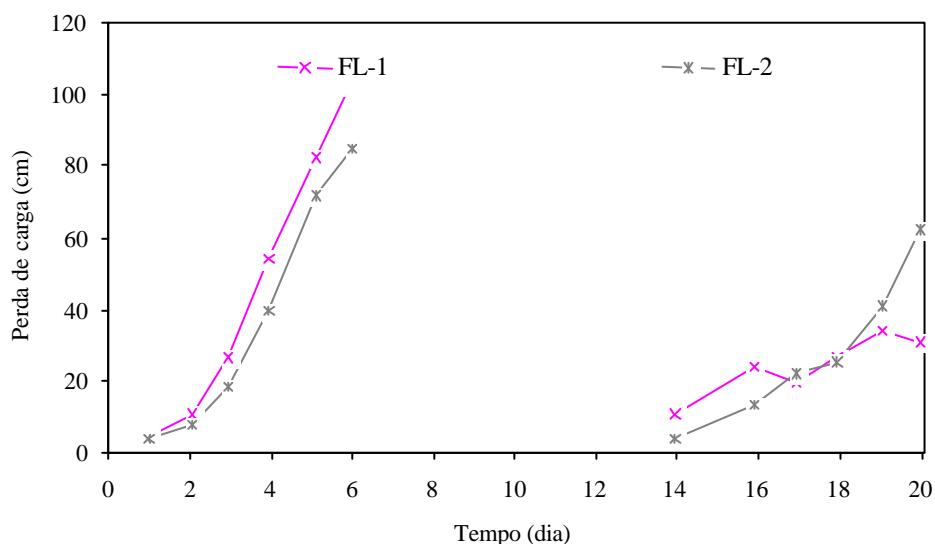


Figura 5.9 - Perda de carga nos filtros lentos durante a 1ª carreira de filtração.

Observa-se que o desenvolvimento da perda de carga nos filtros lentos ocorreu de forma mais acelerada no primeiro período de funcionamento do que no segundo, provavelmente devido ao fato de nessa segunda fase os filtros lentos passaram a receber um efluente de melhor qualidade, em função da melhoria da performance dos pré-filtros ascendentes após os primeiros dias de funcionamento.

Nota-se que o efluente produzido, tanto pelo PFA-1 quanto pelo PFA-2, apresentou valores de turbidez baixos, porém com teores de clorofila-a maiores que $5\mu\text{g/l}$, que é o valor limite recomendado por Cleasby (1991) para águas afluentes a filtros lentos, justificando a rápida obstrução do meio filtrante.

Da análise do comportamento das unidades componentes do sistema durante essa primeira carreira de filtração, alguns comentários podem ser feitos:

- o pré-filtro dinâmico provavelmente teve o seu desempenho prejudicado pela ocorrência de esvaziamentos durante os vinte dias de operação. A partir desse fato optou-se pela instalação de uma válvula solenóide na saída da unidade impedindo, dessa forma, o esvaziamento da unidade quando das interrupções do fornecimento de energia elétrica e a conseqüente interrupção do fornecimento de água bruta ao sistema;
- levando em conta fato dos pré-filtros ascendentes apresentarem uma tendência de desempenho crescente com o tempo de funcionamento e, ao mesmo tempo, os filtros lentos terem o seu meio filtrante obstruído de forma bastante rápida, optou-se por colocar, nas próximas carreiras de filtração, o filtro lento em funcionamento após os pré-filtros ascendentes terem vencido esse “período de amadurecimento”. Esse procedimento é diferenciado do que é sugerido pelos estudos da aplicação dessa tecnologia para o tratamento de água com elevados teores de turbidez, onde se recomenda que, no início de operação, o afluente à instalação seja encaminhado diretamente ao filtro lento com o objetivo de se evitar que as partículas maiores fiquem retidas nos pré-filtros. Segundo Di Bernardo (1993), o não atendimento a essa recomendação prolonga demasiadamente o “período de amadurecimento” do filtro lento e causa a penetração excessiva das partículas menores na camada de areia.

Na tentativa de se prolongar a carreira de filtração dos filtros lentos optou-se também por adotar, nas próximas carreiras, uma taxa de filtração, para essas unidades, de $3\text{ m}^3/\text{m}^2\cdot\text{dia}$.

Apesar dos problemas operacionais verificados nessa fase do trabalho experimental, observou-se o potencial de uso dessa tecnologia também ao tratamento de água com presença de algas, sendo que essa observação pode ser reforçada através da análise da Figura 5.10, que apresenta os teores de clorofila-a da água bruta e dos efluentes das diferentes unidades componentes do sistema.

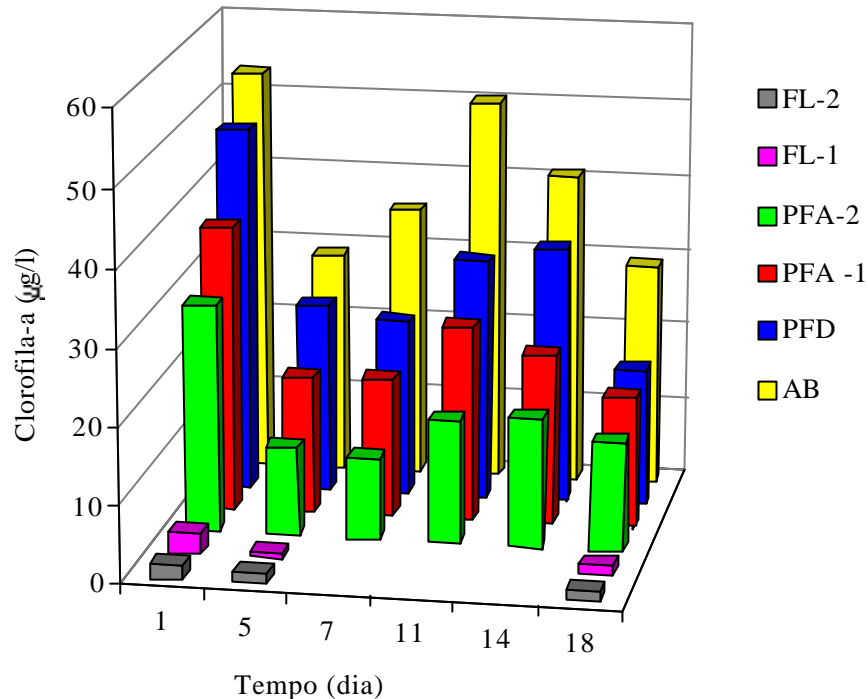


Figura 5.10 - Teores de clorofila-a da água bruta e dos efluentes das diferentes unidades componentes do sistema durante a 1ª carreira de filtração

5.4 - SEGUNDA CARREIRA DE FILTRAÇÃO

Durante a segunda carreira de filtração a turbidez da água bruta variou de 4,8 uT a 19,7 uT. O teor de clorofila-a variou de 3,5 µg/l a 52,3 µg/l, apresentando um valor médio de 31,2 µg/l. A Tabela 5.6 mostra a taxa de filtração, o tempo de funcionamento e a perda de carga atingida por cada unidade do sistema durante essa carreira de filtração.

Tabela 5.6 - Taxa de filtração, tempo de funcionamento e perda de carga atingida por cada unidade componente durante a 2ª carreira de filtração.

Unidades componentes do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .d)	Tempo de funcionamento (dia)	Perda de carga atingida (cm)
Pré Filtro Dinâmico (PFD)	36	57	--
Pré Filtro Ascendente 1 (PFA-1)	12	57	12

Pré Filtro Ascendente 2 (PFA-2)	12	57	37
Filtro Lento 1 (FL-1)	3	19	100
Filtro Lento 2 (FL-2)	3	36	110

A turbidez efluente do PFD variou de 1,9 a 7,3 uT, com um valor médio de eficiência remoção de 48,9%, chegando a valores de até 88,0%.

Na análise dos resultados é importante observar que o pré-filtro dinâmico pode servir tanto para a remoção contínua de sólidos, em casos onde a água bruta caracteriza-se por apresentar valores medianos de turbidez e sólidos suspensos, e não ser sujeita a variações bruscas de qualidade; quanto para a absorção de picos de turbidez, em águas sujeitas a variações significativas de sólidos de curta duração, mas que normalmente transportam pouco sólido (Galvis e Fernandez, 1991, Di Bernardo, 1993).

Embora se tenha trabalhado com água bruta com turbidez relativamente baixas e sem apresentar "picos", o pré-filtro mostrou-se, em média, com a eficiência de remoção de turbidez similar ao atribuído a essa unidade na literatura. Galvis *et al.* (1997), por exemplo, reporta que a remoção típica de turbidez observada para água superficiais na Colômbia varia de 30 a 50%. É importante ressaltar que, durante essa carreira de filtração, essa unidade não apresentou problemas frequentes de esvaziamentos como os observados durante a primeira carreira de filtração.

A Figura 5.11 mostra os valores de turbidez da água bruta e do efluente ao PFD obtidos durante a segunda a carreira de filtração.

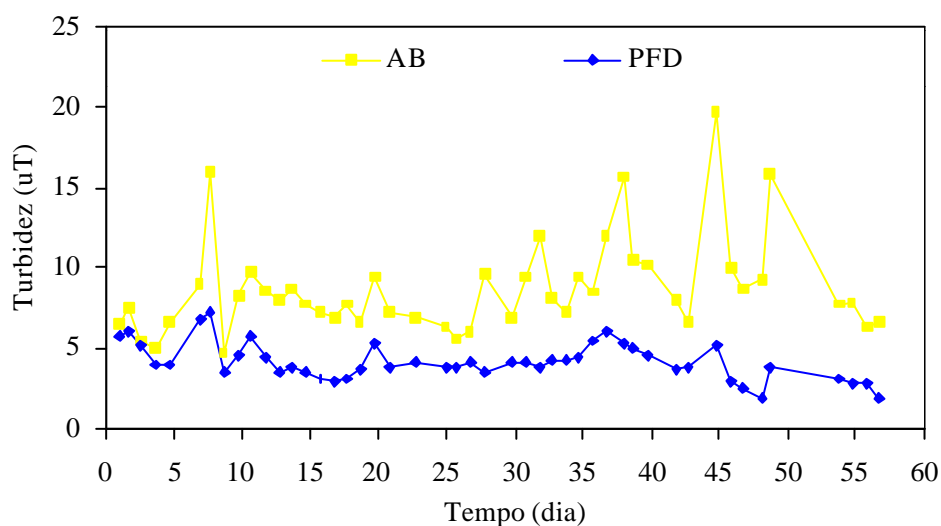


Figura 5.11 – Valores de turbidez afluyente e efluente do pré filtro dinâmico obtidos durante a 2ª carreira de filtração.

O pré-filtro dinâmico obteve uma eficiência de remoção média de clorofila-a de 41,4% chegando até o máximo de 75,3%, portanto inferior a remoção de turbidez observada acima. O efluente produzido variou na faixa de 1,3 a 30,3 µg/l. A Figura 5.12 mostra os valores de clorofila-a da água bruta e do efluente do PFD obtidos durante a segunda carreira de filtração.

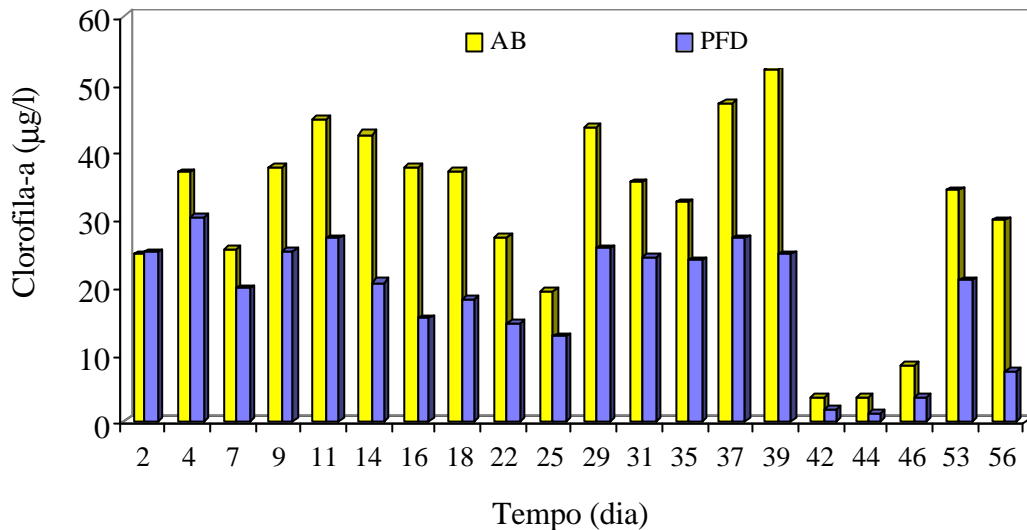


Figura 5.12 - Teores de clorofila-a afluente e efluente do pré filtro dinâmico obtidos durante a 2ª carreira de filtração.

Comparando-se as Figuras 5.11 e 5.12 observa-se que o PFD apresenta uma maior capacidade de absorver as variações de turbidez da água bruta do que as variações dos teores de clorofila-a. Ao mesmo tempo, verifica-se uma tendência de maior eficiência de remoção, tanto de turbidez quanto de clorofila-a quando a água bruta apresenta maiores valores dessas características.

A Figura 5.13 apresenta os valores de eficiência de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos, para dias específicos, ao longo do período de funcionamento do PFD. Percebe-se nessa unidade, agora de maneira mais nítida, uma tendência de acréscimo na eficiência de remoção de turbidez e de clorofila-a com o decorrer dos primeiros dias de funcionamento, reforçando a idéia da existência de um período de “amadurecimento” e sugerindo que a atividade biológica é um dos mecanismo de remoção atuante no pré filtro-dinâmico. Basicamente, existem dois fatores envolvidos na evolução do período de “amadurecimento”: a redução dos espaços vazios na camada mais superficial do meio granular, favorecendo os mecanismos de transporte e a colonização do depósito de matéria orgânica favorecendo os mecanismos biológicos.

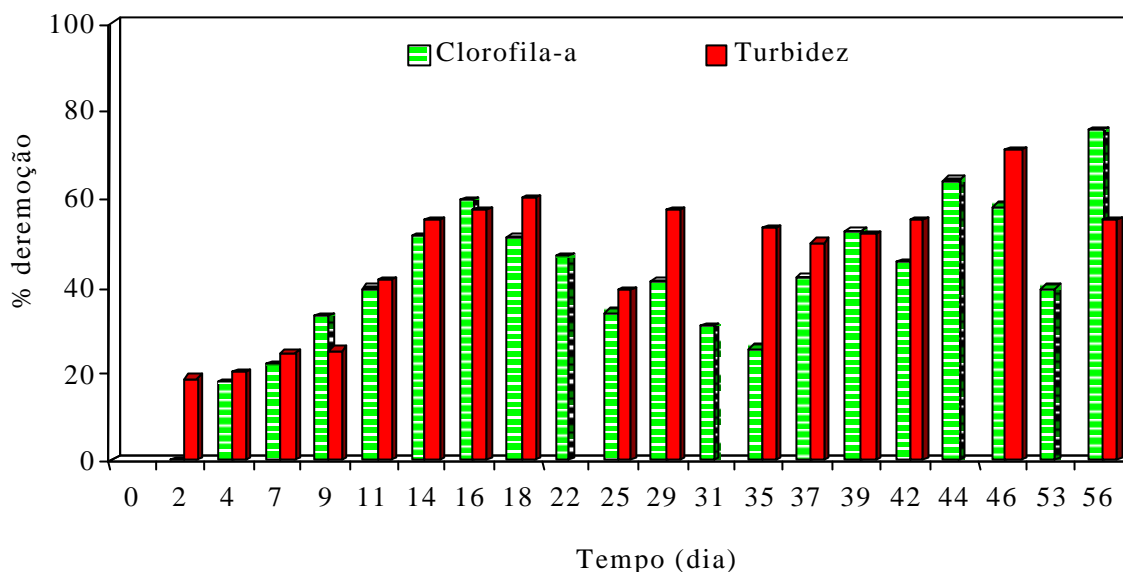


Figura 5.13 - Eficiências de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidas no pré filtro dinâmico durante a 2ª carreira de filtração.

O efluente dos pré-filtros ascendentes apresentaram valores de turbidez na faixa 0,2 a 5,1 uT para o PFA-1 e de 0,3 a 6,0 uT para o PFA-2. A Figura 5.14 apresenta os resultados de turbidez afluente e efluente a essas unidades durante essa carreira de filtração.

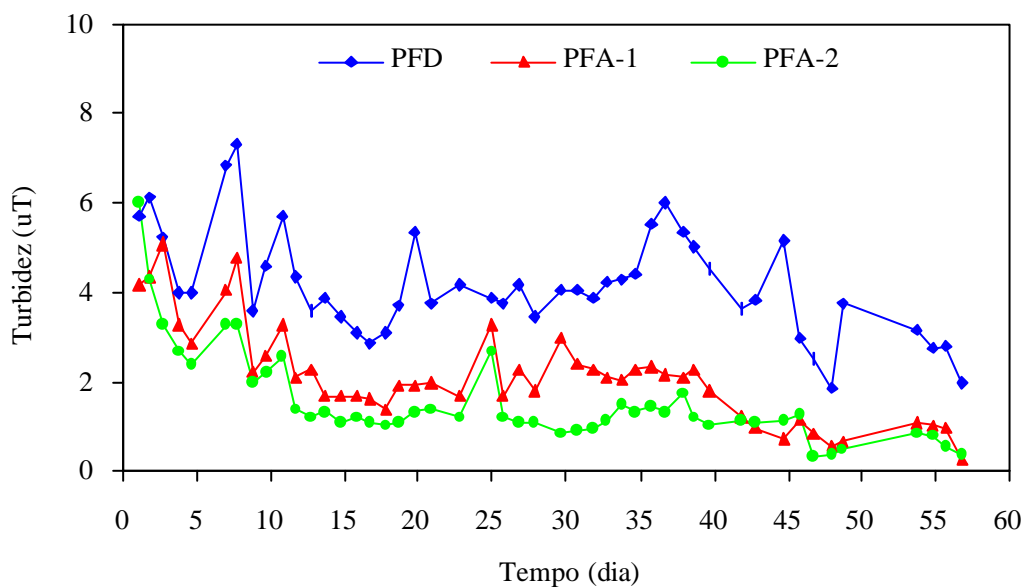


Figura 5.14 – Valores de turbidez afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 2ª carreira de filtração.

O PFA-2, mais uma vez, apresentou-se sistematicamente mais eficiente que o PFA-1. Tanto o PFA-1 como o PFA-2 apresentaram mais de 95% de seus valores de turbidez efluente menores que 2,5 uT, lembrando que o valor máximo recomendado por Cleasby (1991) para afluentes ao

filtro lento é de 5 uT, sendo que Di Bernardo (1993) apresenta como limite para esse parâmetro 10 uT. É importante ressaltar porém, que essas unidades trabalharam com turbidez afluyente com valores relativamente baixos como pode ser visto na Figura 5.14.

O teor médio de clorofila-a efluente dos pré-filtros ascendentes foi de 11,2 µg/l para o PFA-1 e de 6,8 µg/l para o PFA-2. A Figura 5.15, a seguir, apresenta os teores de clorofila-a afluyente e efluente dessas unidades durante a segunda carreira de filtração.

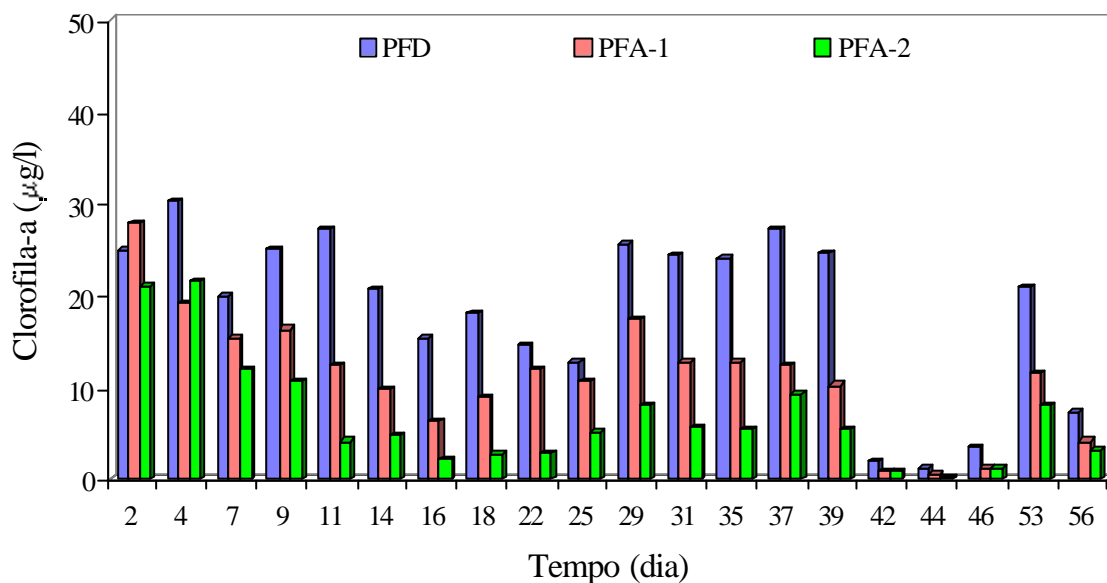


Figura 5.15 - Teores de clorofila-a afluyente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.

Similarmente ao observado para a turbidez, a água produzida pelo PFA-2 apresentou teores de clorofila-a consistentemente inferiores ao do PFA-1. Do efluente produzido pelo PFA-1 apenas 20% dos valores medidos apresentaram-se com teores de clorofila-a inferior a 5 µg/l, enquanto que 45% dos valores medidos do efluente do PFA-2 apresentaram concentração de clorofila-a menores que 5 µg/l, que é o teor máximo de clorofila-a recomendado por Cleasby (1991) em água afluyente a filtros lentos.

As eficiências de remoção média e máxima obtidas nos pré-filtros ascendentes em relação a turbidez e clorofila-a são apresentadas na Tabela 5.7. Confirmando o observado nas Figuras 5.14 e 5.15, o PFA-2 apresentou melhor desempenho que o PFA-1 tanto com relação à remoção de turbidez quanto como de clorofila-a, sendo que a Análise de Variância e a aplicação do Teste de

Tukey aos resultados obtidos mostraram que a diferença no desempenho nos dois casos é estatisticamente significativa (ao nível de significância de 5%). Os resultados obtidos nessa análise estatística encontram-se no apêndice B.

Tabela 5.7 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.

	Eficiência de remoção de turbidez (%)		Eficiência de remoção de clorofila-a (%)	
	PFA-1	PFA-2	PFA-1	PFA-2
Média	50,6	64,5	41,2	64,4
Máxima	87,7	88,1	63,7	85,4

O desempenho dessas unidades, com relação à remoção de turbidez, apresentou-se satisfatório quando se tem, como parâmetro de comparação, os resultados obtidos Visscher *et al.* (1996) que utilizaram pré filtros em camadas, com taxas de filtração variando de 7,2 a 18 m³/m².d. Entretanto, é importante ressaltar que esses autores trabalharam com valores de turbidez afluenta a unidade variando de 106 a 52 uT. Nesse caso, os autores obtiveram eficiências de remoção de turbidez variando de 46 a 71%.

No que tange a remoção de algas os resultados obtidos no presente trabalho mostraram-se inferiores aqueles apresentados por Di Bernardo e Rocha (1992) em trabalho realizado com pré-filtro ascendente em camadas, utilizando-se taxas de filtração variando de 12 a 36 m³/m².dia. Esses autores, analisando o comportamento dessas unidades principalmente frente a “picos” de algas, encontraram valores médios de eficiência de remoção variando de 65% a valores superiores a 90% em função da espécie de algas. Foi observado também, que os maiores valores de eficiência de remoção foram obtidos com concentrações de algas maiores. Em outro trabalho, Saidam e Butler (1996) encontraram eficiências de remoção de algas variando de 31 a 61%, trabalhando com pré-filtro com escoamento horizontal em série e efluente de lagoas de estabilização com elevados teores de algas.

Observa-se, ainda, na Tabela 5.7, que a diferença de eficiência entre os pré-filtros ascendentes é mais pronunciada na remoção de clorofila-a do que na remoção de turbidez, indicando que a camada de granulometria mais fina atua de forma mais efetiva na remoção de algas,

e mostrando a importância da seleção de parâmetros de projeto de acordo com as características da água a ser tratada.

Essas unidades apresentaram, como pode ser visto nas Figura 5.16.a e 5.16.b, um contínuo aumento na eficiência de remoção, tanto de turbidez quanto de clorofila-a, durante as primeiras duas semanas, sendo que, a partir daí, essa tendência tornou-se menos evidente.

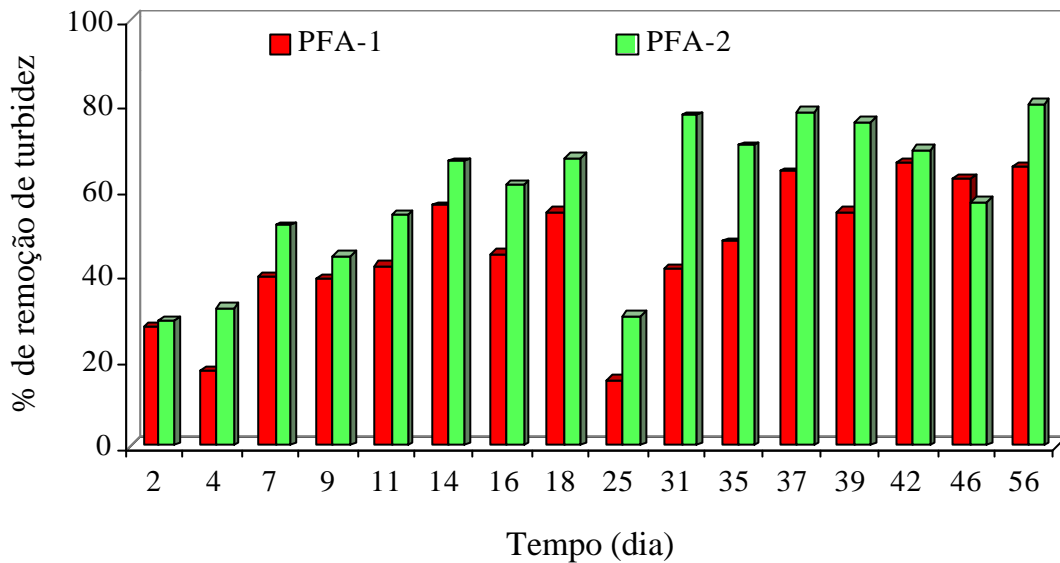


Figura 5.16.a - Eficiência de remoção de turbidez dos pré-filtros ascendentes na 2ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.

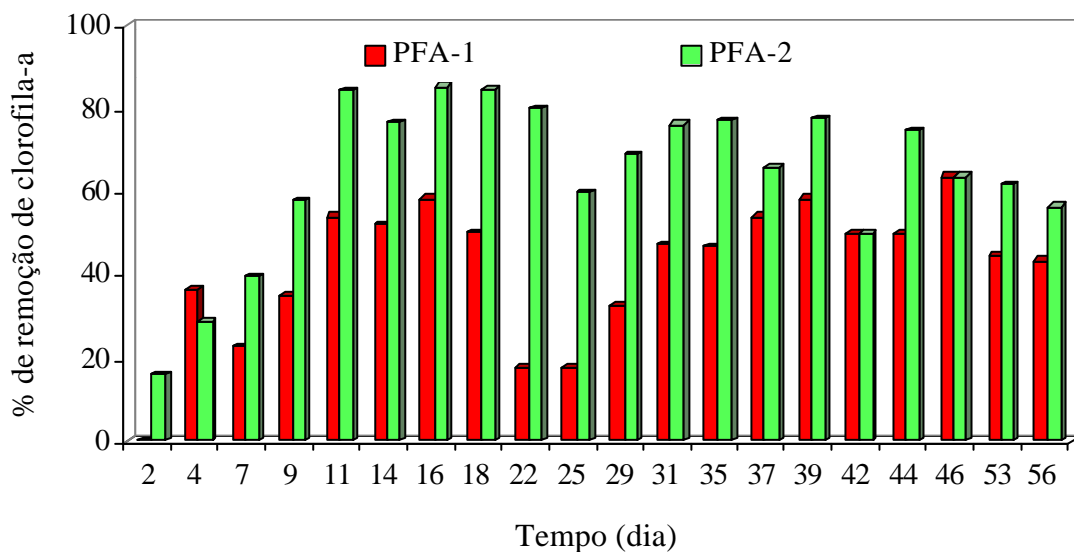


Figura 5.16.b - Eficiência de remoção clorofila-a dos pré-filtros ascendentes na 2ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.

Observa-se uma tendência de melhora da eficiência de remoção tanto de turbidez quanto de clorofila-a com a piora da qualidade do afluente à unidade. Esse comportamento está de acordo com o encontrado em vários estudos entre eles o realizado por Visscher *et al.* (1996) em que foram analisados o comportamento de alguns sistemas de pré-filtração ascendente, em escala piloto, onde os autores observaram que as eficiências de remoção de turbidez, cor verdadeira, sólidos suspensos e coliformes fecais foram menores quando utilizaram afluente de melhor qualidade. Di Bernardo e Rocha (1990), investigando o desempenho da pré-filtração em pedregulho e areia grossa, com escoamento ascendente, na remoção de algas, verificaram que o aumento do número total de algas no afluente conduziu a um aumento da eficiência de remoção, principalmente quando havia predominância de algas filamentosas.

Os pré-filtros ascendentes operaram durante 57 dias, sendo que a perda de carga atingiu 0,37 m no PFA-2 e 0,12 m no PFA-1. A perda de carga apresentou-se crescente com o tempo de funcionamento sendo que desenvolveu-se de forma mais acentuada no PFA-2 que teve uma eficiência de remoção média maior. O valor de perda de carga atingida pelo pré-filtro ascendente 1 foi de 61,7 % da carga hidráulica disponível, indicando a disponibilidade dessas unidades operarem durante períodos de tempo um pouco mais longos. Cabe lembrar que, contrariando o recomendado na literatura, a limpeza nessas unidades foi realizada apenas no intervalo da 1ª para a 2ª carreira. A evolução da perda de carga nessas unidades durante a segunda carreira de filtração é mostrada na Figura 5.17, observando que entre o 49º e o 53º dia não houve monitoramento das vazões, o que explica, de certa forma, o comportamento anômalo observado no final da carreira de filtração.

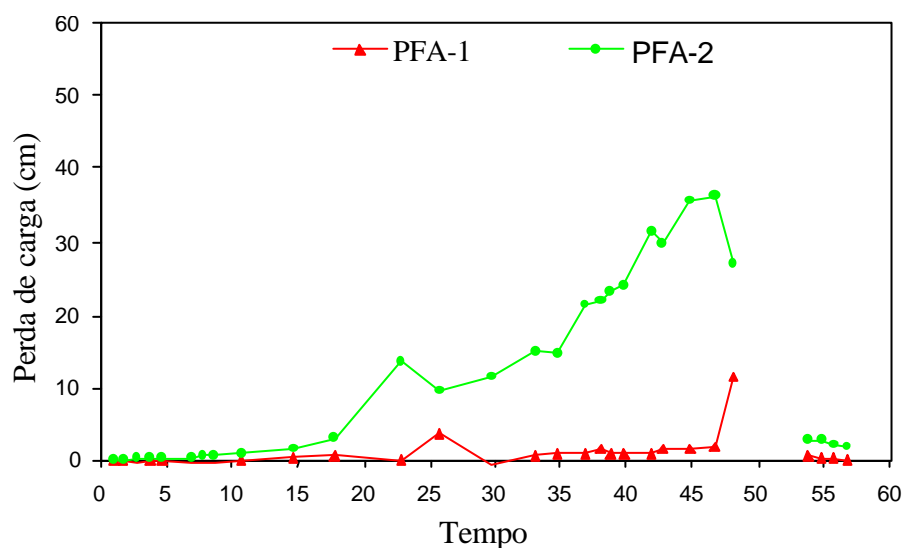


Figura 5.17 - Perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a 2ª carreira de filtração.

A Figura 5.18 mostra os valores de turbidez afluente e efluente dessas unidades durante a 2ª carreira de filtração.

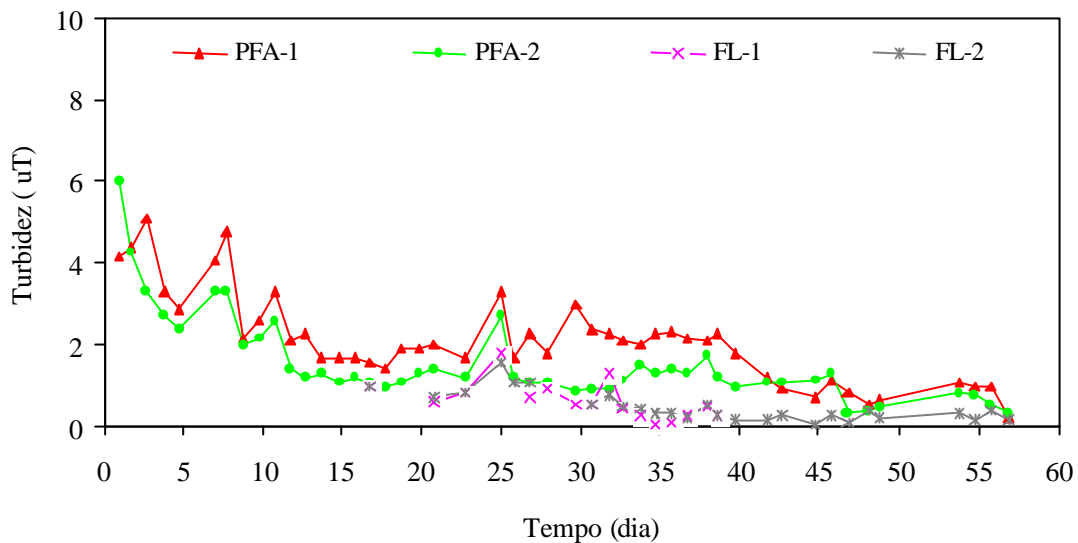


Figura 5.18 – Valores de turbidez afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.

A turbidez efluente apresentou-se menor que 1 uT em 87,5% das leituras realizadas na saída do FL-1 e em 88,9% das leituras realizadas na saída do FL-2, sendo que 100% do efluente produzido por essas unidades apresentaram turbidez menor que 2 uT. Percebe-se, da observação do gráfico, que essas unidades apresentaram, com relação a remoção de turbidez, um comportamento típico com relação a existência de um período inicial caracterizado pela formação da superfície de coesão ou “Schmutzdecke” que contribui significativamente para a retenção das impurezas.

Os efluentes produzido por essas unidades apresentaram-se com teores médios de clorofila-a de 2,06 $\mu\text{g/l}$ no FL-1 e 0,73 $\mu\text{g/l}$ no FL-2. Dos dados de clorofila-a obtidos no efluente produzido pelo FL-1 apenas 14,3% apresentaram teores menores que $1\mu\text{g/l}$, enquanto que 81,8% dos valores obtidos pelo FL-2 apresentou-se com um teor de clorofila-a inferior a $1\mu\text{g/l}$. A Figura 5.19 mostra os teores de clorofila-a na entrada e saída dessas unidades.

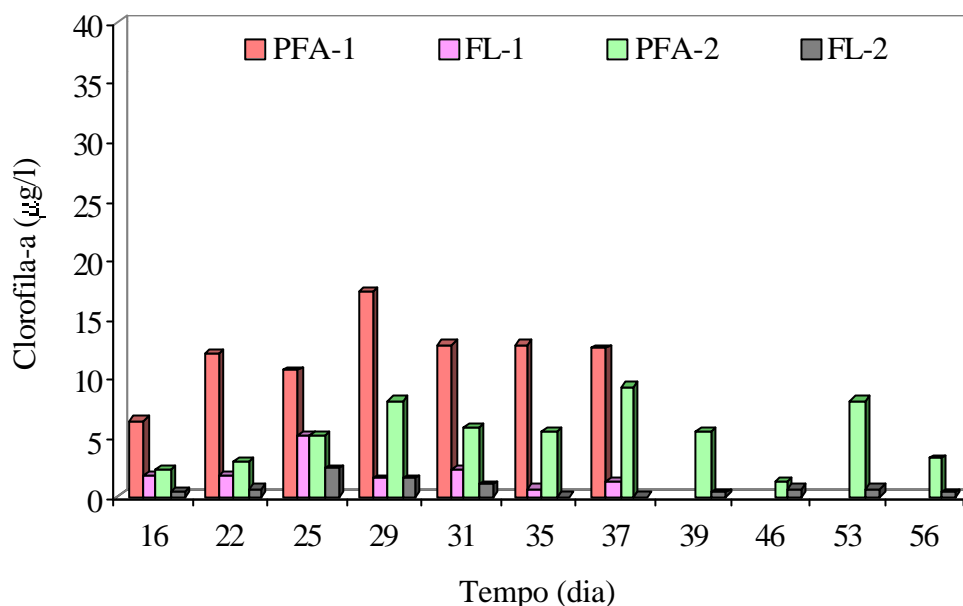


Figura 5.19 - Teores de clorofila-a afluyente e efluente dos filtros lentos durante a 2ª carreira de filtração.

A Tabela 5.8 mostra as eficiências médias e máximas obtidas por essas unidades durante a 2ª carreira de filtração

Tabela 5.8 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção obtidos nos filtros lentos 1 e 2 durante a 2ª carreira de filtração.

	Eficiência de remoção de turbidez (%)		Eficiência de remoção de clorofila-a (%)	
	FL-1	FL-2	FL-1	FL-2
Média	71,1	56,7	81,0	81,7
Máxima	97,8	96,6	95,0	100,0

A eficiência global média de remoção de clorofila-a apresentada pelo sistema FiME foi de 92,5% na saída do FL-1 e de 96,9% na saída do FL-2, sendo que essa última unidade chegou a produzir água com valores não detectáveis de clorofila-a.

Os filtros lentos foram colocados em operação após 15 dias de funcionamento do sistema PFD-PFA(s), ou seja, quando foi considerado que o sistema de pré-tratamento havia vencido o seu período de “amadurecimento”. O FL-1 funcionou durante 19 dias, período que levou para atingir a perda de carga de 1m (final da carreira) e o FL-2 funcionou durante um período de 36 dias,

atingindo a perda de carga de 1,10 m. A Figura 5.20 mostra o desenvolvimento da perda de carga nos filtros lentos durante a 2ª carreira de filtração. Da observação da Figura 5.21 nota-se que após o 8º dia de operação do FL-1 a perda de carga desenvolveu-se de forma exponencial com o tempo de funcionamento, enquanto que o FL-2 apresentou esse comportamento apenas após o 20º dia de operação.

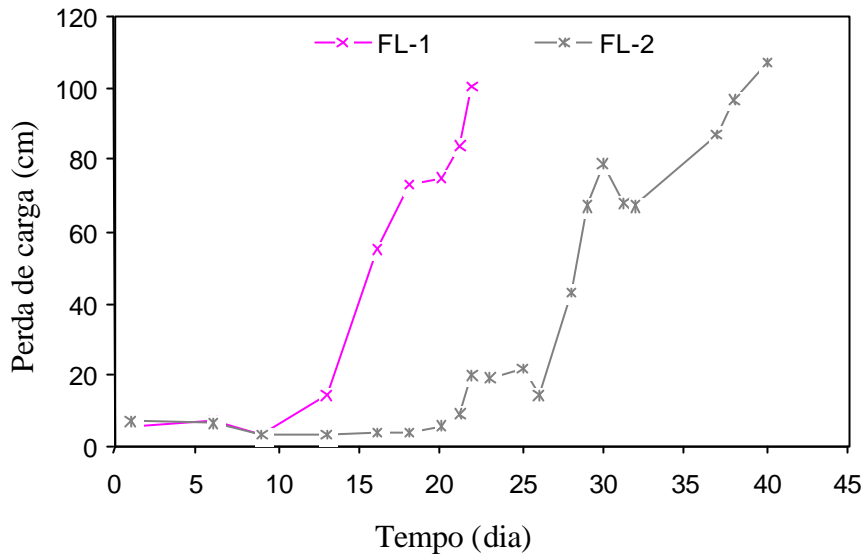


Figura 5.20 -Perda de carga nos filtros lentos durante a 2ª carreira de filtração.

Apesar dos filtros lentos apresentarem, em média, eficiência de remoção tanto de turbidez quanto de clorofila-a próximas, o FL-1 teve uma carreira de filtração bem mais curta que o FL-2, refletindo a influência do desempenho dos pré-filtros ascendentes sobre a performance dos filtros lentos. Cabe lembrar que o FL-2 recebeu um afluente de melhor qualidade, pois o PFA-2 apresentou-se mais eficiente que o PFA-1. O FL-1 recebeu um afluente com um teor médio de clorofila-a de 11,2 $\mu\text{g/l}$ e turbidez média de 2,1 uT enquanto o FL-2 recebeu um afluente com teor médio de clorofila-a de 6,8 $\mu\text{g/l}$ e turbidez média de 1,6 uT. Observa-se, assim, que o desempenho dos pré-filtros ascendentes não interfere de forma significativa na qualidade da água produzida pelos filtros lentos, porém influencia na duração da carreira de filtração. Isso pode ser visualizado através da observação da Figura 5.20.

Da análise do comportamento da seqüência de unidades com relação à aplicabilidade da FiME ao tratamento de água com presença de algas pode-se, de um modo geral, verificar que a

remoção de algas foi bastante efetiva com a produção de efluentes finais com teores baixos de clorofila-a o que pode ser confirmado através da observação da Figura 5.21, apresentada a seguir.

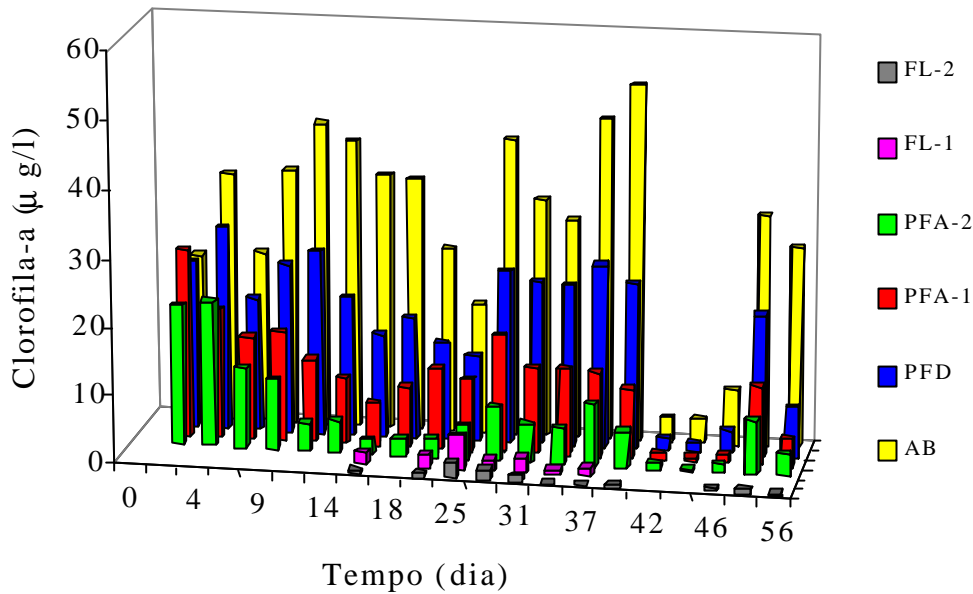


Figura 5.21 - Teores de clorofila-a da água bruta e dos efluentes de cada unidade componente do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.

5.5 - TERCEIRA CARREIRA DE FILTRAÇÃO

Durante a terceira carreira de filtração a turbidez da água bruta variou de 5,0 uT a 16,0 uT e o teor de clorofila de 4,8 µg/l a 61,4 µg/l apresentando um valor médio de 34,2 µg/l.

A Tabela 5.9 mostra as taxas de filtração adotadas, o tempo de funcionamento e a perda de carga atingida por cada unidade componente do sistema durante a terceira carreira de filtração.

Tabela 5.9 - Taxa de filtração, tempo de funcionamento e perda de carga atingida por cada unidade componente do sistema durante a 3ª carreira de filtração.

Unidades componentes do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .d)	Tempo de funcionamento (dias)	Perda de carga atingida (cm)
Pré Filtro Dinâmico (PFD)	36	55	
Pré Filtro Ascendente 1 (PFA-1)	18	55	0,3
Pré Filtro Ascendente 2 (PFA-2)	18	55	1,4
Filtro Lento 1 (FL-1)	3	34	8,4
Filtro Lento 2 (FL-2)	3	34	8,7

Nessa terceira carreira o PFD produziu efluente com valores de turbidez variando de 1,6 a 6,6 uT, apresentando um valor médio de eficiência de remoção de turbidez de 60,8%, chegando a atingir um valor máximo de remoção de 79,2%. Essa unidade obteve, em média, eficiência de remoção de turbidez maior do que é apresentado pela literatura para unidades trabalhando com mesma taxa de filtração, valendo citar o trabalho do Galvis *et al.* (1991) que obteve remoções médias de turbidez da ordem de 40%, trabalhando com água bruta com turbidez média de 93 uT. Latorre *et al.* (1996), trabalhando com água bruta com turbidez variando de 71 a 167 uT, porém com taxa de filtração de 48 m³/m².d, obteve eficiências de remoção de turbidez de 50% a 52%. A Figura 5.22 mostra os valores de turbidez da água bruta efluente dessa unidade durante a terceira carreira de filtração.

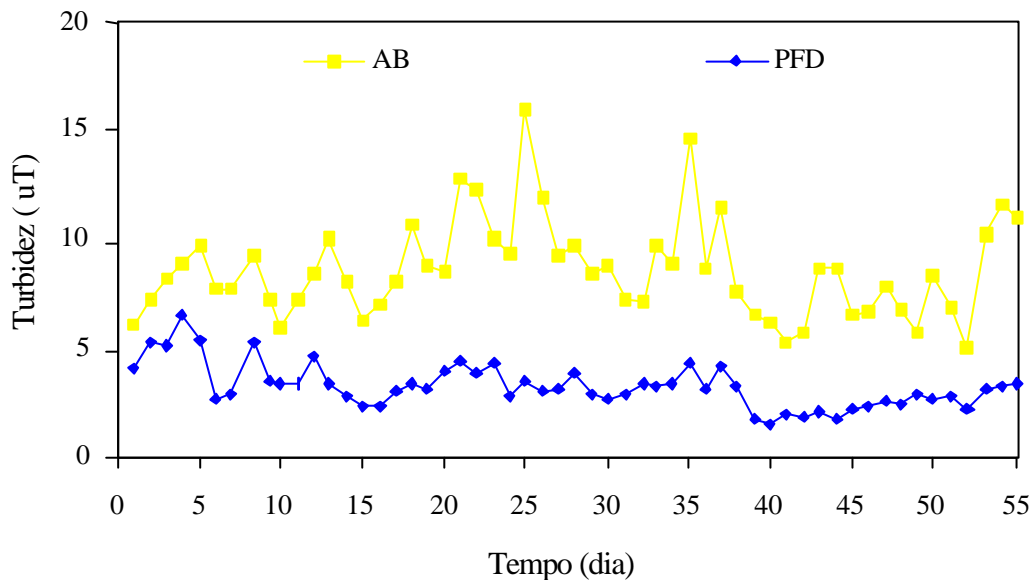


Figura 5.22 – Valores de turbidez afluyente e efluente do pré-filtro dinâmico durante a 3ª carreira de filtração.

O teor médio de clorofila-a na saída do PFD foi de 15,7 µg/l e a eficiência média de remoção foi de 52,2%, atingindo valores de até 78%. A Figura 5.23 apresenta os teores de clorofila-a observados nessa carreira de filtração.

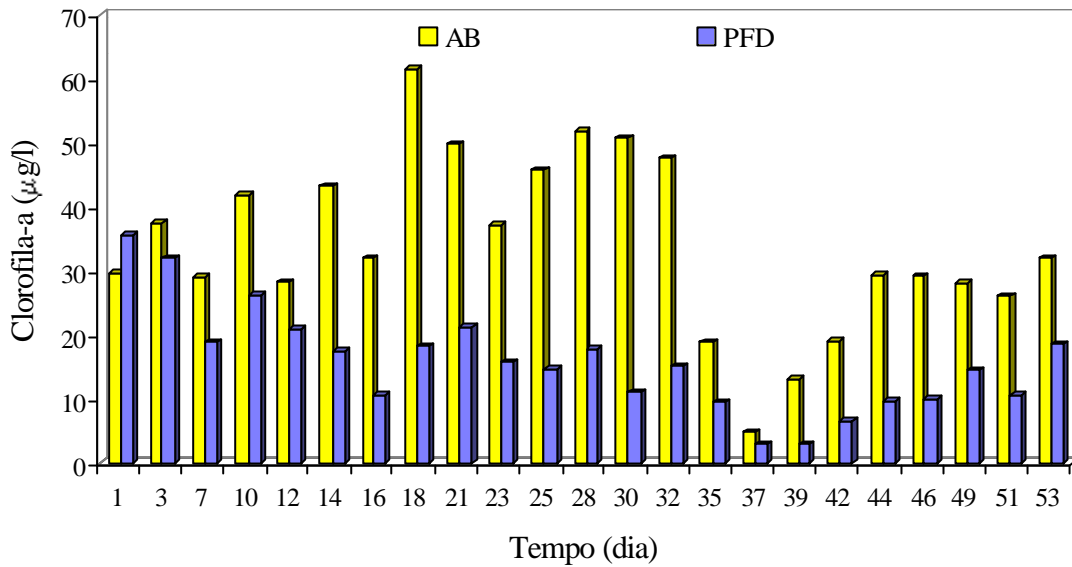


Figura 5.23 - Teores de clorofila-a afluente e efluente do pré-filtro dinâmico obtidos durante a 3ª carreira de filtração.

A Figura 5.24 mostra as eficiências de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidas durante a terceira carreira de filtração. Como nas carreiras anteriores observa-se que a eficiência de remoção tanto de turbidez quanto de clorofila-a apresentou-se crescente nos primeiros dias de funcionamento, cerca de 15 dias.

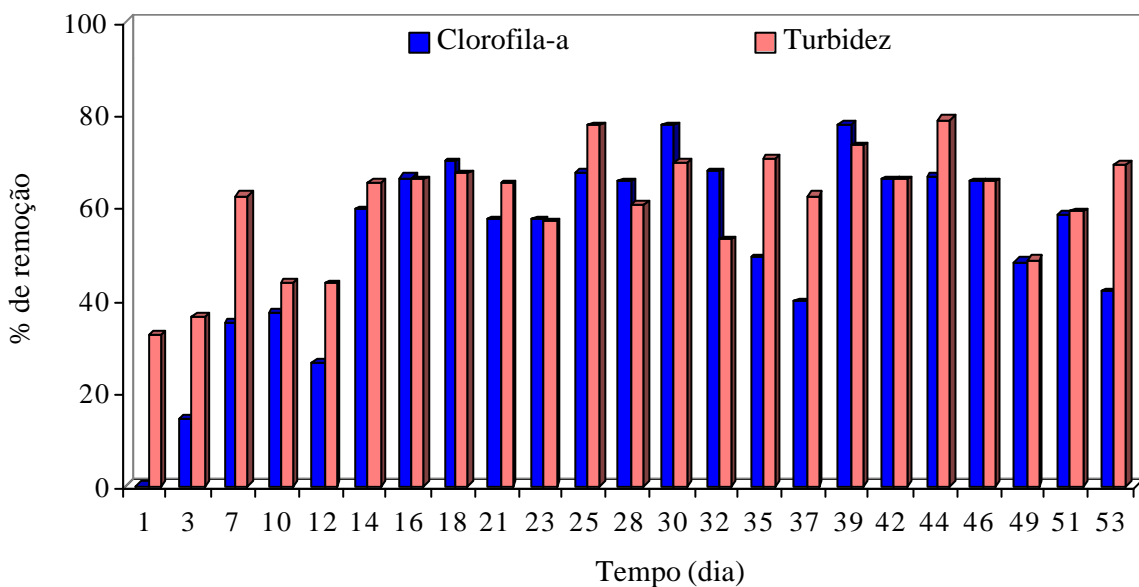


Figura 5.24 - Eficiências de remoção de turbidez e de clorofila-a do pré-filtro dinâmico obtidas durante a 3ª carreira de filtração.

Nessa carreira de filtração, destaca-se o alto desempenho do pré-filtro dinâmico na remoção tanto de turbidez quanto de clorofila-a. Lembrando que durante essa carreira de filtração o PFD funcionou continuamente sem sofrer problemas de esvaziamento, fato que provavelmente contribuiu para o bom funcionamento da unidade. Similarmente ao observado durante a segunda carreira de filtração a eficiência de remoção de clorofila-a apresentou valores próximos aos obtidos para a remoção de turbidez.

Os pré-filtros ascendentes produziram efluentes com valores de turbidez variando de 0,7 uT a 4,4 uT no PFA-1 e de 0,5 uT a 4,9 uT no PFA-2, contudo é importante destacar que essas unidades trabalharam com turbidez afluyente inferior a 5 uT durante a maior parte da carreira de filtração. O efluente produzido nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 apresentaram, respectivamente, valores médios de clorofila-a de 13,6 $\mu\text{g/l}$ e 11,3 $\mu\text{g/l}$. As Figura 5.25 e 5.26 mostram a variação dos valores afluentes e efluentes de turbidez e clorofila-a nessas unidades.

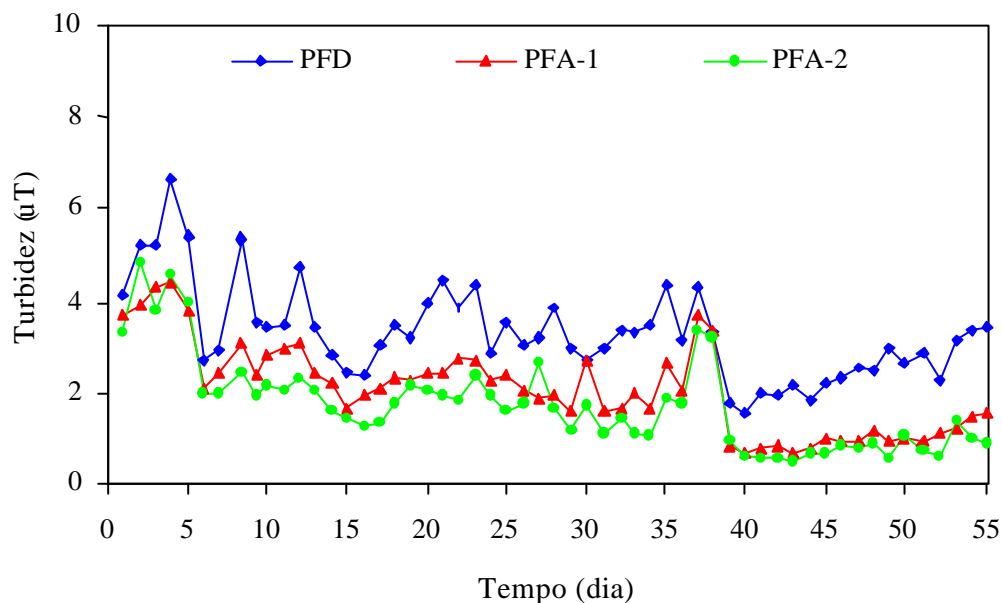


Figura 5.25 – Valores de turbidez efluente e afluyente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.

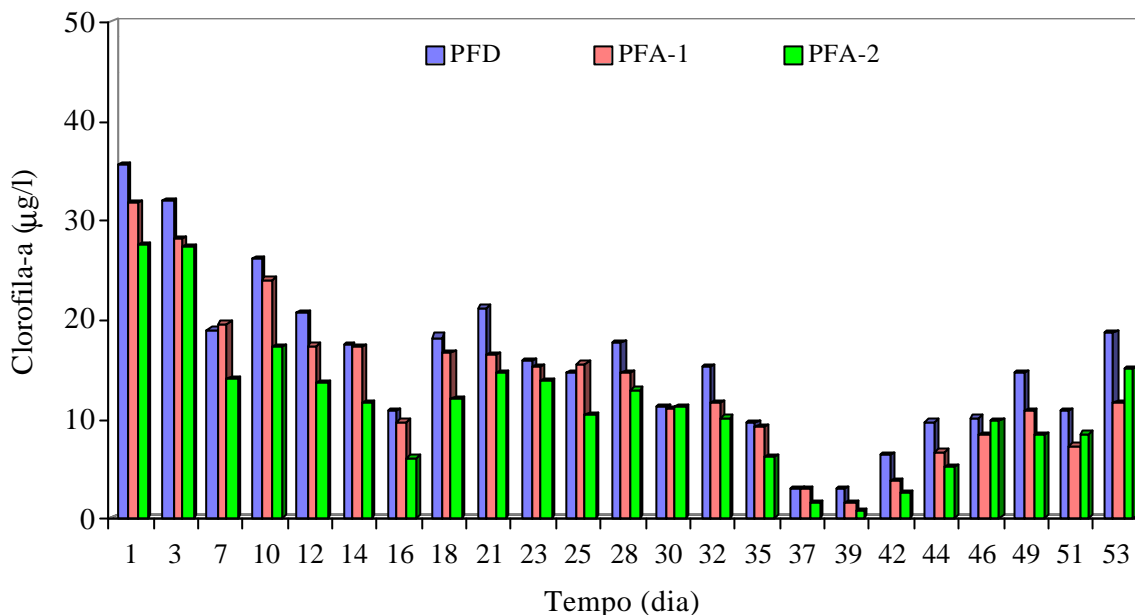


Figura 5.26 - Teores de clorofila-a afluente e efluente dos pré-filtros ascendentes 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.

Observa-se que a qualidade da água efluente dos pré-filtros ascendentes é bastante próxima a do afluente a essas unidades, principalmente com relação ao PFA-1, indicando uma baixa eficiência de remoção, particularmente, de clorofila-a. Cerca de 21% dos valores de clorofila-a medidos no efluente produzido, tanto pelo PFA-1 quanto pelo PFA-2, a partir do 22º dia de funcionamento, dia em que os filtros lentos foram colocados em operação, apresentaram concentrações inferiores a 5 µg/l.

A Tabela 5.10 apresenta as eficiências de remoção média e máxima de turbidez e clorofila-a obtidas nos pré-filtros ascendentes durante a terceira carreira de filtração. Como observado nas carreiras de filtração anteriores, o PFA-2 apresentou-se mais eficiente que o PFA-1 tanto na remoção de turbidez quanto na remoção de clorofila-a. A Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos resultados obtidos mostraram que, estatisticamente a diferença observada é significativa (nível de significância de 5%).

Tabela 5.10 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e clorofila-a obtidos nos pré-filtros ascendentes 1 e 2 durante a 3ª carreira de filtração.

	Eficiência de remoção de turbidez (%)		Eficiência de remoção de clorofila-a (%)	
	PFA-1	PFA-2	PFA-1	PFA-2
Média	39,3	50,0	15,5	31,3
Máxima	69,5	80,7	44,6	72,3

Observa-se que as eficiências dessas unidades, apresentaram-se inferiores às obtidas durante a 2ª carreira de filtração. Basicamente, dois fatores podem ter contribuído para esse comportamento: (1) a taxa de filtração adotada nessa carreira ser maior que a taxa de filtração adotada na 2ª carreira de filtração; (2) o fato de que durante a terceira carreira o PFD obteve melhor desempenho produzindo efluente de melhor qualidade. De uma forma geral, a literatura mostra que o desempenho dos pré filtros ascendentes cai com a melhora da qualidade da água afluente a essas unidades. Esses aspectos serão melhor discutidos no item 5.7.

As Figuras 5.27.a e 5.27.b mostram as eficiências de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidas nos pré-filtros ascendentes durante a terceira carreira de filtração, nos dias em que estes dois parâmetros foram analisados. O comportamento do PFA-2 quanto à eficiência de remoção de turbidez e clorofila-a mostrou-se de forma similar ao observado nas carreiras de filtração anteriores, porém o PFA-1, com relação à remoção de clorofila-a não apresentou uma tendência nítida de melhora de eficiência de remoção com o tempo de funcionamento.

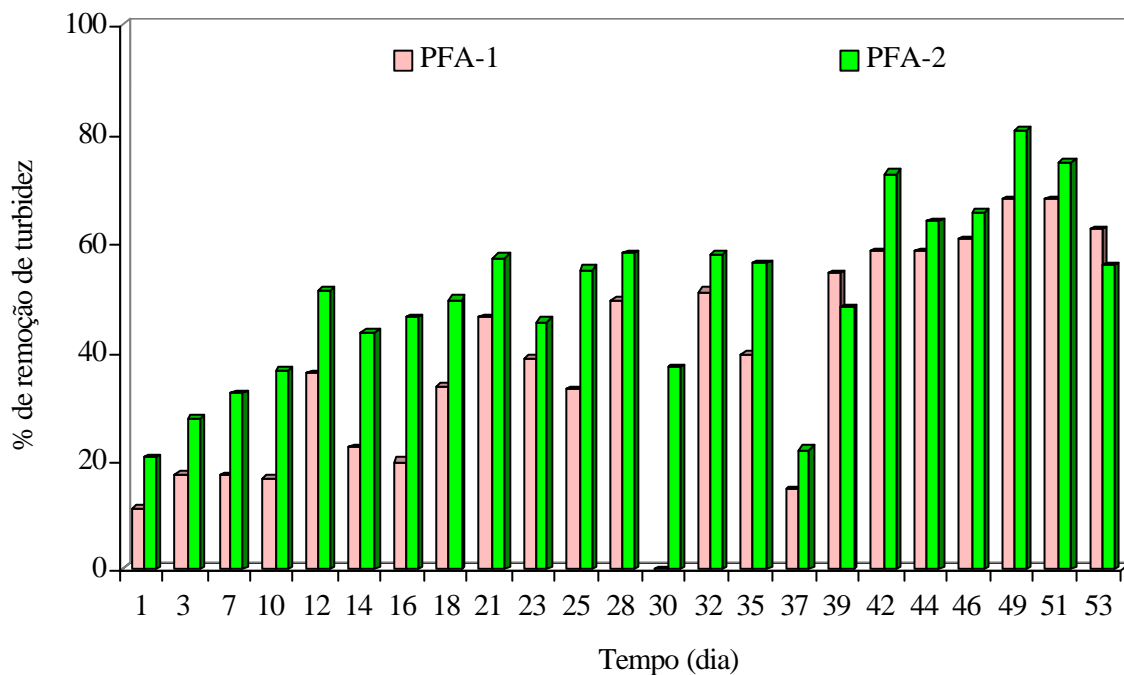


Figura 5.27.a - Eficiências de remoção de turbidez dos pré-filtros ascendentes na 3ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.

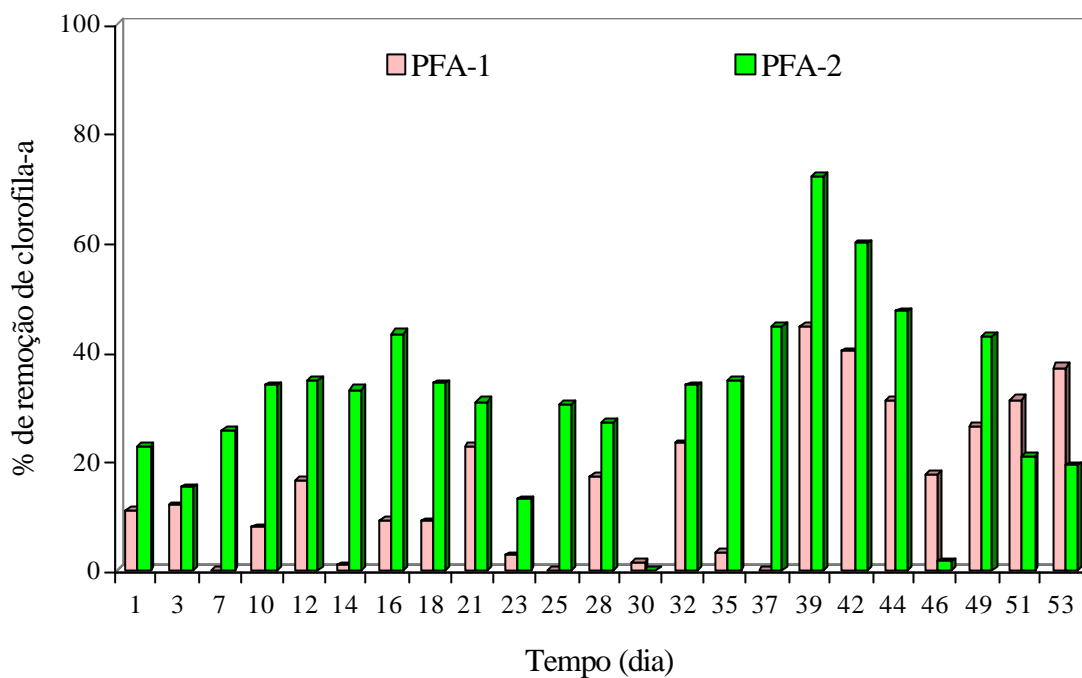


Figura 5.27.b - Eficiências de remoção de clorofila-a dos pré-filtros ascendentes na 3ª carreira de filtração – valores calculados em dias específicos.

O sistema de pré-tratamento operou durante um período de 55 dias. Nesse período os pré-filtros ascendentes atingiram uma perda de carga de 0,3 cm no PFA-1 e de 1,4 cm no PFA-2. A perda de carga no PFA-2 apresentou-se ligeiramente crescente com o tempo de funcionamento e constantemente maior que no PFA-1 sendo que o PFA-1 apresentou uma ligeira tendência ao crescimento somente no final da carreira de filtração.

O gráfico a seguir (Figura 5.28) mostra a evolução da perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a 3ª carreira de filtração. Observa-se que as perdas de carga atingidas por essas unidades foram pequenas, possivelmente resultado da pequena retenção de impurezas no meio granular, uma vez que as unidades não apresentaram um bom desempenho, particularmente no que tange à remoção de algas (clorofila-a).

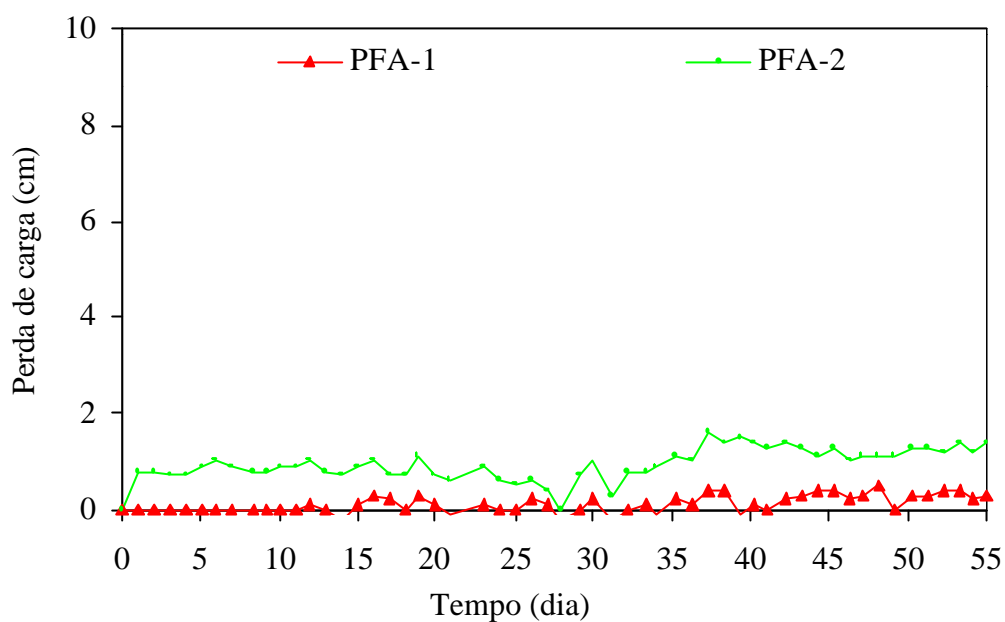


Figura 5.28 - Perda de carga nos pré-filtros ascendentes durante a 3ª carreira de filtração.

Os filtros lentos produziram efluentes com valores médios de turbidez de 0,5 uT para o FL-1 e 0,4 uT para o FL-2. A Figura 5.29 mostra os valores de turbidez afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 durante a terceira carreira de filtração.

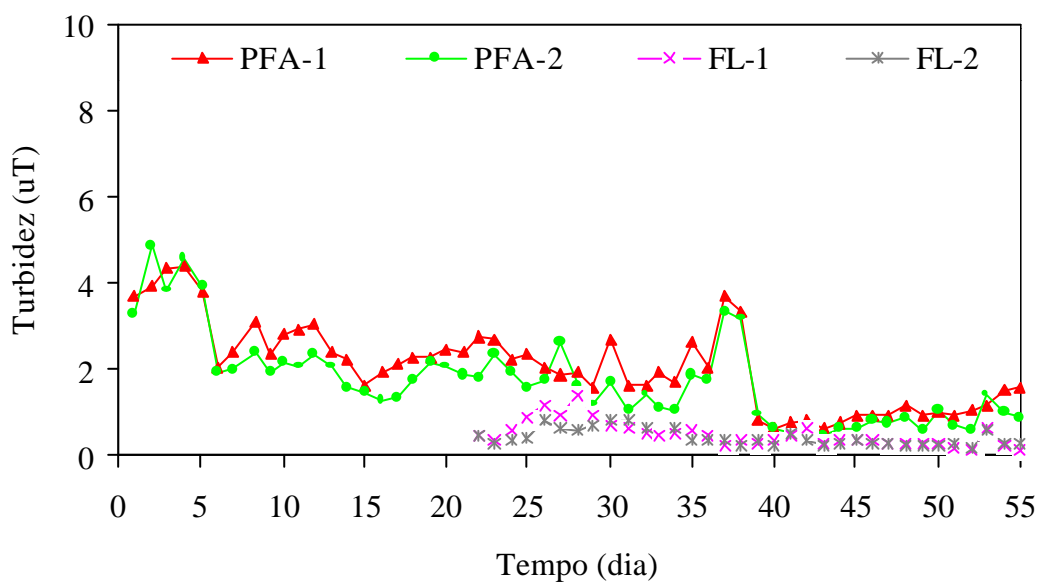


Figura 5.29 – Valores de turbidez afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.

Dos dados de turbidez obtidos no FL-1, 94,1% apresentou valores inferiores a 1 uT, e ao passo que no efluente produzido pelo FL-2 essa porcentagem foi de 100%. Cabe lembrar que 1 uT é o valor limite estabelecido pela Portaria nº 36 do Ministério da Saúde para efluentes de Estações de Tratamento de Água, antes de serem submetidos a desinfecção. A eficiência média global de remoção de turbidez do sistema foi igual a 94,3% na saída do FL-1 e 95,1 % na saída do FL-2.

O efluente dessas unidades apresentou teores médios de clorofila-a de 0,8 µg/l na saída do FL-1 e 0,7 µg/l na saída do FL-2. A Figura 5.30 mostra a variação dos teores de clorofila-a no afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 durante a 3ª carreira de filtração.

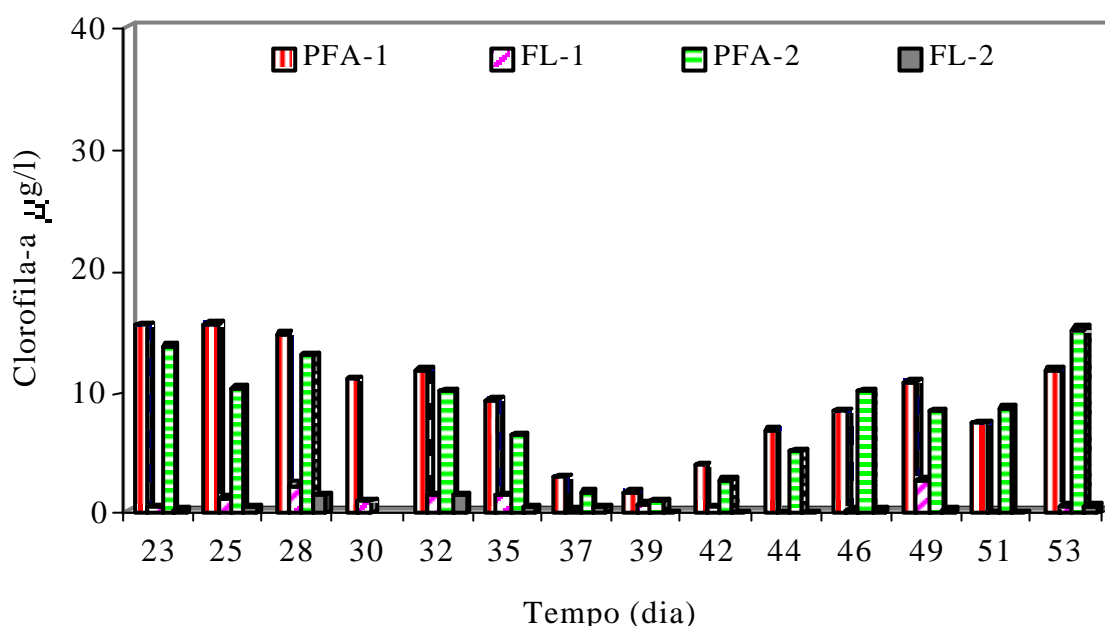


Figura 5.30 - Teores de clorofila-a afluente e efluente dos filtros lentos 1 e 2 obtidos durante a 3ª carreira de filtração.

Dos valores de clorofila-a medidos no efluente reduzido pelo FL-1, 64,3 % apresentou teor de clorofila-a menor que 1 µg/l, enquanto que 78,6 % dos valores observados no efluente do FL-2 apresentaram teores de clorofila-a menores que 1 µg/l. Não houve diferença significativas entre as eficiências de remoção tanto de turbidez quanto de clorofila-a entre o FL-1 e o FL-2 durante a essa carreira de filtração. A Tabela 5.11 apresenta as eficiências de remoção média e máxima de turbidez e de clorofila-a obtidas durante a 3ª carreira de filtração pelos filtros lentos 1 e 2.

A Tabela 5.11 – Valores médios e máximos das eficiências de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidos nos filtros lentos 1 e 2 durante a 3ª carreira de filtração.

	Eficiência de remoção de turbidez (%)		Eficiência de remoção de clorofila-a (%)	
	FL-1	FL-2	FL-1	FL-2
Média	65,4	62,6	97,2	97,4
Máxima	93,2	100	100	100

A eficiência média global de remoção de clorofila-a da ETA piloto foi de 97,2 % na saída do FL-1 e de 97,9% na saída do FL-2.

Os filtros lentos funcionaram durante 34 dias e a perda de carga desenvolveu-se de forma similar nas duas unidades (ver Figura 5.31), sendo que a partir do 25º dia de funcionamento passou a desenvolver-se de forma mais pronunciada.

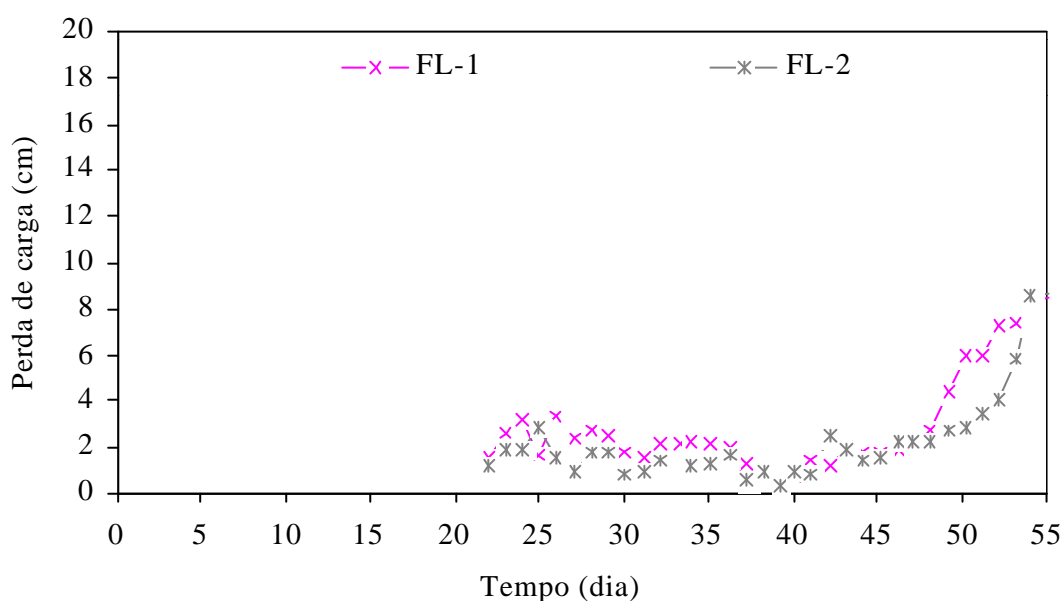


Figura 5.31 - Evolução da perda de carga nos filtros lentos durante a 3ª carreira de filtração.

O desenvolvimento similar da perda de carga nessa carreira de deve-se, provavelmente, ao fato de que os dois filtros estão sendo alimentados com água de qualidade similar. O baixo desenvolvimento da perda de carga, comparativamente ao observado na carreira de filtração anterior, pode ser devida ao melhor controle de vazão afluente aos filtros lentos verificados nessa carreira, como resultado da instalação de rotâmetros nas tubulações de alimentação dos filtros lentos.

Como o observado nas demais carreiras de filtração o sistema FiME apresentou-se efetivo na remoção de algas com a produção de efluentes finais com teores baixos de clorofila-a (ver Figura 5.32).

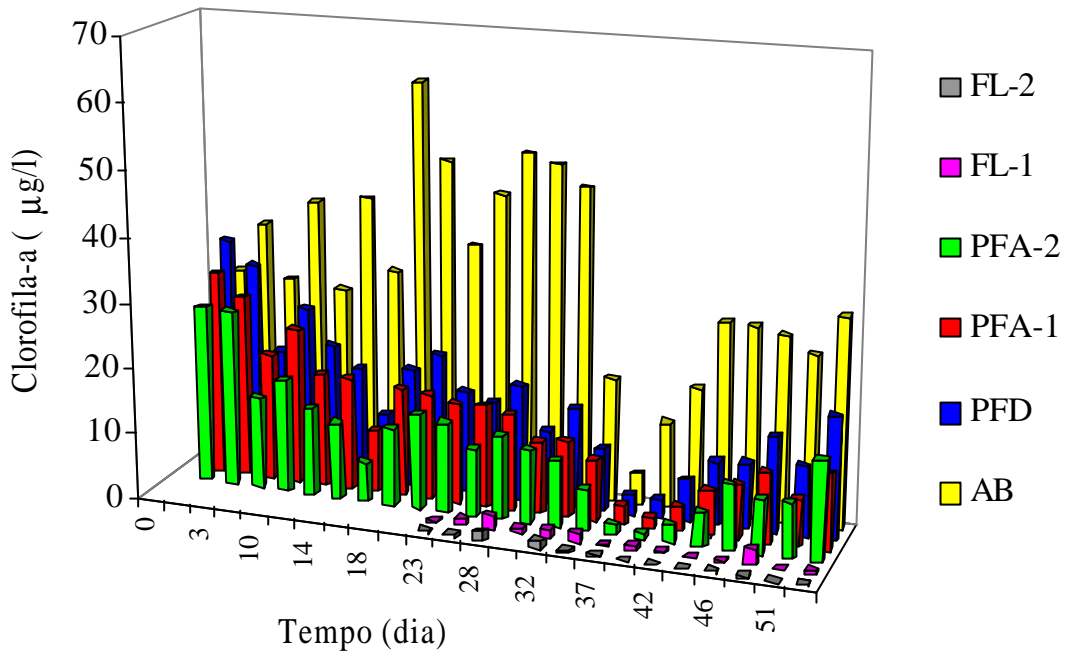


Figura 5.32 - Teores de clorofila-a afluente e efluente das diversas unidades do sistema durante a 3ª carreira de filtração.

5.6 – DEMAIS PARÂMETROS MEDIDOS

Serão apresentados a seguir os resultados obtidos para os demais parâmetros analisados nesse trabalho experimental. Convém salientar que o Apêndice A apresenta a estatística descritiva dos valores obtidos para os parâmetros temperatura, pH, condutividade, ferro total, alcalinidade e dureza. Encontram-se, também no referido apêndice, os valores encontrados para os parâmetros determinados com menor frequência, a saber: fósforo total, nitrogênio amoniacal e nitrato, demanda química de oxigênio (DQO) e coliformes.

5.6.1 - Temperatura

Durante as três carreiras de filtração foram feitas leituras diárias de temperatura na água bruta e nos efluentes de cada unidade. A Tabela 5.12 mostra as temperaturas média, mínima e

máxima obtidas nessas determinações. Nota-se um acréscimo da temperatura média da água bruta da primeira para a terceira carreira de filtração devido à época do ano em que estas foram realizadas, ou seja, agosto - setembro para a primeira carreira, outubro - dezembro para a segunda carreira e janeiro - março para a terceira carreira.

Tabela 5.12 - Temperaturas média da água bruta e dos efluentes das unidades componentes do sistema durante as três carreiras de filtração

	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
1 ^a carreira	23	24	23	24	22	22
2 ^a carreira	26	26	25	26	25	25
3 ^a carreira	27	27	26	26	25	25

Observa-se uma leve tendência de diminuição da temperatura no sentido da seqüência do tratamento, ou seja, água bruta ⇔ Pré Filtro Dinâmico ⇔ Pré Filtro Ascendente ⇔ Filtro Lento. Isto deve-se, provavelmente, ao posicionamento das unidades em relação à exposição ao sol, e horário de realização das coletas de amostra e medição deste parâmetro.

5.6.2 - pH

A Tabela 5.13 apresenta os valores médios de pH da água bruta e do efluente de cada unidade do sistema obtidos durante as três carreiras de filtração. Salientando que as leituras foram realizadas, também, diariamente.

Tabela 5.13 - Valores médios do pH da água bruta e dos efluentes das unidades componentes do sistema durante as três carreiras de filtração

	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
1 ^a carreira	7,5	7,1	7,0	6,8	6,8	6,8
2 ^a carreira	7,3	6,9	6,7	6,6	6,6	6,6
3 ^a carreira	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,5

Os valores de pH observados encontram-se em faixa próxima da neutralidade, permitindo um bom equilíbrio do ecossistema em cada unidade.

5.6.3 - Condutividade

Durante a segunda e terceira carreiras de filtração foram feitas medidas, em dias alternados, da condutividade da água bruta e do efluente de cada unidade, sendo que a Tabela 5.14 apresenta os valores médios de condutividade obtidos nessas determinações. Pode-se inferir desses valores, que a concentração de sais dissolvidos na água bruta é relativamente pequena, e nota-se a pouca variação dos valores médios ao longo da seqüência de tratamento durante essas duas carreiras de filtração.

Tabela 5.14 – Valores médios de condutividade na água bruta e no efluente de cada unidade obtidos durante a 2ª e 3ª carreiras de filtração.

	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
2ª carreira	70,1	69,2	70,1	70,3	76,2	71,0
3ª carreira	61,5	61,2	61,6	61,8	62,9	64,6

Os valores médios observados na terceira carreira de filtração são um pouco inferiores ao observado na segunda carreira, provavelmente devido ao processo de diluição e renovação da água do lago durante o período de chuvas.

5.6.4 – Alcalinidade e dureza

As determinações da alcalinidade e da dureza na água bruta e no efluente de cada unidade do sistema foram realizadas semanalmente somente durante a segunda carreira de filtração. Os valores médios obtidos nessas determinações são mostrados nas Tabelas 5.15 e Tabela 5.16.

Tabela 5.15 - Valores de Alcalinidade média na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.

Alcalinidade (mg CaCO ₃ /L)					
AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
23,5	22,3	23,6	23,0	22,6	22,7

Tabela 5.16 - Valores médios de dureza na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.

		Dureza (mg CaCO ₃ /L)			
AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
15,0	13,8	13,6	14,0	17,6	14,7

Não se verifica nenhuma tendência em particular no que tange à esses parâmetros. Nota-se que os valores, tanto de alcalinidade como de dureza da água bruta, são relativamente baixos, porém dentro da faixa usual nas águas superficiais da região do Distrito Federal.

5.6.5 – Ferro total

Durante a segunda carreira de filtração foram feitas determinações semanais do teor de ferro total na água bruta e no efluente de cada unidade componente do sistema. A Tabela 5.17 apresenta os teores médios desse parâmetro obtidos durante a segunda carreira de filtração.

Tabela 5.17 - Teores médios de ferro na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 2ª carreira de filtração.

		Ferro total (mg Fe/L)			
AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
0,27	0,05	0,02	0,01	0,01	0,05

O valor de ferro na água bruta é relativamente baixo, em torno de 0,3 mg Fe/l, que é o valor máximo permissível de acordo com os padrões de potabilidade estabelecidos pela Portaria nº 36 (Ministério da Saúde, 1990) Observa-se que apesar do baixo valor ocorre a remoção de ferro no processo, particularmente no PFD. A capacidade de remoção de ferro pelos pré-filtros dinâmicos é reportada por Galvis *et al.* (1997).

5.6.6 - Nutrientes

As determinações dos teores de fósforo total e nitrogênio na água bruta e no efluente de cada unidade do sistema foram realizadas semanalmente somente durante a terceira carreira de

filtração. Os resultados obtidos para fósforo e nitrogênio, em termos de valores médios, são apresentados, respectivamente, nas Tabela 5.18 e 5.19.

Tabela 5.18 - Teores médios de fósforo total na água bruta e nos efluentes das diversas unidades do sistema obtidos durante a 3ª carreira de filtração

Fósforo total (mg PO ₄ ⁻³ /L)					
AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
0,53	0,47	0,46	0,58	0,53	0,75

As concentrações médias de fósforo presente em todas as frações é bastante superior ao nível crítico de cerca de 5µg/L (Sawyer *et al.*, 1994), não sendo fator limitante para o desenvolvimento de algas.

Tabela 5.19 - Teores médios de nitrato e de nitrogênio amoniacal presentes na água bruta e no efluente de cada unidade obtidos durante a 3ª carreira de filtração.

Nitrogênio (mg N/L)						
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Nitrogênio nitrato	1,05	1,05	1,32	1,05	0,95	1,00
Nitrogênio amoniacal	0,35	0,29	0,20	0,19	0,12	0,01

Observa-se que a forma predominante de nitrogênio encontrado é o nitrato, sendo o nitrogênio amoniacal encontrado em concentrações bem mais baixas. Este último apresenta uma tendência de diminuição ao longo do processo de tratamento, provavelmente resultante de oxidação a nitrito, e posteriormente, nitrato. O nitrato apresenta-se constante.

Nas concentrações presentes, sempre bastante superiores à 400 µg N/L, o crescimento de algas não é limitado pela concentração de nitrogênio (Horne e Goldman, 1994).

5.6.7 - Cor verdadeira

Durante a terceira carreira de filtração foram feitas algumas determinações da cor verdadeira na água bruta e nos efluentes das unidades componentes do sistema. A Tabela 5.20 mostra as datas em que essas determinações foram realizadas e os valores de cor verdadeira encontrados.

Tabela 5.20 – Valores de cor verdadeira obtidos nas determinações realizadas durante a 3ª carreira de filtração.

Cor verdadeira (uC)						
Data	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
23/jan	2	1	2	3		
26/jan	5	7	5	5		
18/fev	13	5	5	5	5	3
23/fev	5	5	2	2	2	1

Os valores de cor verdadeira presentes na água bruta eram muito baixos dificultando a leitura deste parâmetro em todas as amostras.

5.6.8 – Demanda química de oxigênio

Durante a terceira carreira de filtração foram feitas algumas determinações da Demanda Química de Oxigênio (DQO) da água bruta e dos efluentes das unidades componentes do sistema. A Tabela 5.21 mostra os valores médios encontrados

Tabela 5.21 - Valores médios da DQO da água bruta e do efluente de cada unidade do sistema obtidas durante a 3ª carreira de filtração.

DQO (mg/L)					
AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
13,0	9,2	8,1	7,2	4,8	4,4

Observa-se que houve uma redução da DQO ao longo das diversas etapas do tratamento, indicando a remoção de matéria orgânica nas várias etapas. Esta redução de matéria orgânica pode ser advinda tanto da remoção de algas como da oxidação de orgânicos dissolvidos. É importante lembrar que o Lago Paranoá recebe esgotos domésticos, que embora tratados, ainda contém residuais de matéria orgânica.

5.6.9 -Coliformes totais e fecais

Durante a segunda carreira de filtração foram feitas determinações semanais de coliformes totais e fecais na água bruta e nos efluentes das unidades componentes do sistema. Os valores obtidos são apresentados no Apêndice A .

Da análise dos dados verificou-se um comportamento bastante aleatório e, por vezes, incoerente. Em algumas situações os valores de coliformes aumentavam em alguma das etapas de pré-filtração, fato não reportado em nenhuma literatura consultada. Buscou-se, ainda durante o andamento da segunda carreira, identificar possíveis problemas metodológicos. A primeira suspeita recaiu sobre o procedimento de amostragem, e buscou-se corrigir tal procedimento. Para verificar a possibilidade de contaminação dos meios de cultura uma série de amostras “branco” de água estéril eram introduzidas juntamente com as amostras dos efluentes das unidades da ETA. Tal cuidado não revelou problemas de contaminação.

Para terceira carreira novos meios de cultura, de diferentes fabricantes, foram adquiridos, entretanto, mais uma vez, os dados obtidos não se mostraram lógicos. Apenas quatro determinações foram realizadas nesta carreira

A hipótese, embora remota, de que os possa haver o re-crescimento de coliforme não pode ser totalmente descartada uma vez que, sendo a água bruta captada nas proximidades da estação de tratamento de esgotos, esta ainda pode conter matéria orgânica de origem animal que satisfaça as necessidades metabólicas dos coliformes. O re-crescimento de coliformes, algumas cepas, é reportado na literatura, mesmo em águas tratadas. Este aspecto deve ser avaliado cuidadosamente em trabalhos futuros.

É importante, contudo comentar, que este comportamento foi observado na etapa de pré-filtração, não ocorrendo nos filtros lentos, onde, na maioria das vezes o efluente apresentava-se com número de coliformes inferior ao limite de detecção do método (<2 NMP/100 ml), independentemente do número presente no afluente a essas unidades.

5.7 - ANÁLISE COMPARATIVA ENTRE O COMPORTAMENTO DO SISTEMA DURANTE A 2ª E 3ª CARREIRAS DE FILTRAÇÃO

5.7.1 A qualidade da água bruta

Para se poder realizar, de forma mais consistente, as análises comparativas entre o desempenho obtido nas diferentes etapas do trabalho, tornou-se necessária uma análise da variação da qualidade da água bruta durante as três carreiras de filtração.

A qualidade da água bruta, medida através dos parâmetros turbidez e clorofila-a (concentração de algas), foi analisada através da utilização de um teste de hipótese (Análise de Variância) e do Teste de Tukey para a comparação das médias. Para a aplicação desses testes é necessário que os dados analisados ajustem-se a uma distribuição Normal. O teste utilizado para verificar a aderência dos dados a uma distribuição Normal foi o Teste de Kolmogorov-Smirnov conforme mencionado no item 4.3 da metodologia.

Os resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov são apresentados no Apêndice B, item B.3, e demonstram que os dados de turbidez e clorofila-a na água bruta, nas três carreiras de filtração, apresentaram um bom ajuste à distribuição Normal permitindo a aplicação dos testes estatísticos propostos.

A Tabela 5.22 apresenta o resumo dos resultados da Análise de Variância aplicados aos valores de turbidez obtidas durante as três carreiras de filtração

Tabela 5.22 - Análise de Variância aplicado aos valores de turbidez da água bruta durante as três carreiras de filtração

Causas da variação	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	4,60	2,30	
Resíduo	119	766,57	6,44	0,36
Total	121	771,17		

Ressalta-se que o valor do valor do $F_{crítico}$ para esse caso, associado ao nível de significância de 5% é 3,07.

A Tabela 5.23 , por sua vez, mostra os resultados da Análise de Variância aplicados aos valores de clorofila-a obtidas durante as três carreiras de filtração sendo o F_c , nesse caso, associado ao nível de significância de 5%, é igual a 3,21.

Tabela 5.23 - Análise de Variância aplicado aos teores de clorofila-a da água bruta durante as três carreiras de filtração.

Causas da variação	GL	SQ	QM	F
Tratamento	2	339,22	169,61	
Resíduo	46	8209,01	178,46	0,95
Total	48	8548,24		

Onde:

GL = Graus de Liberdade

SQ = Soma dos Quadrados

QM = Quadrado Médio

Como nos dois casos o F obtido foi menor que o Fcrítico (tabelado) então aceita-se, ao nível de significância de 5%, a hipótese de que, em média, os valores de turbidez e de clorofila-a obtidos nas três carreiras de filtração são iguais. A comparação das médias aplicada a turbidez e clorofila-a utilizando o Teste de Tukey, que se encontra no Apêndice B, item B.2, reforça essa hipótese.

Pode-se aceitar então que, em média, a qualidade da água bruta medida através dos parâmetros turbidez e concentração de algas (clorofila-a) não sofreu variação significativa durante as três carreiras de filtração, permitindo uma melhor avaliação da influência dos parâmetros de operação/projeto (granulometria e taxa de filtração) variados durante os experimentos.

5.7.2 Análise comparativa entre as carreiras de filtração

Serão apresentadas a seguir algumas tabelas resumo (Tabelas 5.24, 5.25 e 5.26) contendo, para cada carreira de filtração, as taxas de filtração adotadas, o período de funcionamento, a perda de carga atingida em cada unidade do sistema, bem como os valores médios de turbidez e clorofila-a obtidos no efluente de cada unidade e suas respectivas eficiências de remoção.

Tabela 5.24 - Resumo do comportamento das unidades componentes do sistema durante a 1ª carreira de filtração.

Unidades do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .d)	Período de fun. (dias)	Perda de carga (cm)	1ª CARREIRA		Clorofila-a	
				Turbidez (uT)	%rem	(µg/l)	%rem
AB	-	-	-	8,16	-	39,59	-
PFD	36	20	-	5,42	32,5	29,78	25,4
PFA-1	18	20	0,5	3,75	30,6	23,09	21,2
PFA-2	18	20	2,6	2,93	44,9	16,50	44,2
FL-1	6	7 e 7	105 e 30,7	1,01	72,8	1,66	93,5
FL-2	6	7 e 7	85 e 62,4	1,12	60,2	1,44	91,3

Tabela 5.25 - Resumo do comportamento das unidades componentes do sistema durante a 2ª carreira de filtração.

2ª CARREIRA							
Unidades do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .d)	Período de fun. (dias)	Perda de carga (cm)	Turbidez (uT)	%rem	Clorofila-a (µg/l)	%rem
AB	-	-	-	8,70	-	31,20	-
PFD	36	57	-	4,17	48,9	18,52	41,4
PFA-1	12	57	12	2,13	50,6	11,19	41,2
PFA-2	12	57	37	1,55	64,5	6,75	64,4
FL-1	3	19	100	0,63	71,1	2,06	81,0
FL-2	3	36	100	0,48	56,7	0,73	81,7

Tabela 5.26 - Resumo do comportamento das unidades componentes do sistema durante a 3ª carreira de filtração.

3ª CARREIRA							
Unidades do sistema	Taxa de filtração (m ³ /m ² .d)	Período de fun. (dias)	Perda de carga (cm)	Turbidez (uT)	%rem	Clorofila-a (µg/l)	%rem
AB	-	-	-	8,67	-	34,24	-
PFD	36	55	-	3,31	60,8	15,73	52,2
PFA-1	18	55	0,3	2,08	39,3	13,57	15,5
PFA-2	18	55	1,4	1,74	50,0	11,34	31,3
FL-1	3	34	8,4	0,50	65,4	0,80	97,2
FL-2	3	34	8,7	0,42	62,6	0,74	97,9

Da análise das Tabelas 5.24, 5.25 e 5.26 apresentadas pode-se verificar que, de um modo geral, a qualidade da água tratada, medida através de turbidez e clorofila-a, produzida pela ETA-piloto de FiME (PFD ⇔ PFAs ⇔ FLs) não apresentou diferenças significativas, porém, as eficiências de remoção e as perdas de carga atingidas pelas unidades componentes do sistema apresentaram variações consideráveis para as diferentes condições testadas. Como mencionado nos item anteriores, observa-se que em todas as corridas o PFA-2 foi mais eficiente do que o PFA-1 tanto na remoção de turbidez como de clorofila-a.

A Figura 5.33 apresenta os valores médios de remoção de turbidez e clorofila-a no sistema de pré-tratamento obtidos na segunda e terceira carreira de filtração. Dois aspectos destacam-se, a melhor performance do pré-filtro dinâmico na terceira carreira de filtração e a pior performance dos pré-filtros ascendentes nessa carreira.

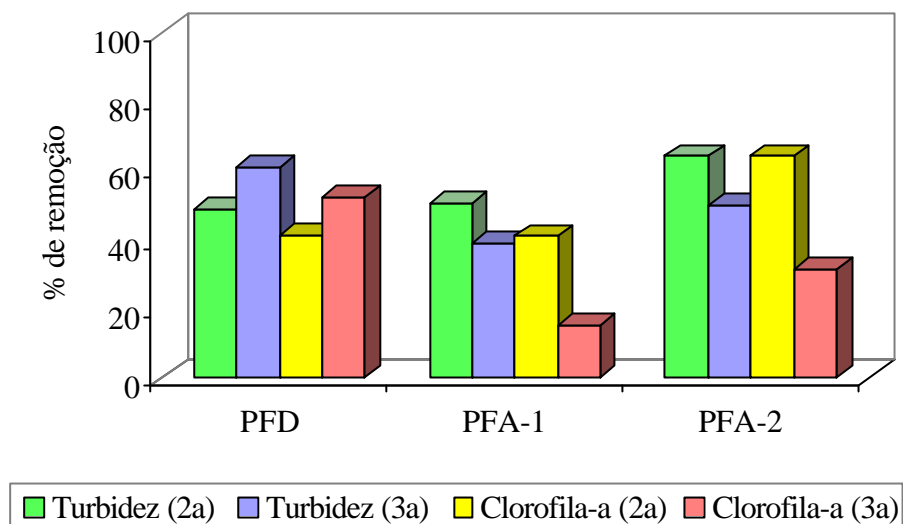


Figura 5.33 - Eficiência de remoção média de turbidez e clorofila-a no sistema de pré-tratamento.

A melhor performance do PFD na 3ª carreira pode ser devida a dois fatores. O primeiro diz respeito a operação mais cuidadosa do PFD, uma vez que durante essa carreira de filtração poucas interrupções de funcionamento ocorreram e nenhum esvaziamento foi observado. Na segunda carreira, muito embora a válvula solenóide já estivesse instalada, houve mais interrupções na adução de água bruta em função do início das chuvas frequentes e descargas elétricas, além de alguns poucos eventos de esvaziamento.

O outro fator, talvez o de maior contribuição, está associado ao estado de limpeza que encontrava-se o meio filtrante do pré-filtro dinâmico no início da terceira carreira de filtração. Ao longo da operação da ETA-piloto o PFD foi limpo apenas no intervalo entre carreiras. Esse procedimento pode ter provocado uma limpeza não eficaz, deixando estabelecida no meio filtrante uma película de impurezas envolvendo os grãos filtrantes, já colonizadas por microrganismos, que favoreceu o rápido amadurecimento do PFD e sua boa performance.

A aplicação dos testes estatísticos aos valores de remoção de turbidez e clorofila-a (Análise de Variância e Teste de Tukey) revelam que a diferença de performance é significativa no caso de turbidez, ou seja, a hipótese de que as remoções são iguais foi rejeitada, mas não é significativa no caso da clorofila-a. Essa diferença de comportamento pode dever-se a fatores estatísticos (tamanho da amostra), ou pode estar associada à característica do PFD ser voltado para remoção de sólidos em suspensão de maior dimensão.

Os pré-filtros ascendentes, por sua vez, mostraram-se mais eficientes na remoção de clorofila-a e turbidez, durante a segunda carreira de filtração, indicando que o aumento da taxa de filtração nessas unidades influencia negativamente a performance das mesmas.

A diferença de eficiência de remoção, tanto de turbidez como de clorofila-a, verificada nos pré-filtros ascendentes entre a segunda e terceira carreiras de filtração é, de acordo com a Análise de Variância e o Teste de Tukey, significativa. Entretanto, é importante observar na Figura 5.36 que a influência da taxa parece ser maior na remoção de algas do que na remoção de turbidez, e também na performance do pré-filtro ascendente com camada de topo de granulometria mais fina (PFA-2). Ou seja, os resultados sugerem que a influência da taxa de filtração depende do tipo de impureza a ser removida (turbidez, algas e suas espécies, microorganismos, etc.) e da distribuição granulométrica adotada.

Tal fato pode explicar a contradição observada entre os resultados obtidos no presente trabalho, e resultados reportados por Di Bernardo e Rocha (1990), que sugerem que o aumento da taxa de filtração nos pré-filtro de escoamento ascendentes até $36 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$ não acarreta prejuízo no desempenho do PFA. Cabe destacar que no trabalho de Di Bernardo e Rocha (1990) a remoção de algas foi avaliada em duas situações: (1) em água bruta onde a turbidez variou de 15 a 100 uT e a concentrações de algas de era de cerca de 10^3 células por litro; e, (2) no caso de picos de algas com concentrações de até 10^6 células por litro. As duas situações são distintas da avaliação realizada no presente estudo (baixa turbidez e elevada e contínua concentrações de algas), além de tratar-se de espécies de algas bem diferenciadas.

Observando-se as Tabelas 5.22 e 5.23, nota-se que a perda de carga atingida nos pré-filtros ascendente foi mais elevada na segunda carreira de filtração do que na terceira, embora nessa última a taxa de filtração tenha sido 1,5 vezes maior do que na anterior. O desenvolvimento da perda de carga no meio filtrante está associado à obstrução dos interstícios, em função da retenção das impurezas, e do conseqüente aumento da velocidade intersticial. Dessa forma, como a retenção não foi tão eficiente na terceira carreira, a velocidade intersticial aumentou de forma mais gradual nesta carreira, resultando em menor perda de carga.

Ainda da análise das Tabela 5.22 e 5.23 verifica-se que os filtros lentos produziram efluentes com qualidades semelhantes nas duas carreiras de filtração, porém a perda de carga desenvolvida nessas unidades diferem consideravelmente. É importante salientar que, o monitoramento das vazões afluente a essas unidades foram realizadas de forma diferenciada nessas duas carreiras de filtração.

Durante a segunda carreira de filtração a vazão afluyente a essas unidades foram monitoradas volumetricamente e controlada através da abertura e fechamento de registros. No intervalo entre essas carreiras foram instalados rotômetros na linha de alimentação dos filtros lentos aumentando-se assim, o controle e a precisão do monitoramento das vazões. A partir desse fato acredita-se que a taxa de 3 m³/m².dia foi obedecida apenas durante a terceira carreira de filtração e na segunda carreira de filtração trabalhou-se com taxas, provavelmente, maiores.

5.7.3 - Quantificação de fitoplâncton

A diversidade de espécies de algas no Lago Paranoá é considerada baixa e predomina, de forma significativa, uma cianofíceia filamentosa classificada como *Cylindrospermopsis raciborskii*, que constitui 99% da biomassa algal (Altafin *et al.*, 1995). A predominância dessa espécie vem sendo continuamente confirmada no programa de monitoramento limnológico realizado pela CAESB no Lago Paranoá (Cavalcanti, 1996).

Durante a segunda e terceira carreiras de filtração, foram realizadas quantificações do fitoplâncton da água em amostras tomadas semanalmente, nos mesmos pontos onde foram determinados os demais parâmetros. O objetivo principal dessas determinações foi o de verificar a existência de correlação entre a quantificação de fitoplâncton e as medidas de clorofila-a, como forma de avaliar o uso do teor de clorofila-a como uma medida indireta da concentração de algas.

A quantificação do fitoplâncton foi realizada de acordo com os procedimentos sumarizado no Apêndice C, sendo que, para as algas filamentosas essa medida foi expressa em mg/l, enquanto para as algas não-filamentosas foi usado o número de indivíduos/l de amostra. As Tabelas 5.27 e 5.28 apresenta os valores médios obtidos nessas determinações.

Tabela 5.27 - Valores médios de biomassa de Algas Filamentosas obtidos na água bruta e nos efluentes de cada unidade do sistema e suas respectivas eficiências de remoção.

	Algas Filamentosas (mg/l)					
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
2 ^a carreira	24,4	13,6 (49,0%)	4,7 (64,6%)	1,9 (78,5%)	0,3 (94,9%)	0,3 (84,4%)
3 ^a carreira	21,9	11,1 (51,4%)	7,6 (35,6%)	6,0 (51,9%)	0,2 (94,3%)	0,3 (88,5%)

Nota: Os valores entre parênteses correspondem as eficiências de remoção média de cada unidade.

Tabela 5.28 - Valores médios de biomassa de Algas Não Filamentosas obtidos na água bruta e nos efluentes de cada unidade do sistema.

	Algas Não Filamentosas (nº de indivíduos/ litro)					
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
2ª carreira	4,2	1,1	0,4	0,4	0,3	0,2
3ª carreira	0,7	0,4	0,5	0,5	0,1	0,1

A Figura 5.34 mostra a correlação obtida para as determinações de clorofila-a e de biomassa algal para as algas filamentosas. Percebe-se a alta correlação existente entre essas duas medidas, pelo valor de R^2 , que é o Coeficiente de Correlação que mede o ajuste da reta aos pontos, indicando que, no presente estudo, a clorofila-a é um bom parâmetro de avaliação da concentração de algas. Essa boa correlação era já esperada uma vez que, como já mencionada, o Lago Paranoá apresenta uma espécie bastante dominante.

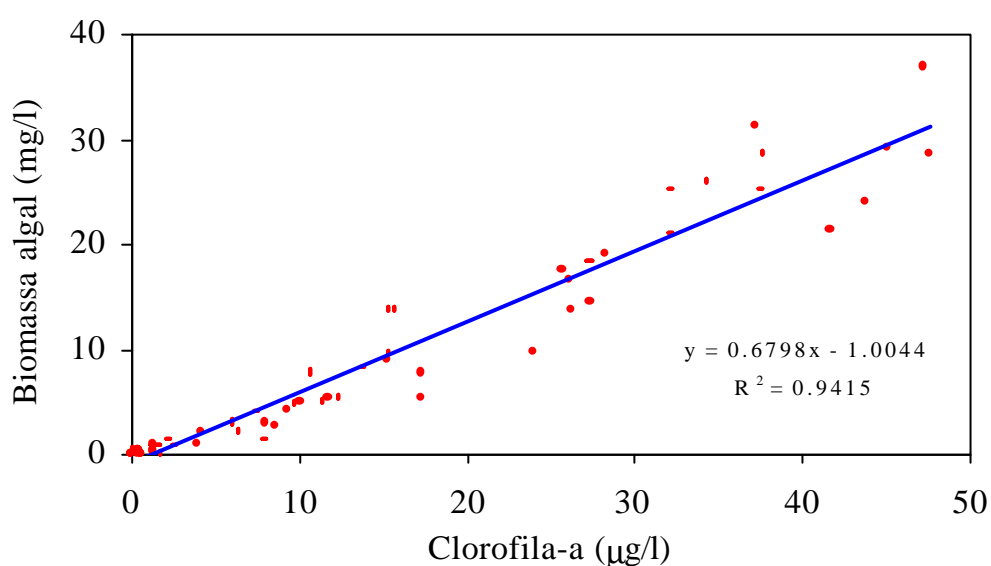


Figura 5.34 - Valores obtidos de biomassa algal *versus* teores de clorofila-a

As fotos que se seguem (Figuras 5.35 a 5.38) ilustram o aspecto da água relativo à presença de fitoplâncton nas diversas etapas do tratamento. As fotos foram obtidas a partir da ampliação em microscópio invertido (350 vezes), em amostras usadas para quantificação de fitoplâncton. Observa-se a diminuição da presença de algas, e do tamanho dos seus filamentos, na sequência do tratamento.

Figura 5.35 – Aspecto da água bruta.

Figura 5.36 –Aspecto do efluente do pré-filtro dinâmico.

Figura 5.37 – Aspecto do efluente do pré-filtro ascendente 2.

Figura 5.38 – Aspecto do efluente do filtro lento 2.

6 - CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES

O presente trabalho constitui-se em um estudo pioneiro sobre a utilização da tecnologia de tratamento conhecida como Filtração em Múltiplas Etapas- FiME no tratamento de águas com elevada concentração de algas. Desta forma as observações e conclusões apresentadas tem um caráter preliminar, e novos estudos devem ser realizado visando a validação e, possível, generalização da mesmas.

Dos resultados obtidos foi permitido verificar que a tecnologia da FiME, constituído por pré-filtro dinâmico, pré-filtro com escoamento ascendente em camadas e filtro lento, apresenta grande potencial de aplicação também no tratamento de águas com elevadas concentrações de algas.

A unidade de pré-filtração dinâmica apresentou uma maior capacidade de absorver as variações de turbidez da água bruta do que as variações nos teores de clorofila-a. Verificou-se uma tendência de maior eficiência de remoção, tanto de turbidez quanto de clorofila-a, quando a água bruta apresentou maiores valores dessas características.

Muito embora se tenha trabalhado com água bruta com valores de turbidez relativamente baixos e sem apresentar "picos", o desempenho do pré-filtro dinâmico mostrou-se, em média, comparável com desempenho atribuído a essa unidade na literatura.

O pré-filtro ascendente com 5 camadas, com camada de topo com granulometria mais fina, apresentou-se mais eficiente que o pré-filtro ascendente com 4 camadas, tanto na remoção de turbidez quanto na remoção de clorofila-a, sendo que, esse melhor desempenho foi mais evidente quando tratou-se da remoção de algas (clorofila-a). Destaca-se assim a importância da seleção cuidadosa deste parâmetro de projeto em função das características da água a ser tratada, ou seja, da caracterização detalhada das impurezas presentes (turbidez, sólidos em suspensão e sua distribuição de tamanho, algas e suas espécies, *etc*).

O aumento da taxa de filtração de $12\text{m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ para $18\text{ m}^3/\text{m}^2.\text{dia}$ influenciou, negativamente, na eficiência de remoção dos pré-filtros com escoamento ascendente. O impacto da variação foi mais evidente na remoção de algas (clorofila-a) do que na remoção de turbidez, sendo que o PFA-2 (5 camadas, granulometria de topo mais fina) sofreu maior influência que o PFA-1 (4 camadas). Porém o fato de que durante a terceira carreira o PFD obteve melhor desempenho, produzindo efluente de melhor qualidade, também pode ter contribuído para esse comportamento pois, de uma forma geral, a literatura mostra que o desempenho dos pré filtros-ascendentes cai com a melhora da qualidade da água afluente a essas unidades. Torna-se necessária, a partir dessa constatação, a análise do comportamento

das unidades de pré-filtração ascendente operando com taxas diferenciadas, porém com afluentes de mesma qualidade, para ser possível uma conclusão mais definitiva com relação aos fatores que influenciaram no comportamento diferenciado dessas unidades.

As unidades de pré-filtração apresentaram, em todas as carreiras, desempenho crescente nos primeiros dias de funcionamento, indicando a existência de um “período de amadurecimento” com impacto na remoção de impurezas, particularmente, de algas.

Esse fato pode ter implicações no procedimento operacional das estações de FiME quando aplicados ao tratamento de água com elevadas concentrações de algas, uma vez que, para garantir carreiras de filtração mais longas nos filtros lentos, talvez, essas unidades tenham que ser colocadas em operação somente após vencido o período de amadurecimento do sistema de pré-tratamento. Tal procedimento é diferenciado do que é sugerido pelos estudos da aplicação dessa tecnologia no tratamento de água com teores do sólidos elevados, onde recomenda-se que, no início de operação, o afluente à instalação seja encaminhado diretamente ao filtro lento com o objetivo de se minimizar o “período de amadurecimento” do filtro lento e evitar a penetração excessiva das partículas menores na camada de areia. (Di Bernardo, 1993).

A qualidade da água tratada produzida nos pré-filtros, avaliada através dos parâmetros turbidez e clorofila-a, não influenciou, de forma significativa, a qualidade da água efluente dos filtros lentos, porém, teve reflexos consideráveis na duração da carreira de filtração.

Percebeu-se, que essas unidades apresentaram um comportamento típico com relação a existência de um período inicial caracterizado pela formação da superfície de coesão ou “Schmutzdecke” que contribui significativamente para a retenção das impurezas.

A alta correlação encontrada entre as quantificações de fitoplâncton e as medidas de clorofila-a, mostrou a viabilidade de se considerar o teor de clorofila-a como uma boa medida indireta da concentração de algas, porém deve-se ressaltar, mais uma vez, que a diversidade de espécies de algas no Lago Paranoá é considerada baixa e predomina, de forma significativa, uma cianofíceia filamentosa classificada como *Cylindrospermopsi raciborskii* o que contribuiu para essa alta correlação.

Da observação do comportamento do sistema diante das situações testadas, recomenda-se:

a) a avaliação de diferentes taxas de filtração nas unidades pré-filtração ascendente, ampliando a faixa de estudo da influencia desse parâmetro no desempenho dessas unidades;

b) o estudo da minimização da espessura do meio filtrante das unidades de pré-filtração ascendente, através da redução das espessuras das sub-camadas inferiores e/ou retirada de uma das camadas de granulometria mais grosseira;

c) verificar a interferência da frequência das limpezas no desempenho das unidades de pré-filtração com relação à remoção de algas;

d) estudar o efeito da alimentação dos pré-filtros com escoamento ascendente com a água bruta no início da operação, na tentativa de diminuir o “período de amadurecimento”;

e) desenvolver estudos similares ao apresentado com águas de diferentes lagos e reservatórios, contendo populações de algas distintas, de modo a avaliar o impacto das espécies e suas características no desempenho da pré-filtração em pedregulho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Altafin, I.G., Mattos, S.P., Cavalcanti, C.G.B. e Estuqui, V.R. (1995). "Paranoá Lake - Limnology and recovery program." In: Tundisi, J.G., Bicudo, C.E.M. e Tundisi, T.M., (eds.) *Limnology in Brazil*, ABC/SBL, Rio de Janeiro.
- ASSEMAE - Associação Nacional dos Serviços Municipais de Água e Esgoto (1996). *1º Diagnóstico Nacional dos Serviços Municipais de Saneamento*. ASSEMAE, Brasília, Brasil.
- ABES - Associação Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental (1994). *Catálogo Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. CABES XVII, ABES, Rio de Janeiro.
- APHA, AWWA & WPCF (1985). *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*. 19ª ed., Washington, D.C., 1268p.
- Boller, M. (1993). "Filter mechanisms in roughing filters". *J. Water SRT - Aqua*, Vol. 42, No. 3, pp 174-185.
- Bresaola, R. (1990). *Estudos Comparativos do Desempenho de Sistemas Constituídos de Pré-Filtros de Pedregulho - Filtro Lento de Areia e Pré-Filtro de Areia - Filtro Lento de Areia para Tratamento de Águas de Abastecimento*, Tese de Doutorado, Escola de Engenharia de São Carlos, 196p.
- Cavalcanti, C.G.B. (1996). Comunicação pessoal.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1978). *Normalização Técnica L5.303 - Determinação de Fitoplâncton de Água Doce - Métodos Qualitativo e Quantitativo*. São Paulo, Brasil.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1978). *Normalização Técnica L5.306 - Determinação de Pigmentos Fotossintetizantes Clorofila-A, B e C e Feofitina-A*. São Paulo, Brasil.
- CETESB - Companhia de Tecnologia de Saneamento Ambiental (1979). *Normalização Técnica L5.318 - Procedimento de Exame de Fitoplâncton de Água Doce*. São Paulo, Brasil.
- Clarke, B.A., Lloyd, B.J., Jones, C.J. e Evans, H.L. (1996). "Water treatment by multistage filtration utilising gravel prefilters and fabric enhanced slow sand filters." In: Graham, N. e Collins, R. (eds.), *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra.
- Cleasby, J.L. (1991). "Source water quality and pretreatment options for slow filters." In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, Nova Iorque, E.U.A.

- Di Bernardo (1991). *Seminário Nacional sobre Pré-Filtração e Filtração Lenta de Águas de Abastecimento*. São Carlos, Brasil.
- Di Bernardo, L. (1993). *Métodos e Técnicas de Tratamento de Água*, vols. 1 e 2. ABES, Rio de Janeiro.
- Di Bernardo, L. (1995). *Algas e suas Influências na Qualidade das Águas e nas Tecnologias de Tratamento*, ABES, Rio de Janeiro.
- Di Bernardo, L. (1996). Comunicação pessoal.
- Di Bernardo, L. e Collazos, A.P. (1990). “Comparação entre a pré-filtração em pedregulho e areia grossa com fluxo ascendente e fluxo descendente como pré-tratamento da filtração lenta.” In: *IV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. Belo Horizonte, Brasil.
- Di Bernardo, L. e Rocha, O. (1990). “Remoção de algas em pré-filtro de fluxo ascendente com meio granular de pedregulho e areia grossa.” In: *IV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, Brasil.
- Di Bernardo, L., Rocha, O. e Varesche, M. B. A. (1990). “Influência de algas planctônicas no desempenho de filtros lentos de areia.” In: *IV Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Belo Horizonte, Brasil.
- Di Bernardo, L., Veras, L.R.V., Brandão, C.C.S., Galvis, G., Wiecheteck, G.K. e Mello, O.M.T. (1998). Aceito para publicação no XXVI Congresso Interamericano de Ingeniería Sanitaria y Ambiental, 01 – 05 de novembro de 1998, Lima, Peru.
- EPA - Environmental Protection Agency (1992). *Small Community Water and Wastewater Treatment*. Summary Report, EPA, E.U.A..
- Fogel, D., Isaac-Renton, J., Guasparini, R., Moorehead, W. e Ongerth, J. (1993). “Removing and Cryptosporidium by Slow Sand Filtration.” In: *Journal of American Water Works Association*, Vol 85, No. 11, pp. 77-84.
- Galvis, G., e Fernandez, J. (1991). *Manual de Diseño, Operacion y Mantenimiento de Filtros Gruesos Dinamicos (versión preliminar)*. IRWA, Cali, Colômbia.
- Galvis, G., Fernández, J. e Visscher, J. T. (1992). “Comparative study of different pretreatment alternatives.” Anais do *Kiesfiltration in der Wasseraufbereitung (Roughing Filters for Water treatment)*. Workshop em Zurique, 25 a 27 de junho, Suíça.
- Galvis, G., Latorre, J. e Visscher, J.T. (1997). *Filtración en Múltiples Etapas. Tecnologia Innovativa para el Tratamiento de Agua (versión preliminar)*. IRC, CINARA, Colômbia.
- Galvis, G., Latorre, J., Ochoa, A.E. e Visscher, J.T. (1996). “Comparison of horizontal and upflow roughing filtration.” In: Graham, N. e Collins, R. (eds.), *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra.

- Galvis, G., Di Bernardo, L. e Brandão, C.C.S. (1998). “Filtração em múltiplas etapas no tratamento de águas de abastecimento.” In: *Simpósio Luso-Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*. João Pessoa, Paraíba, Brasil.
- Haarhoff, J. e Cleasby, J.L. (1991). “Biological and physical mechanisms in slow sand filtration.” In: Logsdon, G.S. (ed.) *Slow Sand Filtration*, ASCE, Nova Iorque, E.U.A.
- Hendricks, D.W. e Bellamy, W.D. (1991). “Microorganism removals by slow sand filtration.” In: *Logsdon, G.S. (ed.) Slow Sand Filtration*. ASCE, Nova Iorque.
- Hespanhol, (1987). “Filtração lenta.” In: Azevedo Netto, J.M. (ed.) *Técnicas de Abastecimento de Água*, vol. 2. CETESB, São Paulo.
- Horne, A.J. e Goldman, C.R. (1994). *Limnology*. McGraw-Hill International Editions - Biological Science Series. E.U.A., 575p.
- Kawamura, S. (1991). *Integrated Design of Water Treatment Facilities*. John Wiley & Sons, Inc., EUA, 658 p.
- Ives, K.J. e Rajapakse, J.P. (1988). “Pretreatment with pebble matrix filtration. University College London.” In: Graham, N. (ed.) *Slow Sand Filtration: Recent Developments in Water Treatment Technology*. Ellis Horwood Ltd, Inglaterra.
- Lacerda, M.R.S. (1997). *A Influência do pH de Coagulação e do Tempo de Floculação na Flotação por Ar Dissolvido no Tratamento de Água com Baixa Turbidez e Presença de Algas*. Dissertação de mestrado, Departamento de Engenharia Civil, Universidade de Brasília, Brasília, Brasil.
- Latorre, J.M. e Hincapie G., M.M. (1996). “Filtración en multiples etapas-FiME. Algunos factores limitantes. Caso de estudio Yacuanquer-Nariño, Colômbia.” *Anais da Conferencia Internacional Mejoramiento de la Calidad del Agua*, Santiago de Cali, 30 de abril a 4 de maio, Colômbia.
- Latorre, J., Galvis, G. e Vissler, J.T. (1996). “Performance evaluation of dynamic roughing filtration.” In: Graham, N. e Collins, R. (eds.), *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra.
- Leland, D.E. e Logsdon, G.S. (1991). “Pilot plant for slow sand filters.” In: Logsdon, G.S., (ed.) *Slow Sand Filtration*. ASCE, Nova Iorque, EUA.
- Mbwette, T.S.A. (1992). “The treatment and operational performance of roughing filters in Tanzania.” *Anais do Kiesfiltration in der Wasseraufbereitung (Roughing Filters for Water Treatment)*. Workshop em Zurique, 25 a 27 de junho, Suíça.
- Ministério da Saúde (1990). *Normas e Padrão de Potabilidade das Águas Destinadas ao Consumo Humano*. Portaria 36/GM, Brasília, Brasil.
- Pardón, M. (1992). “Research, development and implementation of roughing filtration technology in Peru.” *Anais do Kiesfiltration in der Wasseraufbereitung (Roughing Filters for Water Treatment)*. Workshop em Zurique, 25 a 27 de junho, Suíça.

- Perez, J.C. (1992). "Filtración lenta – Diseño." In: *Programa Regional de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*, CEPIS.
- Pinto, N.S., Holtz, A.C.T., Martins, J.A. e Gomide, F.L.S. (1976). *Hidrologia Básica*. Edgard Blücher, São Paulo, Brasil.
- Saidam, M.Y. e Butler, D. (1996). "Algae removal by horizontal flowrock filters." In: Graham, N. e Collins, R. (eds.), *Advances in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*. John Wiley & Sons Ltd, Inglaterra.
- Sawyer, C.N., McCarty, P.L. e Parkin, G.F. (1994). *Chemistry for Environmental Engineering*. Fourth Edition, McGraw-Hill International, Nova Iorque, EUA, 658p.
- Vargas, C.V. (1992). "Filtración lenta en arena." In: *Programa Regional de Mejoramiento de la Calidad del Agua para Consumo Humano*, CEPIS.
- Vargas F.V., Galvis C.,A., Hincapie G., M. M. e Latorre, J. (1996). "Filtración en Múltiples Etapas: Selección de Tecnología considerando riesgo sanitario, eficiencia y costos." In *Conferencia Internacional Mejoramiento de la Calidad del Agua*, Univalle, CINARA, Santiago de Cali, Colômbia.
- Vieira, S. e Hoffmann, R. (1989). *Estatística Experimental*. Atlas, São Paulo, Brasil.
- Visscher, J. T., Paramasivam, R., Raman, A., e Heilnen, H. A. (1992). *Filtracion Lenta en Arena - Tratamiento de Agua para Comunidades: Planeación, diseño, construcción, operación y mantenimiento*. IRC, Holanda e CINARA, Colômbia, 163 p.
- Visscher, J.T., Galvis, G. e Latorre, J. (1996). "Filtración en multiples etapas-FiME: bondades e limitaciones." *Anais da Conferencia Internacional Mejoramiento de la Calidad del Agua*, Santiago de Cali, 30 de abril a 4 de maio, Colômbia.
- Wegelin, M. (1988). "Roughing gravel filters for suspended solids removal." In: Graham, N. (ed.) *Slow Sand Filtration: Recent Developments in Water Treatment Technology*. Ellis Horwood Ltd, Inglaterra.
- Wegelin, M. (1991). "Horizontal-flow roughing filtration." *Anais do Seminário Internacional Mejoramiento de la Calidad de Agua para Consumo Humano*. Santiago de Cali, 4 a 8 de novembro, Colômbia.
- Wegelin, M., Inngallinella, A.M. e Stecca, L.M. (1996). "Filtragruesa ascendente en manto de grava-Rehabilitación de la etapa previa a los filtros lentos de la planta potabilizadora de Tarata, Bolivia." *Anais da Conferencia Internacional Mejoramiento de la Calidad del Agua*, Santiago de Cali, 30 de abril a 4 de maio, Colômbia.
- Wheeler, D., Bartram, J. e Lloyd, B.J. (1988). "The removal of viruses by filtration through sand." In: Graham, N. (ed.) *Slow Sand Filtration: Recent Developments in Water Treatment Technology*. Ellis Horwood Ltd, Inglaterra.

Referências bibliográficas citadas em *apud* .:

- Aggio, C.E.G.A. (1993). *A Comunidade Biótica dos Filtros Lentos de Areia*. Dissertação de Mestrado, Biblioteca da Escola de Engenharia de São Carlos da Universidade de São Paulo, São Carlos, Brasil.
- Hazen, A. (1913). *The Filtration of Water Public Supplies*. John Wiley and Sons, 3 rd edition. New York, USA.
- Palmer, M. (1958). *Algae in Water Supplies – A Manual for Water Works Operators and Others Concerned with Algae in Relation to Water Quality*. Department of Health, Education and Welfare, Robert A. Taft Sanitary Engineering Center, Cincinnati, E.U.A.
- Ridley, J. E. (1967). "Experience in the use of slow sand filtration double sand filtration and microstraining". *Prac. Soc. Water. Treat. Exam.* 16, 170 pp.
- Smet, J.E.M. e Visscher, J.T. (1989). *Pretreatment Methods for Community Water Supply. An Overview of Techniques and Present Experience*. The Nedherland: IRC–Intern. Water and Sanitation Centre; Colombia: Universidad del Cali, Cali, 174p.
- Varesche, M. B. A. (1989). *Estudo Sobre a Interferência de Algas no Sistema de Filtração Lenta em Areia* - Dissertação de mestrado. Biblioteca da Escola de Engenharia de São Carlos - USP, São Carlos, Brasil.
- Wegelin, M. (1984). *Horizontal - Flow Roughing Filtration - An Appropriate Pre-Treatment for Slow Sand Filters in Developing Countries*. WHO - ARCWDN - IRC, Aug. 1984, Duebendorf - Switzerland.
- Wegelin, M. (1991). "Roughing Filters for Surface Water Pretreatment". *Slow Sand Filtration Workshop - AWWA*. October 1991, Durham, USA.

APÊNDICE A - ESTATÍSTICA DESCRITIVA

A.1 – DADOS DE TURBIDEZ E CLOROFILA-a

As tabelas a seguir apresentam os resultados da estatística descritiva aplicada aos valores de turbidez e clorofila-a obtidos na água bruta e nos efluentes das unidades componentes do sistema. São apresentadas, também, os resultados dos cálculos das eficiências de remoção de cada unidades do sistema para esses dois parâmetros.

Tabela A.1 – Estatística descritiva dos dados de turbidez (primeira carreira de filtração).

Turbidez (uT) - 1ª Carreira						
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	20	20	20	20	13	13
Média	8,16	5,42	3,75	2,93	1,01	1,12
Mínimo	3,70	2,60	1,60	1,50	0,20	0,30
Máximo	12,00	7,20	5,30	4,40	2,70	3,30
Desvio Padrão	2,05	1,38	1,04	0,74	0,81	0,79
Coef. De variação	0,25	0,25	0,28	0,25	0,80	0,71

Tabela A.2 – Estatística descritiva dos dados de turbidez (segunda carreira de filtração).

Turbidez (uT) - 2ª carreira						
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	47	47	47	47	16	27
Média	8,70	4,17	2,13	1,56	0,63	0,48
Mínimo	4,80	1,86	0,24	0,30	0,05	0,04
Máximo	19,70	7,30	5,10	6,00	1,80	1,60
Desvio Padrão	3,01	1,16	1,11	1,08	0,46	0,37
Coef. De variação	0,35	0,28	0,52	0,70	0,72	0,78

Tabela A.3 – Estatística descritiva dos dados de turbidez (terceira carreira de filtração).

	Turbidez (uT) - 3ª carreira					
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	55	55	55	55	34	33
Média	8,67	3,31	2,08	1,74	0,50	0,42
Mínimo	5,03	1,57	0,65	0,50	0,12	0,17
Máximo	16,00	6,61	4,43	4,88	1,39	0,82
Desvio Padrão	2,23	1,03	0,98	1,02	0,29	0,19
Coef. De variação	0,26	0,31	0,47	0,59	0,59	0,45

Tabela A.4 – Estatística descritiva dos dados de remoção de turbidez (primeira carreira de filtração).

	Eficiência de remoção de turbidez (%) - 1ª carreira				
	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	20	20	20	13	13
Média	32,5	30,6	44,9	72,8	60,2
Mínimo	14,1	16,7	25,4	40,0	19,5
Máximo	66,2	45,9	58,3	87,9	80,0
Desvio Padrão	13,7	8,5	10,1	14,7	17,7
Coef. De variação	0,42	0,28	0,22	0,20	0,29

Máxima eficiência atingida pelo Sistema: 97,4 %

Tabela A.5 – Estatística descritiva dos dados de remoção de turbidez (segunda carreira de filtração).

	Eficiência de remoção de turbidez (%) – 2ª carreira				
	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	47	47	47	16	26
Média	48,9	50,6	64,5	71,1	56,7
Mínimo	3,7	1,9	-5,3	37,5	0,0
Máximo	80,0	87,7	88,1	97,8	96,6
Desvio Padrão	17,0	18,0	17,8	19,6	26,5
Coef. De variação	0,35	0,36	0,28	0,28	0,47

Máxima eficiência atingida pelo Sistema: 100,0 %

Tabela A.6 – Estatística descritiva dos dados de remoção de turbidez
(terceira carreira de filtração).

Eficiência de remoção de turbidez (%) – 3ª carreira					
	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	55	55	55	34	34
Média	60,8	39,3	50,0	65,4	62,6
Mínimo	26,1	-1,2	4,2	21,0	3,6
Máximo	79,2	69,5	80,7	93,2	100,0
Desvio Padrão	12,0	17,7	18,4	18,6	20,1
Coef. De variação	0,20	0,45	0,37	0,28	0,32
Máxima eficiência atingida pelo Sistema: 100,0 %					

Tabela A.7 – Estatística descritiva dos dados de clorofila-a (primeira carreira de filtração).

Clorofila-a - 1ª carreira						
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	6	6	6	6	3	3
Média	39,59	29,78	23,09	16,50	1,66	1,44
Mínimo	29,03	17,96	17,32	10,75	0,80	1,28
Máximo	52,93	47,63	37,21	29,72	2,89	1,76
Desvio Padrão	10,28	10,44	7,61	6,90	1,09	0,28
Coef. de variação	0,26	0,35	0,33	0,42	0,66	0,19

Tabela A.8 – Estatística descritiva dos dados de clorofila-a (segunda carreira de filtração).

Clorofila-a - 2ª carreira						
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	20	20	20	20	7	11
Média	31,20	18,52	11,19	6,75	2,06	0,73
Mínimo	3,53	1,28	0,64	0,32	0,64	0,00
Máximo	52,28	30,31	27,91	21,65	5,13	2,41
Desvio Padrão	13,82	8,96	6,61	5,91	1,44	0,72
Coef. de variação	0,44	0,48	0,59	0,88	0,70	0,98

Tabela A.9 – Estatística descritiva dos dados de clorofila-a (terceira carreira de filtração).

Clorofila-a - 3ª carreira						
	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	23	23	23	23	14	13
Média	34,24	15,73	13,57	11,34	0,80	0,34
Mínimo	4,81	2,89	1,60	0,80	0,00	0,00
Máximo	61,43	35,60	31,76	27,59	2,57	1,28
Desvio Padrão	13,57	8,12	7,58	6,73	0,81	0,44
Coef. de variação	0,40	0,52	0,56	0,59	1,02	1,28

Tabela A.10 – Estatística descritiva dos dados de remoção de clorofila-a (primeira carreira de filtração).

Eficiência de remoção de clorofila-a (%) – 1ª carreira					
	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	6	6	6	3	3
Média	25,4	21,2	44,2	93,5	91,3
Mínimo	10,0	3,6	21,4	92,2	88,9
Máximo	38,5	33,0	53,5	95,6	94,1
Desvio Padrão	12,8	10,0	12,6	1,8	2,6
Coef. De variação	0,50	0,47	0,28	0,02	0,03

Máxima eficiência atingida pelo Sistema: 97,2 %

Tabela A.11 – Estatística descritiva dos dados de remoção de clorofila-a (segunda carreira de filtração).

Eficiência de remoção de clorofila-a (%) – 2ª carreira					
	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	20	20	20	7	11
Média	41,4	41,2	64,4	81,0	81,7
Mínimo	-1,3	-11,6	16,0	51,6	50,0
Máximo	75,3	63,7	85,4	95,0	100,0
Desvio Padrão	17,5	18,2	19,0	14,9	16,9
Coef. De variação	0,42	0,44	0,30	0,18	0,21

Máxima eficiência atingida pelo Sistema: 100,0 %

Tabela A.12 – Estatística descritiva dos dados de remoção de turbidez
(terceira carreira de filtração).

Eficiência de remoção de clorofila-a (%) – 3ª carreira					
	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	23	23	23	14	13
Média	52,2	15,5	31,3	90,1	95,4
Mínimo	-19,3	-5,5	0,0	60,0	80,0
Máximo	78,0	44,6	72,3	100,0	100,0
Desvio Padrão	22,6	14,4	16,7	10,9	6,2
Coef. De variação	0,43	0,93	0,53	0,12	0,06
Máxima eficiência atingida pelo Sistema: 100,0 %					

A.2 – ESTATÍSTICA DESCRITIVA DOS DEMAIS PARÂMETROS MEDIDOS

As tabelas apresentadas nesse tópico são relativas à estatística descritiva dos demais parâmetros de qualidade da água determinados em cada etapa da seqüência do tratamento. Em alguns casos, em função do número de dados medidos são mostrados os dados brutos.

Tabela A.13 – Estatística descritiva dos valores de temperatura
(primeira carreira de filtração).

Temperatura (C°) – 1ª carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	19	19	19	19	12	12
Média	23,0	23,5	23,3	23,5	22,4	22,4
Mínimo	21,0	21,0	19,0	18,0	19,0	19,0
Máximo	27,0	27,0	29,0	28,0	27,0	27,0
Desv. Padrão	1,67	1,61	2,51	2,48	2,58	2,50
Coef. De variação	0,07	0,07	0,11	0,11	0,12	0,11

Tabela A.14 – Estatística descritiva dos valores de temperatura (segunda carreira de filtração).

	Temperatura (C°) – 2ª carreira de filtração					
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	27	27	27	27	8	12
Média	26,1	26,3	25,4	25,8	24,8	24,8
Mínimo	23,0	24,0	23,0	23,0	22,0	22,0
Máximo	30,0	30,0	29,0	29,0	30,0	28,0
Desv. Padrão	1,61	1,41	1,50	1,65	2,49	1,80
Coef de variação	0,06	0,05	0,06	0,06	0,10	0,07

Tabela A.15 – Estatística descritiva dos valores de temperatura (terceira carreira de filtração).

	Temperatura (C°) – 3ª carreira de filtração					
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	42	42	42	42	34	33
Média	27,0	27,0	26,1	26,2	24,7	24,7
Mínimo	25,0	25,0	24,0	24,0	23,0	23,0
Máximo	29,0	29,0	28,0	28,0	26,0	26,0
Desv. Padrão	1,14	1,10	1,13	1,15	0,97	0,89
Coef de variação	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabela A.16 – Estatística descritiva dos valores de pH (primeira carreira de filtração).

	pH – 1ª carreira de filtração					
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	19	19	19	19	12	12
Média	7,5	7,1	7,0	6,8	6,8	6,8
Mínimo	6,5	6,4	6,4	6,4	6,5	6,5
Máximo	8,4	8,8	8,5	8,0	7,7	7,7
Desv. Padrão	0,61	0,65	0,57	0,42	0,42	0,40
Coef de variação	0,08	0,09	0,08	0,06	0,06	0,06

Tabela A.17 – Estatística descritiva dos valores de pH (segunda carreira de filtração).

pH – 2ª carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	27	27	27	27	8	12
Média	7,3	6,9	6,7	6,6	6,6	6,6
Mínimo	6,5	6,4	6,3	6,3	6,5	6,4
Máximo	8,4	8,1	7,3	7,3	6,7	6,8
Desv. Padrão	0,57	0,41	0,26	0,23	0,08	0,13
Coef de variação	0,08	0,06	0,04	0,03	0,01	0,02

Tabela A.18 – Estatística descritiva dos valores de pH (terceira carreira de filtração).

pH – 3ª carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	55	55	55	55	34	33
Média	6,4	6,4	6,4	6,4	6,4	6,5
Mínimo	6,0	6,0	6,0	6,0	6,0	6,1
Máximo	6,9	6,9	7,0	6,8	6,8	7,1
Desv. Padrão	0,25	0,25	0,24	0,23	0,24	0,23
Coef de variação	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04	0,04

Tabela A.19 – Estatística descritiva dos valores de condutividade (segunda carreira de filtração).

Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$) – 2ª carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	18	18	18	18	8	12
Média	70,1	69,2	70,1	70,3	76,2	71,0
Mínimo	61,8	60,9	62,7	61	71,8	56,1
Máximo	80,7	78,8	75,2	77,1	82,4	81,3
Desv. Padrão	4,66	4,50	3,97	4,63	4,15	7,71
Coef de variação	0,07	0,07	0,06	0,07	0,05	0,11

Tabela A.20 – Estatística descritiva dos valores de condutividade
(terceira carreira de filtração).

Condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$) – 3 ^a carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	18	18	18	18	10	10
Média	61,49	61,19	61,57	61,83	62,86	64,61
Mínimo	55,30	58,40	57,30	57,60	57,00	58,00
Máximo	65,00	64,30	68,00	67,80	68,70	70,30
Desv. Padrão	2,38	1,78	2,48	2,50	3,57	4,28
Coef de variação	0,04	0,03	0,04	0,04	0,06	0,07

Tabela A.21 – Estatística descritiva dos valores de alcalinidade (segunda carreira de filtração).

Alcalinidade ($\text{mg CaCO}_3 /\text{L}$) – 2 ^a carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	11	11	11	11	5	6
Média	23,5	22,3	23,6	23,0	22,6	22,7
Mínimo	22	20	20	18	14	20
Máximo	28	24	32	27	26	26
Desv. Padrão	1,81	1,74	3,23	2,45	4,88	2,34
Coef de variação	0,08	0,08	0,14	0,11	0,22	0,10

Tabela A.22 – Estatística descritiva dos valores de dureza (segunda carreira de filtração).

Dureza ($\text{mg CaCO}_3 /\text{L}$) – 2 ^a carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	11	11	11	11	4	7
Média	15,0	13,8	13,6	14,0	17,6	14,7
Mínimo	8,4	8,5	9,0	9,4	6,9	8,6
Máximo	37,8	21,8	18,6	20,2	22,2	19,0
Desv. Padrão	8,6	5,3	4,3	4,5	7,3	5,0
Coef de variação	0,57	0,38	0,32	0,32	0,41	0,34

Tabela A.23 – Estatística descritiva dos valores de ferro total (segunda carreira de filtração).

	Ferro (mg Fe/L) – 2ª carreira de filtração					
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	8	8	8	8	3	5
Média	0,27	0,05	0,03	0,01		0,05
Mínimo	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01
Máximo	0,82	0,14	0,09	0,07	0,09	0,14
Desv. Padrão	0,27	0,04	0,03	0,02		0,05
Coef de variação	0,99	0,95	1,20	1,80		1,19

A.2.6 Nutrientes

Tabela A.24 – Estatística descritiva dos valores de fósforo total (terceira carreira de filtração).

	Fósforo total (mg PO ₄ ⁻³ /l) – 3ª carreira de filtração					
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	6	6	6	6	4	4
Média	0,53	0,47	0,46	0,58	0,53	0,77
Mínimo	0,34	0,32	0,33	0,35	0,43	0,42
Máximo	0,70	0,72	0,69	1,28	0,73	1,61
Desv. Padrão	0,13	0,15	0,14	0,35	0,14	0,57
Coef de variação	0,25	0,33	0,30	0,60	0,26	0,74

Tabela A.25 – Estatística descritiva dos valores de nitrato (terceira carreira de filtração).

	Nitrato (mg NO ₃ -N/l) – 3ª carreira de filtração					
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	6	6	6	6	4	4
Média	1,05	1,05	1,32	1,05	0,95	1,00
Mínimo	0,60	0,60	0,60	0,60	0,70	0,70
Máximo	1,50	2,00	2,60	2,10	1,30	1,50
Desv. Padrão	0,34	0,52	0,74	0,55	0,26	0,36
Coef de variação	0,33	0,50	0,56	0,53	0,28	0,36

Tabela A.26 – Estatística descritiva dos valores de nitrogênio amoniacal
(terceira carreira de filtração).

Nitrogênio amoniacal (mg NH ₃ -N/l) – 3 ^a carreira de filtração						
Unidades:	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
Número de dados	6	6	6	6	4	4
Média	0,33	0,28	0,20	0,19	0,12	0,01
Mínimo	0,10	0,11	0,01	0,01	0,00	0,00
Máximo	0,80	0,95	1,00	1,01	0,35	0,05
Desv. Padrão	0,25	0,33	0,39	0,40	0,16	0,02
Coef de variação	0,74	1,14	1,96	2,05	1,29	1,59

Tabela A.27 – Valores de cor verdadeira obtidos nas determinações realizadas
durante a 3^a carreira de filtração.

Cor verdadeira (uH) – 3 ^a carreira de filtração						
Data	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
23/jan	2,0	1,0	2,0	3,0		
26/jan	5,0	7,0	5,0	5,0		
18/fev	13,0	5,0	5,0	5,0	5,0	3,0
23/fev	5,0	5,0	2,0	2,0	2,0	1,0

Tabela A.28 - Valores de DQO (Demanda Química de Oxigênio) obtidos
durante a 3^a carreira de filtração

DQO (mg/l de O ₂) – 3 ^a carreira de filtração						
Data	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
27/jan	10,2	6,7	5,6	4,6		
03/fev	16,4	11,1	8,7	8,4	4,6	5,1
13/fev	17,2	13,3	12,1	9,2	4,7	4,8
17/fev	7,1	5,5	6,3	6,1	4,3	2,7
24/fev	14,1	9,1	7,7	7,6	4,3	4,8

Tabela A.29 - Coliformes Totais encontrados nas determinações realizadas durante a 2^a carreira de filtração.

Coliformes Totais (NMP/100 ml) – 2 ^a carreira de filtração						
Data	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
21/out	44	460	240	43		
27/out	460	1100	460	240		
30/out	>2400	1100	240	1100		
07/nov	93	9	43	<3		
10/nov	>2400	460	460	75		
14/nov	290	35	9	120	15	<3
18/nov	>2400	93	93	28	7	<3
24/nov	4	4	3	<3	<3	4
01/dez	<3	460	>2400	23		93
05/dez	35	93	15	150		<3

Tabela A.30 - Coliformes Totais encontrados nas determinações realizadas durante a terceira carreira de filtração.

Coliformes Totais (NMP/100 ml) – 3 ^a carreira de filtração						
Data	AB	PFD	PFA-1	PFA-2	FL-1	FL-2
10/fev	>8 000	33	49	166	5	0
16/fev	130	34	130	166		0
25/fev	79	79	0	130	0	0
02/mar	11	33	7	2	0	0

APÊNDICE B - ANÁLISE ESTATÍSTICA DOS DADOS

B.1 – DESCRIÇÃO RESUMIDA DOS TESTES UTILIZADOS

Para elaboração desse tópico adotou-se como referência o livro “Estatística Experimental” (Vieira e Hoffmann, 1989).

B.1.1 – Teste de hipóteses

Uma hipótese pode ser definida como uma afirmativa sobre a população. Os testes de hipóteses permitem estabelecer se tais afirmativas são confirmadas pelos dados disponíveis. As hipóteses feitas pelos pesquisadores são transformadas, pelos estatísticos, em hipóteses estatísticas, para que possam ser submetidas aos testes. Existem sempre duas hipóteses em teste.

A primeira hipótese é denominada **hipótese de nulidade** e a segunda é denominada **hipótese alternativa**. Indica-se a primeira hipótese por H_0 e a segunda por H_1 . Assim, por exemplo:

H_0 : as médias são iguais

H_1 : as médias são diferentes

Para decidir-se por uma das hipóteses – isto é, para se decidir as médias das amostras são, ou não são, iguais – o pesquisador submete os dados de suas amostras a um **teste de hipóteses**. Esses testes consistem em supor que as médias são iguais. Se, sob essa hipótese, for **pouco provável** ocorrer uma diferença de médias tão grande ou maior do que a que se observou nas amostras, o pesquisador rejeita a hipótese inicial e conclui que as médias são diferentes.

Mas **pouco provável** não significa **impossível**. Então, pode-se cometer erro quando conclui-se que, as médias são diferentes só porque seria **pouco provável** ocorrer uma diferença de médias tão grande, ou maior do que a observada, se as médias das amostras fossem iguais. O pesquisador não sabe se está ou não cometendo esse tipo de erro, embora a **probabilidade** de ocorrer o erro seja conhecida. É o que os estatísticos denominam **nível de significância** do teste (probabilidade de rejeitar H_0 quando H_0 é verdadeira).

B.1.2 - Análise de Variância

A idéia, na Análise de Variância, é comparar a variação provocada por certo fato ou causa com a variação devido ao acaso. Pretende-se saber, com isso, até que ponto as diferenças observadas entre as médias são suficientemente grandes para serem tomadas como evidência de que elas são estatisticamente diferentes.

Para fazer Análise Variância de um experimento inteiramente ao acaso é preciso calcular as seguintes quantidades:

a) os graus de liberdade:

de tratamentos: $k - 1$

do total: $n - 1$, com $n = kr$

do resíduo: $(n - 1) - (k - 1) = n - k$

onde:

k = número de tratamentos

n = total de repetições de todos os tratamentos

b) o valor de C , dado pelo total geral elevado ao quadrado e dividido pelo número de observações. O valor C é conhecido como correção:

$$C = (\sum y)^2 / n$$

c) a soma de quadrados total (SQT):

$$SQT = \sum y^2 - C$$

d) a soma de quadrados de tratamentos (SQTr):

$$SQTr = \sum T^2 - C$$

e) a soma dos quadrados de resíduo (SQR):

$$SQR = SQT - SQTr$$

f) o quadrado médio de tratamentos (QMTr):

$$QMTr = SQTr / (k-1)$$

g) o quadrado médio de resíduo (QMR):

$$\text{QMR} = \text{SQR} / (n-k)$$

h) o valor de F:

$$F = \text{QMTr} / \text{QMR}$$

O valor de F calculado dessa forma é então comparado ao valor crítico de F (tabelado), associado a um nível de significância. Se o $F_{\text{calculado}}$ for menor do que o $F_{\text{crítico}}$ então aceita-se, a esse nível de significância pré estabelecido, a hipótese de que as médias são iguais.

B.1.3 - Comparação entre médias pelo Teste de Tukey

O método consiste, basicamente, no cálculo da **diferença mínima significativa** entre duas médias. Toda vez que o valor absoluto da diferença entre duas médias é igual ou maior do que a diferença mínima significante, as médias são consideradas estatisticamente diferentes, ao nível de significância estabelecido.

Para obter o valor da diferença mínima significativa (d.m.s.) pelo Teste de Tukey basta calcular:

$$\text{d.m.s.} = q (\text{QMR} / r)^{0,5}$$

onde o q é um valor dado em tabela em função dos graus de liberdade do resíduo, ao nível de significância estabelecido, QMR é o quadrado médio do resíduo da Análise de Variância e r é o número de repetições de cada um dos tratamentos. De acordo com o teste, duas médias são estatisticamente diferentes toda vez que o valor absoluto da diferença entre elas for igual ou maior do que a d. m. s.

Se o número de repetições por tratamento não é constante, a fórmulas para o cálculo da diferença mínima significativa pelo Teste de Tukey fica:

$$\text{d.m.s.} = q [(1/r_i + 1/r_j) \text{QMR}]^{0,5}$$

onde r_i e r_j são o número de repetições dos tratamentos em comparação.

B.2 – RESULTADOS DA APLICAÇÃO DA ANÁLISE DE VARIÂNCIA E DO TESTE DE TUKEY.

Nas comparações que se seguem são utilizadas as seguintes hipóteses alternativas:

H_0 = as médias são iguais;

H_1 = as médias são diferentes.

Tabela B.1 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de turbidez da água bruta obtidos nas três carreiras de filtração.

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
1 ^a X 2 ^a				0,54	1,61
1 ^a X 3 ^a	0,36	3,07	Aceita-se H_0	0,51	1,57
2 ^a X 3 ^a				0,03	1,20

Tabela B.2 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos teores de clorofila-a da água bruta obtidos nas três carreiras de filtração.

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
1 ^a X 2 ^a				8,39	15,08
1 ^a X 3 ^a	0,95	3,21	Aceita-se H_0	5,35	14,85
2 ^a X 3 ^a				3,04	9,91

Tabela B.3 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFD durante a 2^a e 3^a carreiras de filtração.

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
2 ^a X 3 ^a	17,10	3,95	Rejeita-se H_0	11,90	5,72

Tabela B.4 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFD durante a 2^a e 3^a carreiras de filtração.

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
2 ^a X 3 ^a	2,99	4,08	Aceita-se H ₀	10,78	12,62

Tabela B.5 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFA-1 durante a 2^a e 3^a carreiras de filtração

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
2 ^a X 3 ^a	10,21	3,95	Rejeita-se H ₀	11,33	7,05

Tabela B.6 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFA-1 durante a 2^a e 3^a carreiras de filtração

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
2 ^a X 3 ^a	26,76	4,08	Rejeita-se H ₀	25,72	10,06

Tabela B.7 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFA-2 durante a 2^a e 3^a carreiras de filtração

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
2 ^a X 3 ^a	16,24	3,95	Rejeita-se H ₀	14,49	7,15

Tabela B.8 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFA-2 durante a 2^a e 3^a carreiras de filtração

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
2 ^a X 3 ^a	36,72	4,08	Rejeita-se H ₀	33,01	11,02

Tabela B.9 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de turbidez do PFA-1 e do PFA-2 durante as três carreiras de filtração.

PFA-1XPFA-2	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
1ª carreira	23,55	4,10	Rejeita-se H_0	14,28	5,97
2ª carreira	14,13	3,96	Rejeita-se H_0	13,86	7,33
3ª carreira	9,66	3,94	Rejeita-se H_0	10,70	6,84

Tabela B.10 - Resultados obtidos na Análise de Variância e aplicação do Teste de Tukey aos valores de eficiência de remoção de clorofila-a do PFA-1 e do PFA-2 durante as três carreiras de filtração.

	Análise de Variância			Teste de Tukey	
	F	F crítico	Conclusão	$ m_1 - m_2 $	d.m.s.
1ª carreira	12,31	4,96	Rejeita-se H_0	23,00	14,60
2ª carreira	15,53	4,10	Rejeita-se H_0	23,18	11,94
3ª carreira	11,92	4,07	Rejeita-se H_0	15,89	9,31

B.3 – TESTE KOLMOGOROV-SMIRNOV

Adotou-se como referência para a elaboração desse item o livro “Hidrologia Básica” (Pinto et al. 1976).

O Teste de Kolmogorov-Smirnov é um teste de aderência utilizado para testar adequação do ajuste de distribuições contínuas sem a utilização dos parâmetros estatísticos.

O teste consiste em comparar a função de distribuição acumulada amostral, $P_x(x)$, estimada pela frequência de observações (por, exemplo, pela relação entre o número de observações menores ou iguais a x e o número total de observações) e a função de distribuição acumulada postulada, $F_x(x)$, para, a seguir observar o máximo afastamento, em termos de probabilidade (D_2), entre as duas distribuições. Assim, deseja-se encontrar um valor de:

$$D_2 = \max |P_x(x) - F_x(x)|,$$

e o teste consiste em rejeitar a hipótese de adequação do ajuste se D_2 for “grande”.

Quando os parâmetros de $F_x(x)$ devem ser estimados a partir de amostra de população, o teste não é mais válido. No entanto, estudo indicam (Pinto *et al.*, 1976) que a aplicação incorreta do teste nesses casos é conservadora, isto é, a probabilidade de se rejeitar a hipótese básica é mais restritiva.

A Figura B.1 mostra o caso de aplicação do teste aos valores de eficiência de remoção de turbidez obtidas pelo PFA-2 durante a 3ª carreira de filtração. O D_2 , nesse caso, é igual a 0,089, que corresponde ao maior afastamento entre a função de distribuição acumulada amostral $F_x(x)$ e a função de distribuição acumulada postulada $F_x(x)$. O $D_{2crítico}$, para esse caso, onde o número de observações foi de 55 é 0,183, para um nível de significância de 5%. Como D_2 é menor que o $D_{2crítico}$ (Tabela B.1), aceita-se, a um nível de significância de 5%, a hipótese de adequação do ajuste dos valores obtidos a uma curva de distribuição normal. A Tabela B.11 apresenta os valores críticos de D_2 para o nível de significância de 5% e diversos tamanhos de amostra.

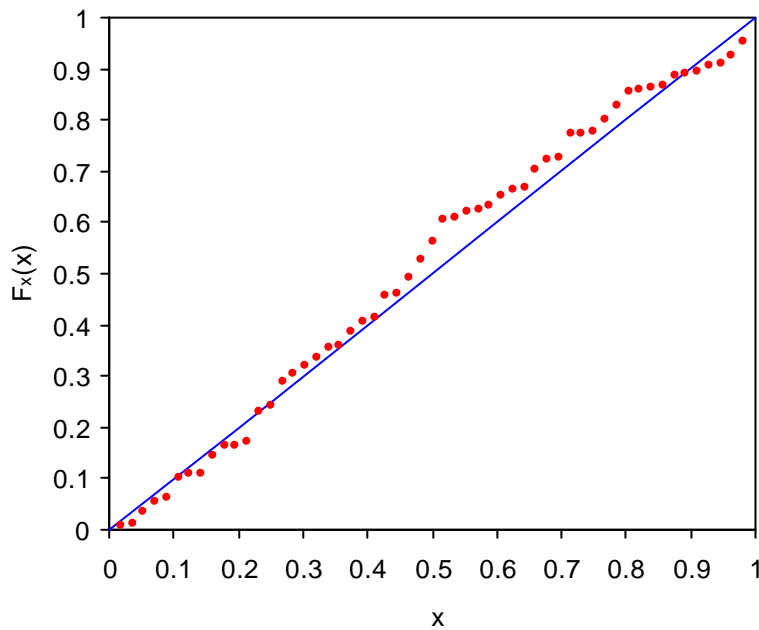


Figura B.1 - Exemplo gráfico da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de eficiência de remoção de turbidez obtida pelo PFA-2 durante a 3ª carreira de filtração.

Tabela B.11 - Valores críticos de D_2 , para o nível de significância de 5% para diversos tamanhos de amostra.

Número de observações (N)	$D_{2\text{crítico}}$ para um nível de significância de 5%
5	0,56
10	0,41
15	0,34
20	0,29
25	0,27
30	0,24
35	0,23
40	0,21
45	0,20
50	0,19
N>50	$1,36 / (N)^{0,5}$

Fonte: Pinto *et al.*, 1976.

A aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov foi realizado nos casos em que foi realizada a aplicação da Análise de Variância e do Teste de Tukey.

A Tabela B.12 mostra os resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de turbidez e clorofila-a da água bruta durante as três carreiras de filtração enquanto que as tabelas B.13 e B.14 apresentam os resultados da aplicação desse teste aos valores de eficiência de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidas no PFD, PFA-1 e PFA-2 durante a 2ª e 3ª carreiras de filtração.

Tabela B.12 - Resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de turbidez e clorofila-a da água bruta obtidos durante as três carreiras de filtração.

	Turbidez		Clorofila-a	
	D_2	$D_{2\text{crítico}}$	D_2	$D_{2\text{crítico}}$
1ª carreira	0,082	0,290	0,135	0,530
2ª carreira	0,161	0,196	0,113	0,290
3ª carreira	0,108	0,183	0,105	0,278

Tabela B.13 - Resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de eficiência de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidos no PFD, PFA-1 e PFA-2 durante a segunda carreira de filtração.

	2ª Carreira de filtração			
	Turbidez		Clorofila-a	
	D ₂	D ₂ crítico	D ₂	D ₂ crítico
PFD	0,085	0,196	0,045	0,300
PFA-1	0,057	0,196	0,137	0,300
PFA-2	0,178	0,198	0,141	0,290

Tabela B.14 - Resultados da aplicação do Teste de Kolmogorov-Smirnov aos valores de eficiência de remoção de turbidez e de clorofila-a obtidos no PFD, PFA-1 e PFA-2 durante a terceira carreira de filtração.

	3ª Carreira de filtração			
	Turbidez		Clorofila-a	
	D ₂	D ₂ crítico	D ₂	D ₂ crítico
PFD	0,177	0,183	0,163	0,282
PFA-1	0,083	0,183	0,118	0,282
PFA-2	0,089	0,0183	0,160	0,278

APÊNDICE C – DESCRIÇÃO RESUMIDA DA QUANTIFICAÇÃO DE FITOPLÂNCTON

O Lago Paranoá possui como alga predominante a alga azul filamentosa (cianobactéria) *Cylindrospermopsis raciborskii*, que constitui 99% da sua biomassa de algas, e desta forma apresenta baixa diversidade de espécies. Por esta razão não é realizada a contagem de indivíduos em um determinado volume (ind./L), mas a quantificação da biomassa fitoplânctonica (mg/L), mais especificamente da alga mencionada acima.

Assim sendo, amostras da água bruta (AB) e dos efluentes provenientes do pré-filtro dinâmico (PFD), dos pré-filtros ascendentes (PFAs) e dos filtros Lentos (FLs) foram coletadas em frascos opacos de 100 mL, devidamente etiquetados, fixados com 6 gotas de solução Lugol acético, e conservados à baixa temperatura.

No laboratório, as amostras são homogenizadas, e uma sub-amostra é retirada para análise.

No caso da existência de uma população muito densa de algas (10 ou mais indivíduos por campo) é aconselhável o uso de câmaras de sedimentação do plâncton com um volume de 0,13 mL, denominadas Palmer-Maloney.

As câmaras de sedimentação com volumes de 1 mL, como as de Utermöhl, podem ser uma boa opção para as população de menor densidade.

As câmaras de Palmer-Maloney foram utilizadas para as amostras AB, PFD e PFAs, enquanto as de Utermöhl para as amostras FLs.

O tempo de sedimentação do fitoplâncton varia conforme o volume das câmaras; para as câmaras de 0,13 e 1 mL, o tempo de sedimentação é de 15 e 60 minutos, respectivamente.

O microscópio composto invertido (Leitz) com um aumento de 320 vezes é o utilizado para este tipo de quantificação de algas.

Após a sedimentação em câmaras, as sub-amostras podem ser quantificadas totalmente ou uma fração desta. Quando se conta uma fração, pode-se fazê-lo aleatoriamente (10 campos escolhidos ao acaso) ou sistematicamente (diagonal).

A quantificação da alga *Cylindrospermopsis raciborskii* nas amostras AB e PFD foram realizadas aleatoriamente, enquanto que para PFAs e FLs a contagem foi sistemática.

A alga *Cylindrospermopsis raciborskii* é quantificada pela soma do comprimento de seus filamentos, através da contagem dos quadrados, existentes em um retículo (micrômetro ocular) do microscópio, e correspondentes à cada filamento.

À partir da contagem em triplicada (para cada uma das sub-amostra, três lâminas são lidas) é calculado o comprimento total de segmentos da alga *Cylindrospermopsis raciborskii* por litro de amostra. Esse cálculo é realizado de acordo com a expressão abaixo.

$$Z \times 10^6 \left(\frac{\mu\text{m cel}}{L} \right) = \frac{a \times b}{c}$$

onde:

$Z \times 10^6$ = Comprimento total de algas ($\mu\text{m cel./L}$).

a = média do número de quadrados contados correspondentes ao tamanho do filamento;

b = tamanho do lado do quadrado (μm);

c = Volume do transecto contado (L).

Posteriormente, calcula-se o volume de algas. Utiliza-se a área da seção da alga filamentosa que, neste caso, é de $7 \mu\text{m}^2$:

$$V \times 10^6 \left(\frac{\mu\text{m}^3 \text{ cel}}{L} \right) = Z \times 10^6 \times Y$$

onde:

Y = área da alga filamentosa (μm^2).

$V \times 10^6$ = Volume total de células por litro ($\mu\text{m}^3 \text{ cel./L}$).

Para a conversão do volume em biomassa (mg/L), considera-se que a densidade da alga é igual à densidade da água ($1\text{g/mL} = 1.000 \text{ mg}/10^3 \text{ L}$). Assim:

$$\text{Biomassa (mg/L)} = V \times 10^6 \frac{\mu\text{m}^3 \text{ cel}}{L} \times \frac{10^{-9} \text{ mg}}{\mu\text{m}^3} = V \times 10^{-3}$$

As algas não filamentosas (outras que não sejam a *Cylindrospermopsis raciborskii*) são quantificadas pelo número de indivíduos por Litro (ind./L):

A quantificação dos indivíduos é realizada utilizando-se de um microscópio composto invertido com magnitude de 320 vezes.

As leituras, em triplicada, de todas as sub-amostras são realizadas na diagonal, da qual pode-se calcular o seu volume (volume do transecto).

As câmaras utilizadas possuem um volume de 0,13 e 1 mL para as amostras AB; PFD; PFAs e FLs, respectivamente.

Tabela C.1 – Exemplo de planilha de quantificação de fitoplâncton.