

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FILTRO ANAERÓBIO UTILIZANDO
O MÉTODO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO SOLO: AVALIAÇÃO DE
TAXAS DE APLICAÇÃO**

Luiz Carlos Klüsener Filho

Campinas
2001

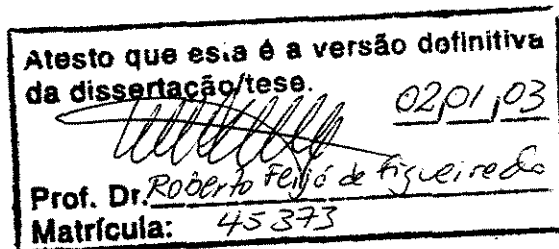
UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

**PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FILTRO ANAERÓBIO
UTILIZANDO O METODO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO
SOLO: AVALIAÇÃO DE TAXAS DE APLICAÇÃO**

Luiz Carlos Klüsener Filho

Orientador: Prof. Dr. Roberto Feijó de Figueiredo

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, área de concentração em Saneamento e Ambiente, como parte dos requisitos para obtenção do título de mestre em Saneamento e Ambiente.



Campinas, SP
2001

UNIDADE	BE
Nº CHAMADA	T/Unicamp
	K 716 p
V	EX
TOMBO BCI	55442
PROC.	16.124103
C	D
PREÇO	R\$ 11,00
DATA	30/08/03
Nº CPD	

CM00188449-0

Bib id 298616

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA - BAE - UNICAMP

~~K945p~~

K716p

Klüsener Filho, Luiz Carlos

Pós-tratamento de efluente de filtro anaeróbio
utilizando o método de escoamento superficial no solo:
avaliação de taxas de aplicação / Luiz Carlos Klüsener
Filho.--Campinas, SP: [s.n.], 2001.

Orientador: Roberto Feijó de Figueiredo.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual de
Campinas, Faculdade de Engenharia Civil.

1. Tratamento de efluente. 2. Águas residuais no
solo. 3. Resíduos – Eliminação no solo. 4. Saneamento
I. Figueiredo, Roberto Feijó de. II. Universidade
Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Civil.
III. Título.

UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA CIVIL

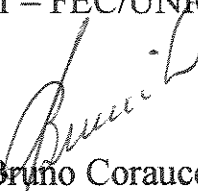
**PÓS-TRATAMENTO DE EFLUENTE DE FILTRO ANAERÓBIO UTILIZANDO
O METODO DE ESCOAMENTO SUPERFICIAL NO SOLO: AVALIAÇÃO DE
TAXAS DE APLICAÇÃO**

Luiz Carlos Klüsener Filho

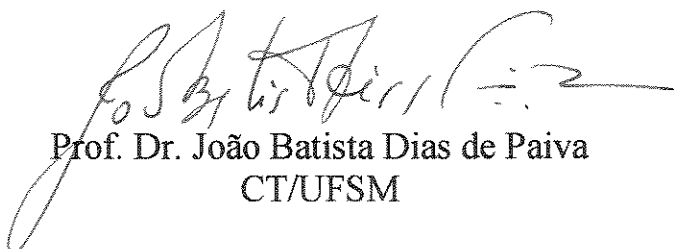
Dissertação de mestrado aprovada pela banca examinadora



Prof. Dr. Roberto Feijó de Figueiredo
Orientador – FEC/UNICAMP



Prof. Dr. Bruno Coraucci Filho
FEC/UNICAMP



Prof. Dr. João Batista Dias de Paiva
CT/UFSM

Campinas, 2001

A Deus, por me proporcionar mais esta etapa da vida.
A meus pais e irmãos, pelo exemplo de vida e incentivo.
A Eliza, minha esposa, pelo apoio e carinho em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Ao Prof. Roberto Feijó de Figueiredo, pela orientação, pela amizade e pelo auxílio prestado, sem o qual este trabalho jamais estaria concluído.

Ao Prof. Bruno Coraucci Filho, pela co-orientação prestada, mas sobretudo, pela amizade e apoio oferecidos em todas as etapas do projeto.

Aos amigos Ronaldo Stefanutti e Prof. Edson Aparecido Abdul Nour, por estarem sempre próximos e solícitos, acompanhando e vencendo todas as dificuldades encontradas.

A Silvana Broleze e Gustavo Silva pelo apoio, amizade e especialmente, auxílio nas análises de laboratório e coletas em campo.

A todos os colegas de laboratório.

A FAPESP pela concessão da bolsa de estudo.

A FINEP pelo apoio durante o PROSAB.

A Águas de Limeira S.A., pelo apoio na execução e operação da planta física do projeto.

A todos os amigos adquiridos nesta etapa da minha vida, os quais, de algum modo contribuíram para que tudo fosse possível e que jamais serão esquecidos.

RESUMO

No Brasil, a maior parte dos esgotos sanitários gerados não é tratada, constituindo um dos principais problemas de saúde pública. Um dos grandes desafios é tentar melhorar essa situação através de sistemas de tratamento que sejam razoavelmente eficientes e que apresentem baixo custo, características nas quais se enquadra o sistema de filtros anaeróbios. Entretanto, este carece de pesquisas para atingir um grau maior de eficiência. O presente trabalho visa melhorar essa eficiência agregando aos filtros anaeróbios um sistema de disposição controlada de efluente no solo, o método de escoamento superficial (“overland flow”). Obteve-se com este trabalho não apenas a melhoria da qualidade do efluente final do sistema, mas também a avaliação de parâmetros do sistema e das taxas hidráulicas de aplicação durante o seu funcionamento.

ABSTRACT

In Brazil, most of the generated sanitary sewers is not treated, constituting one of the main problems of public health. One of the great challenges is to try to improve this situation through treatment systems that are reasonably efficient and that they present low cost, characteristics in which it fits the system of anaerobic filters. However, this lacks of research to reach a bigger degree of efficiency. The present work aims at to improve this efficiency adding to the anaerobic filters a system of controlled disposal of effluent in the ground, the method of superficial draining (overland flow). The improvement of the quality of the effluent end of the system expects not only with this work, but also the determination of preliminary parameters of sizing, and the hydraulic load of excellent application for its functioning.

SUMÁRIO

	página
ÍNDICE DE TABELAS	iii
ÍNDICE DE FIGURAS	iv
LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS	vii
1 Introdução	01
2 Objetivos	04
2.1 Objetivos Gerais	04
2.2 Objetivos Específicos	04
3 Revisão Bibliográfica	06
3.1 Processos Anaeróbios	06
3.2 Sistemas Anaeróbios de Tratamento	11
3.3 Filtro Anaeróbio	14
3.4 Disposição de Efluentes no Solo	19
3.5 Escoamento Superficial no Solo	25
3.5.1 Considerações de Projeto	26
3.5.2 Cobertura Vegetal	31
3.5.3 Efeito das Precipitações	32
3.5.4 Partida nos Sistemas de Escoamento Superficial	33
3.5.5 Eficiência do Processo	34
4 Metodologia	37
4.1 Descrição do sistema de tratamento	37
4.2 Parâmetros Estudados	46
4.3 Pontos de amostragem	46
4.3 Frequência de amostragem	48
4.4 Parâmetros de dimensionamento	49
5 Resultados e discussão	51
5.1 projeto e operação	51
5.2 Resultados obtidos	52
6. CONCLUSÕES	71
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	73

ÍNDICE DE TABELAS

	página
Tabela 3.1	Sistemas anaeróbios de tratamento de esgotos 13
Tabela 3.2	Comparação qualitativa das águas residuais dos sistemas de disposição no solo 24
Tabela 3.3	Condições de aplicabilidade dos métodos de disposição no solo 24
Tabela 4.1	Caracterização do efluente a ser tratado no sistema em estudo 38

ÍNDICE DE FIGURAS

	página
Figura 3.1	Seqüência metabólica e microrganismos envolvidos na digestão anaeróbia
	8
Figura 3.2	Filtro anaeróbio de fluxo ascendente e recheio de pedra britada
	16
Figura 3.3	Processo de escoamento superficial no solo
	25
Figura 4.1	Esquema de montagem do sistema de pós-tratamento de efluente de filtro anaeróbio
	38
Figura 4.2	Esquema de Montagem do Tratamento Preliminar e Montagem dos Filtros
	39
Figura 4.3	Tratamento preliminar (reservatório superior e caixa de areia)
	40
Figura 4.4	Filtros anaeróbios de fluxo ascendente
	41
Figura 4.5	Bomba Centrífuga de rotor aberto (recalque para o tanque pulmão)
	42
Figura 4.6	Preparo das mudas da gramínea utilizada
	43
Figura 4.7	Detalhe dos anteparos de concreto utilizados para uniformizar o escoamento
	44

Figura 4.8	Vista da rampa utilizada no projeto (rampa central); Ao fundo os reservatórios de fibra de vidro, volume de 2000L cada um	45
Figura 4.9	Maquete do sistema	45
Figura 4.10	Pontos de coleta de efluente na rampa	47
Figura 4.11	Primeiro corte de grama efetuado (aos 30 dias)	50
Figura 5.1	Alcalinidade parcial e total ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	53
Figura 5.2	DBO Total e Filtrada ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	53
Figura 5.3	DQO Total e Filtrada ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	53
Figura 5.4	OD ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	54
Figura 5.5	pH ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	54
Figura 5.6	Temperatura ao longo do comprimento da rampa	54
Figura 5.7	Formas de Nitrogênio ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	55
Figura 5.8	Fósforo ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	55
Figura 5.9	Série de Sólidos ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	56
Figura 5.10	Sólidos Sedimentáveis ao longo do comprimento da rampa $t=0,10\text{m}^3/\text{m.h}$	56
Figura 5.11	Alcalinidade total ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	57

Figura 5.12	Alcalinidade parcial ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	57
Figura 5.13	DBO Total ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	57
Figura 5.14	DBO Filtrada ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	58
Figura 5.15	DQO Total ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	58
Figura 5.16	DQO Filtrada ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	58
Figura 5.17	pH ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	59
Figura 5.18	OD ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	59
Figura 5.19	Temperatura ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	59
Figura 5.20	Fósforo ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	60
Figura 5.21	NTK ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	60
Figura 5.22	Nitrogênio Amoniacal ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	60
Figura 5.23	Nitrato ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	61
Figura 5.24	Nitrito ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	61
Figura 5.25	Sólidos Totais, Dissolvidos, Suspensos ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	61
Figura 5.26	Sólidos Sedimentáveis ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	62
Figura 5.27	Sólidos Suspensos ao longo do comprimento da rampa $t=0,30\text{m}^3/\text{m.h}$	62
Figura 5.28	DQO ao longo do comprimento da rampa $t=0,20\text{m}^3/\text{m.h}$	63

Figura 5.29	OD ao longo do comprimento da rampa $t=0,20\text{m}^3/\text{m.h}$	63
Figura 5.30	DQO ao longo do comprimento da rampa $t=0,40\text{m}^3/\text{m.h}$	64
Figura 5.31	Sólidos Sedimentáveis ao longo do comprimento da rampa $t=0,40\text{m}^3/\text{m.h}$	64
Figura 5.32	Efluente ao longo do escoamento	65

LISTA DE ABREVIATURAS E SÍMBOLOS

%	porcentagem
ABES	Associação Brasileira de Engenharia Sanitária
ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
°C	grau centígrado
CH ₄	metano
CO ₂	gás carbônico
d.	dia
DBO	demanda bioquímica de oxigênio
DQO	demanda química de oxigênio
ETE	estação de tratamento de esgotos
h.	hora
kg	quilograma
L	litro
m	metro
MO	matéria orgânica
mg	miligramas

mm	milímetros
N	nitrogênio
N _{total}	nitrogênio total
NBR	norma brasileira regulamentar
N/cm ²	unidade de força – Newtons força por centímetro quadrado
n °	número
Obs.	observação
p	página
P _{total}	fósforo total
SS	sólidos suspensos
SST	sólidos suspensos totais
T	temperatura
t	unidade de tempo
UASB	reator anaeróbio de manta de lodo e fluxo ascendente
UNICAMP	Universidade Estadual de Campinas – SP
USEPA	U.S. Environmental Protection Agency

1 INTRODUÇÃO

O processo de crescimento da população, o qual a cada ano torna-se mais acelerado, bem como o instinto humano de viver em grupo, criando assim comunidades, cidades e grandes conurbações urbanas que além de consumirem os recursos naturais disponíveis em sua região, geram grandes cargas poluidoras pontuais em relação ao todo. Entretanto, sobrepujando o instinto humano existe a sua consciência, e a sua capacidade de discernir entre o certo e o errado, consciência esta que permite ao próprio homem relutar quanto a esta condição de vírus que o encaminha à destruição de todo o meio em que vive, em prejuízo, inclusive, da própria espécie. Face a esta situação, o homem procura aceitar suas responsabilidades, minimizando as conseqüências de seus atos, e mais especificamente, da poluição que produz.

Cada vez mais, os líderes de comunidades, procuram reduzir a carga poluidora que os seus produzem, e também realizar a recarga dos mananciais de água que consomem, permitindo um maior aproveitamento dos mesmos. Entretanto, um dos maiores entraves para o tratamento de qualquer efluente é o seu custo de construção e manutenção, principalmente para pequenas comunidades ou aquelas em que os recursos da população são mais escassos, o que o torna muitas vezes inviável, e é justamente

nestas pequenas comunidades que a preocupação com a poluição dos corpos d'água, geralmente é maior, devido ao seu intenso aproveitamento nas atividades rurais. Assim, é necessário o desenvolvimento de técnicas de tratamento mais econômicas, porém de eficiência comparável aos sistemas existentes, e que exijam um investimento relativamente baixo e com manutenção e operação reduzidas (NOUR, 1993).

Um dos sistemas de tratamento que tem sido mais aplicado é o que utiliza o processo anaeróbio, por ser de baixo custo, alternativo e que ainda gera energia que pode ser reaproveitada. No caso das condições particulares do Brasil, onde leva-se em conta as condições favoráveis do clima que apresenta temperaturas relativamente elevadas, o que propicia um melhor desempenho do sistema, o mesmo ocupa posição privilegiada no programa de saneamento do país. No entanto esses sistemas ainda necessitam de pesquisas para atingir um grau maior de eficiência, requisito este necessário para se atingir os padrões estabelecidos pela legislação em vigor no país, a qual pode ser obtida, quando visualiza-se um sistema de tratamento através de outras unidades, que farão um pós-tratamento dos efluentes gerados nos reatores anaeróbios.

O tratamento de efluentes através do método de disposição controlada de esgotos no solo é uma prática bastante antiga, encontrando-se referências de sua utilização em épocas bem remotas, anteriores à Era Cristã. Entretanto, por tratar-se de um sistema simples, eficiente, com mecanismos naturais de tratamento que envolvem processos físicos, químicos e biológicos, e, principalmente por constituir-se em um sistema de

baixos custos de construção e operação, assim como os reatores anaeróbios, tem-se firmado como uma alternativa viável para o pós-tratamento de efluentes gerados em reatores anaeróbios (PAGANINI, 1997)

Desta forma, será estudado neste trabalho um sistema utilizando pós-tratamento no solo, mais especificamente o processo de escoamento superficial no solo (“overland flow”), agregado a um sistema de filtros anaeróbios. No caso, optou-se pelo método do escoamento superficial por, além de ser um sistema alternativo e apresentar as qualidades acima mencionadas, também permite contemplar todos os fatores naturais de depuração envolvidos na redução de cargas poluentes, apresentando assim um grande potencial para aplicação no tratamento de esgotos sanitários.

2 OBJETIVOS

2.1 Objetivos Gerais

Este projeto visa dar continuidade às pesquisas com filtro anaeróbio, utilizando recheio de bambu, iniciadas pela equipe de pesquisadores da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP. Pretende-se fazer um pós-tratamento dos efluentes gerados nos filtros anaeróbios, através do uso do solo, com a finalidade de melhorar a qualidade sanitária daqueles efluentes.

2.2 Objetivos Específicos

Implantar e operar por 8 meses um sistema de baixo custo para o pós-tratamento dos efluentes de um conjunto de filtros anaeróbios, utilizando disposição no solo por escoamento superficial.

Realizar o monitoramento de parâmetros como pH, DBO, DQO, sólidos, nitrogênio, fósforo, e uma avaliação bacteriológica (coliformes e helmintos)

Obtenção de parâmetros para dimensionamento do sistema, bem como a determinação da taxa hidráulica de aplicação de efluente dos filtros anaeróbios, na rampa de escoamento, que corresponder à uma melhor eficiência no tratamento.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 Processos Anaeróbios

Os processos anaeróbios são sistemas biológicos naturais fundamentados na estabilização da matéria orgânica biodegradável por meio de diversos grupos de bactérias atuando conjuntamente na ausência de oxigênio dissolvido.

A estabilização da matéria orgânica pelos processos anaeróbios tem como principais produtos: o biogás, formado principalmente por metano (CH_4) e gás carbônico (CO_2); e uma pequena parcela é convertida em biomassa, resultando numa baixa produção de lodo. O material não estabilizado deixa o reator junto com o efluente, estando numa faixa de 10% a 30% da matéria orgânica presente no afluente (CHERNICHARO, 1997).

A digestão anaeróbia da matéria orgânica segue uma sequência mais complexa do que o processo aeróbio. A ocorrência desse processo é muito comum em vários tipos de ecossistemas naturais como áreas pantanosas, órgãos digestivos dos ruminantes e nos sedimentos de rios, lagos e mares (VAN HAANDEL & LETTINGA, 1994).

Atualmente, o tratamento anaeróbio de efluentes e de lodo tem sido largamente empregado devido principalmente às seguintes razões:

- Conversão de matéria orgânica indesejável em biogás com baixo custo de tratamento e economia de energia devido a eliminação de sistemas de aeração; e,
 - Baixa produção de sólidos aliada ao fato de que esses já saem dos sistemas estabilizados.
-

De maneira simplificada podemos dividir o processo de digestão anaeróbia em quatro estágios: Hidrólise, Acidogênese, Acetogênese e Metanogênese. Englobando estas podemos distinguir seis processos diferentes (GUJER & ZEHNDER, 1983):

- Hidrólise de biopolímeros;
 - Hidrólise de proteínas;
 - Hidrólise de lipídios; e,
 - Hidrólise de carboidratos.
- Fermentação de aminoácidos e açúcares;

- Oxidação anaeróbia de ácidos graxos de cadeias longas e álcoois;
- Oxidação anaeróbia de produtos intermediários como ácidos voláteis com exceção do acetato;
- Conversão do acetato em metano; e,
- Conversão de hidrogênio em metano.

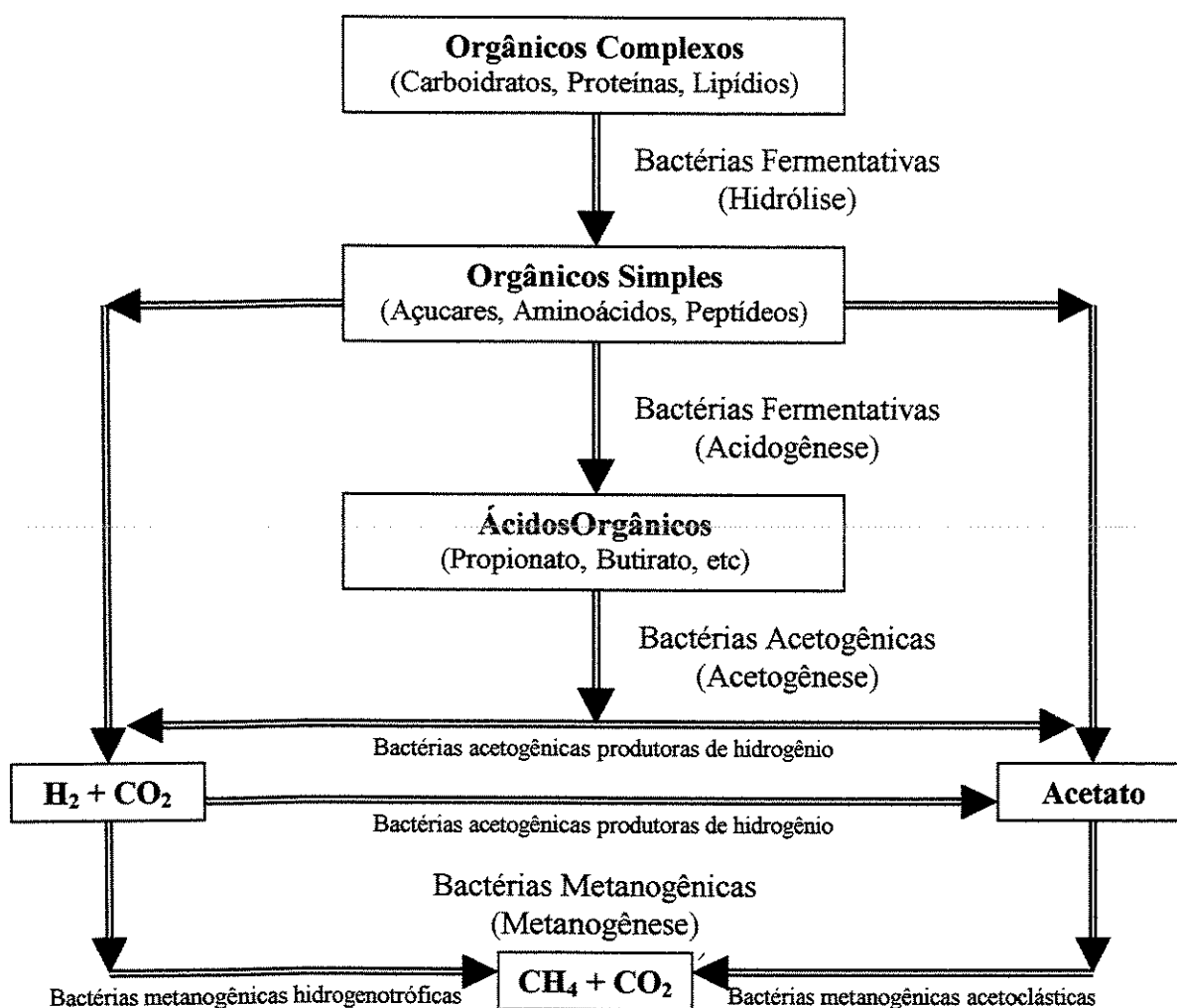


FIGURA 3.1 – Sequência Metabólica e Microrganismos Envolvidos na Digestão Anaeróbia

Fonte: CHERNICHARO (1997)

Cada estágio pode ser descrito como:

Hidrólise : é a fase onde ocorre a conversão dos biopolímeros (materiais particulados complexos) em materiais dissolvidos, mais simples, através de exoenzimas excretadas pelas bactérias fermentativas hidrolíticas.

Vários fatores podem afetar o grau e a taxa com que o substrato é hidrolisado (LETTINGA et al., 1996 citado por CHERNICHARO, 1997):

- Temperatura inicial do reator;
- Tempo de residência do substrato no reator;
- Composição do substrato;
- Tamanho das partículas;
- pH do meio;
- Concentração de $\text{NH}_4^+\text{-N}$; e,
- Concentração de produtos da hidrólise (ácidos voláteis, por exemplo).

Essa fase pode ser uma fase limitante no processo como um todo, pois alguns polímeros, como celulose, amido e algumas proteínas podem ser de difícil hidrólise, retardando ou impedindo as etapas subsequentes.

Acidogênese : Com a presença de substâncias dissolvidas no interior da célula bacteriana, inicia-se a produção de ácidos. O principal ácido produzido nesta fase é o ácido acético, pois a reação de formação deste ácido gera uma maior quantidade de energia para a célula. Quando a concentração de íon H^+ torna-se alta (pH baixo), ocorre a formação dos ácidos butírico e propiônico, consumindo este excesso.

Acetogênese : É caracterizado pela formação de acetato, carbonato e hidrogênio a partir dos ácidos graxos voláteis e dos demais produtos da acidogênese. Tais compostos formados servirão como substrato para a formação de metano. Esta fase é realizada pelas bactérias acetogênicas. É importante notar que não ocorre qualquer estabilização do resíduo durante os três primeiros estágios da digestão anaeróbia. Entretanto, esses três primeiros estágios têm um caráter fundamental, pois convertem a matéria orgânica em uma forma mais apropriada para a utilização na Quarta fase da digestão anaeróbia.

Metanogênese : é a etapa de maior interesse e normalmente limitante nos processos de digestão anaeróbia, já que as bactérias metanogênicas tem um tempo de duplicação mais lento que as acidogênicas. Consiste na formação de metano através de um número limitado de compostos como: ácido acético, hidrogênio/dióxido de carbono, ácido fórmico, metanol, metilaminas e monóxido de carbono (CHERNICHARO, 1997). Essas reações são realizadas por dois grupos principais de bactérias:

- **Metanogênicas Acetoclásticas** : são as bactérias utilizadoras de acetato. São as predominantes no processo de digestão anaeróbio, responsáveis por cerca de 60 a 70% da produção de metano (CHERNICHARO, 1997).
- **Metanogênicas Hidrogenotróficas** : produzem metano a partir de hidrogênio e dióxido de carbono.

A metanogênese em geral é o estágio que limita a velocidade do processo de digestão anaeróbia como um todo. Por este motivo o estudo das bactérias formadoras de metano é de grande importância. Esses organismos encontram-se entre os seres anaeróbios mais exigentes que se conhece (CASSEB, 1996).

3.2 Sistemas Anaeróbios de Tratamento

Os sistemas anaeróbios utilizados para o tratamento de esgotos podem ser divididos em dois grande grupos: os sistemas convencionais e os sistemas de alta taxa.

Os sistemas convencionais têm como característica básica a ausência de mecanismos de retenção de sólidos, o que dificulta a retenção de grandes quantidades de biomassa no sistema de tratamento. Em virtude disto, os sistemas convencionais são

projetados e operados com tempos de detenção hidráulica elevados, o que gera grandes volumes de reator, de modo a garantir a permanência da biomassa no sistema por tempo suficiente para o seu crescimento (CHERNICHARO, 1997).

Os sistemas de alta taxa tem a capacidade de reter grandes quantidades de biomassa de elevada atividade, mesmo com a utilização de baixos tempos de detenção hidráulica. Desta forma consegue-se um elevado tempo de retenção dos sólidos no sistema e, conseqüentemente, os reatores tornam-se mais compactos e com elevado grau de estabilização do lodo.

A grande vantagem dos sistemas de alta taxa é justamente o fato do tempo de retenção celular (tempo de permanência da unidade celular dentro do reator) ser independente do tempo de detenção hidráulica no reatores.

Os sistemas de alta taxa podem ser subdivididos em dois grandes grupos, de acordo com o mecanismo de retenção e crescimento da biomassa:

- Sistemas de crescimento aderido: a biomassa cresce aderida a um meio suporte, formando um biofilme. O biofilme pode estar aderido a um material estacionário ou móvel. O meio suporte pode ser constituído de materiais sólidos naturais (pedras, areia) ou artificiais (MACHADO, 1997); e,

- Sistemas de crescimento disperso: a biomassa cresce dispersa no meio líquido, sendo retida no sistema devido à formação de flocos e grânulos.

A TABELA 3.1 mostra os principais tipos de sistemas anaeróbios. Uma maior atenção será dada aos filtros anaeróbios, por este ser um dos objetos do presente trabalho.

SISTEMAS CONVENCIONAIS	
Tanques Sépticos	
Lagoas Anaeróbias, etc.	
SISTEMAS DE ALTA TAXA	
Filtro Anaeróbio	Obs.: Crescimento aderido
Biodisco Anaeróbio	Obs.: Crescimento aderido
Reator Anaeróbio de Leito Expandido	Obs.: Crescimento aderido
Reator Anaeróbio de Leito Fluidificado	Obs.: Crescimento aderido
Reator Anaeróbio de Dois Estágios	Obs.: Crescimento Disperso
Reator Anaeróbio de Chicanas	Obs.: Crescimento Disperso
Reator Anaeróbio de Manta de Lodo (UASB)	Obs.: Crescimento Disperso

TABELA 3.1 – Sistema Anaeróbios de Tratamento de Esgotos

Fonte – adaptado de ARAÚJO (1999)

3.3 Filtro Anaeróbio

No Brasil, o filtro anaeróbio começou a ser aplicado na década de 1970, apresentando bons resultados no tratamento de despejos industriais. Para tratamento de esgotos sanitários, tornou-se mais popular a partir de 1982, quando a ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) incorporou diretrizes básicas para projeto e construção de filtros anaeróbios, incentivando o seu uso associado aos tanques sépticos como unidade de pós-tratamento de efluentes (NBR 7229/82) (CAMPOS, 1999).

O filtro anaeróbio ascendente é basicamente uma unidade de contato, na qual os esgotos passam através de uma massa de sólidos biológicos contidas dentro do reator. A biomassa retida no reator pode se apresentar em três formas distintas (CHERNICHARO, 1997):

- Na forma de uma fina camada de biofilme aderido às superfícies do material suporte;
- Na forma de biomassa dispersa retida nos interstícios do material suporte; e,
- Na forma de flocos ou grânulos retidos no fundo falso, abaixo do material suporte.

Os compostos orgânicos solúveis contidos no esgoto afluyente entram em contato com a biomassa, difundindo-se através das superfícies do biofilme ou do lodo granular, sendo então convertidos em produtos intermediários e finais, especificamente metano e gás carbônico (CHERNICHARO, 1997).

O material suporte pode ser de vários tipos. Sendo mais usualmente utilizado a pedra britada e anéis de plástico, entretanto pode ser utilizados outros, como elementos cerâmicos, módulos de plástico tubulares, elementos de madeira, bambu (ROZON, 2000), esferas perfuradas, etc. Sempre ponderando o seu uso em função da sua eficiência e o seu custo.

A forma física do filtro em geral é definida observando-se aspectos estruturais e econômicos, entretanto deve-se sempre obter um fluxo bem distribuído por meio do leito filtrante, e uma altura do mesmo que acarrete na eficiência desejada.

O processo anaeróbio gera gases e odores fortes. Por isto, geralmente os filtros são cobertos para evitar a propagação dos mesmos, porém, a construção da cobertura pode representar uma parcela significativa no orçamento final devido as dificuldades estruturais que a mesma apresenta.

A nova norma da ABNT (NBR 13969) define que o filtro anaeróbio (“filtro anaeróbio de leito fixo com fluxo ascendente”) “consiste em um reator biológico no qual

o esgoto é depurado por meio de microorganismos não aeróbios, dispersos tanto no espaço vazio do reator quanto nas superfícies do meio filtrante”. Apresenta desenhos de quatro modelos: tipo retangular totalmente enchido de brita; tipo circular totalmente enchido de brita; tipo circular com entrada única de esgoto; e tipo circular com múltiplas entradas de esgoto. Contém especificações e detalhes construtivos para todos, prevendo pequenas vazões. Os dois últimos são na verdade reatores mistos (FIGURA 3.2), com duas câmaras: a inferior sem enchimento, por onde os esgotos entram, como em um reator de manto de lodo; e a Segunda, sobre um fundo falso, contendo o material de enchimento (brita) (CAMPOS, 1999).

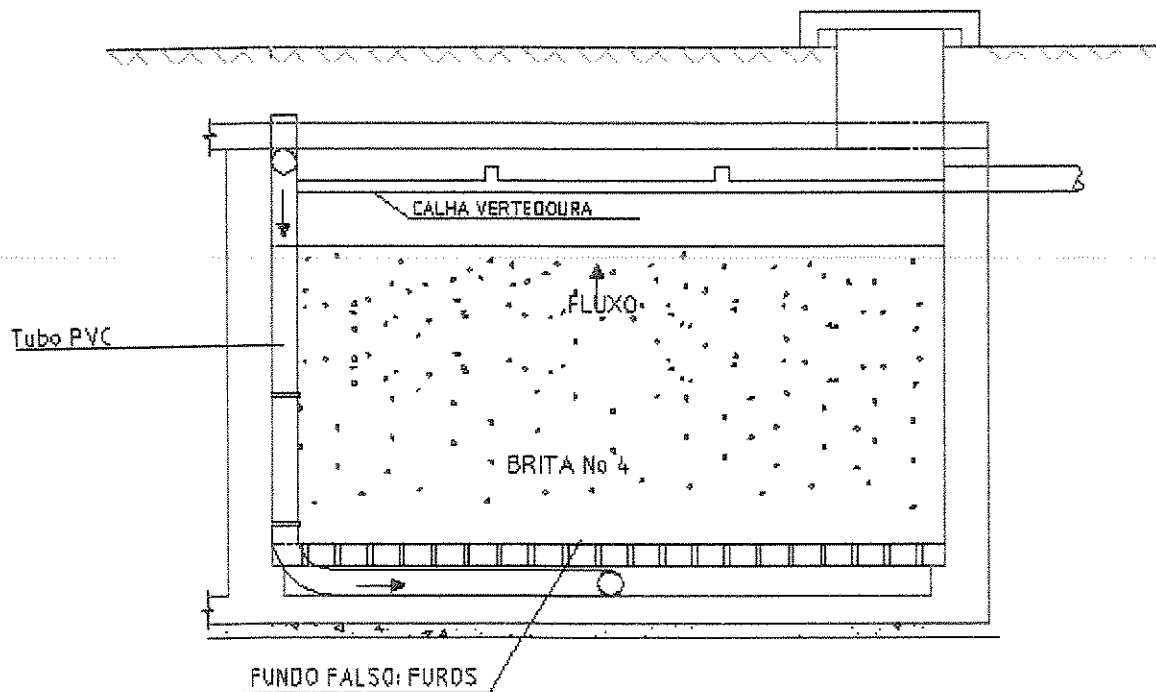


FIGURA 3.2 - Filtro Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Recheio de Pedra Britada

Em comparação à outros reatores anaeróbios, as principais ~~desvantagens~~ dos filtros anaeróbios são: risco de obstrução dos interstícios, sendo portanto mais indicado para trabalhar com esgotos com contaminantes predominantemente solúveis (baixa concentração de sólidos suspensos), a fim de evitar a colmatação do meio; volume relativamente grande devido ao espaço ocupado pelo meio filtrante, e o custo do mesmo (CAMPOS, 1999).

Campos (1999) define o efluente do filtro anaeróbio : “De forma geral, o efluente do filtro anaeróbio é bastante clarificado e tem relativamente baixa concentração de matéria orgânica, inclusive dissolvida, porém é rico em sais minerais. Presta-se muito bem para a disposição no solo, não somente por infiltração, mas, também para irrigação (revitalização do solo com fins de produção vegetal). Evidentemente, pode receber tratamento complementar para remoção de nutrientes eutrofizantes por meio de variados processos, quando necessário ou conveniente. Contém ainda grande quantidade de microorganismos patogênicos e, quando necessário, deve sofrer desinfecção, para a qual podem ser aplicados quaisquer dos processos usuais.”

Uma das principais vantagens apresentadas pelos filtros anaeróbios é a sua capacidade de tamponamento, resistindo às variações de vazão afluente e proporcionando uma boa estabilidade ao efluente, com baixa perda dos sólidos biológicos retidos no leito fixo. Dentre outras vantagens encontram-se a remoção de parte significativa da matéria

orgânica dissolvida; baixa produção de lodo; não consome energia; e, proporcionam enorme liberdade de projeto em termos de configurações e dimensões.

Quanto à eficiência na remoção de cargas orgânicas, pesquisas em escalas piloto de unidades de filtros anaeróbios precedidas apenas de tratamento preliminar (gradeamento e caixa de areia), indicaram eficiências médias de remoção de DBO e DQO variando entre 68 e 79%, em filtros operando com tempos de detenção hidráulica na faixa de 6 a 8 horas (PINTO & CHERNICHARO, 1995).

Apesar das vantagens oferecidas pelos sistemas anaeróbios de tratamento, os mesmos não podem ser encarados como uma forma completa de tratamento, uma vez que estes sistemas apresentam dificuldades para produzir efluentes que atendam aos padrões estabelecidos pela legislação ambiental.

A solução para este problema aparenta ser a utilização de sistemas combinados de tratamento, visando assim cumprir as metas estabelecidas. Araújo (1998), após pesquisas em escala piloto utilizando o método de disposição no solo, mais especificamente o método de escoamento superficial no solo, como pós-tratamento do efluente de um reator anaeróbio do tipo UASB, alcançou resultados bastante satisfatórios, inclusive quanto a níveis de remoção de nutrientes e coliformes fecais.

3.4 Disposição de Efluentes no Solo

Dentre as distintas categorias de processos naturais de tratamento de efluentes, destaca-se aquela baseada na disposição no solo, a qual, desde a implantação da *Federal Water Pollution Control Amendments* de 1972 (PL-92.500), no Estados Unidos, que aborda principalmente o reuso da água, houve um grande avanço na utilização deste tipo de tratamento naquele país. Hoje em dia, a disposição de esgotos no solo disseminou-se por todo o mundo, juntamente com novas pesquisas que estudam a sua aplicabilidade em conjunto com outros sistemas de tratamento.

Os processos de tratamento de esgotos através da disposição no solo incluem basicamente os seguintes métodos (KRUZIC, 1997):

- **Infiltração Rápida:** apresenta uma alta velocidade de infiltração de esgoto no perfil do terreno, possibilitando assim uma alta taxa de aplicação de efluente no solo. Devido a esta alta velocidade de percolação, a vegetação existente na superfície não consegue absorver uma parcela significativa de esgoto, sendo, portanto, dispensável uma vez que não interfere na depuração do mesmo.

A aplicação dos esgotos é feita por inundação, em terrenos que apresentem declividades suaves (4 a 6%); permeabilidade (permitir a rápida infiltração); e,

espessas camadas superficiais de solo, a fim de proteger o lençol subterrâneo da contaminação.

Torna-se necessário o estabelecimento de rodízios de aplicação através da divisão do terreno em módulos, a fim de que as condições aeróbias do solo possam ser restabelecidas. Um pré-tratamento do efluente por decantação primária também evita a rápida colmatação da superfície do solo (PAGANINI, 1997 e USEPA, 1981).

A remoção dos poluentes do esgoto pela ação retentora do solo é excelente. Os sólidos suspensos, DBO, coliformes fecais, são quase totalmente removidos nesse tipo de sistema. Valores médios de remoção de nitrogênio é de 50% (através de processos de nitrificação seguida de desnitrificação, no solo) e de 70 a 99% para o fósforo, ocorrendo através de processos de fixação no solo (USEPA, 1981).

- **Infiltração Lenta (Irrigação) :** é a descarga controlada do efluente sobre o solo com a finalidade de suportar o crescimento de plantações (objetivos agrícolas). Também é denominado de infiltração lenta quando tem por objetivo a depuração do esgoto, onde o esgoto é aplicado sobre o solo à uma baixa taxa e apresenta uma pequena velocidade de infiltração deste no perfil do terreno. (ARAÚJO, 1998 e PAGANINI, 1997).

O método da infiltração lenta é aplicável aos solos que apresentem uma camada superficial suficientemente permeável e espessa acima do lençol freático, evitando assim a contaminação deste,

A divisão da área de aplicação em módulos possibilita o rodízio entre os mesmos, o que permite a aeração das áreas irrigadas. Deve-se ater também quando as condições máximas de umidade e toxidade do esgoto, às quais a vegetação pode ser submetida.

O método de infiltração lenta atinge um alto grau de tratamento, abrangendo vários tópicos relativos à depuração de esgotos (USEPA, 1981).

A irrigação ou infiltração lenta pode ser executada fundamentalmente por meio de cinco maneiras distintas de aplicação (ANDRADE NETO, 1997 e PAGANINI, 1997):

- a) Por aspersão: o efluente é aplicado através de aspersores colocados em tubulações mantidas sob pressão. Apresenta um custo elevado por necessitar de bombas para manter a pressão elevada, aspersores e mão-de-obra qualificada, no entanto, é mais eficiente pois mantém a uniformidade na aplicação da massa líquida no terreno (PAGANINI, 1997).

Entretanto este tipo de aplicação pode apresentar alguns problemas, como o entupimento constante dos aspersores (necessitando um tratamento preliminar do efluente); e, formação de aerossóis que podem apresentar alguns problemas específicos de saúde pública (ARAÚJO, 1998).

- b) Por Irrigação em Sulcos e Canais: o sistema de aplicação é efetuado por gravidade e a infiltração se dá a partir de sulcos e canais por onde o esgoto escoar. As principais vantagens deste sistema são a facilidade de operação e o baixo custo de execução (PAGANINI, 1997).
- c) Por Inundação: consiste em inundar o terreno (que apresente pouca declividade) com o efluente numa profundidade condizente com o volume de rega determinado através da escolha do solo e da vegetação. A mesma deve ser resistente a toxicidade do efluente e à inundação. A principal vantagem desse sistema é o baixo custo de execução e manutenção (PAGANINI, 1997).
- d) Por Gotejamento: consiste na aplicação de efluente através de tubulações que apresentam furos de pequenos diâmetros, permitindo o gotejamento uniforme ao longo de toda a sua extensão. Os furos devem estar instalados de forma que permitam o gotejamento diretamente sobre o sistema radicular da planta. Permite o controle do crescimento de ervas indesejáveis e não produz aerossóis (ARAÚJO, 1998).

e) Por Infiltração Subsuperficial: o esgoto é aplicado abaixo do nível do terreno, propagando-se através de meios porosos ou tubulações de drenagem. O esgoto penetra no solo sofrendo a remoção dos poluentes. Normalmente estes sistemas encontram-se conjugados à um tratamento primário como a fossa séptica. (ARAÚJO, 1998).

- **Escoamento Superficial:** neste sistema, o efluente líquido escoar na parte superior de um plano inclinado, sendo lançado na parte superior, recolhido na inferior, e depois conduzido até o corpo receptor. O terreno utilizado, em geral, deve apresentar baixa permeabilidade e declividade variando de 2 a 8%.

O plano inclinado constitui-se de um sistema solo-planta, devendo a vegetação, portanto, ser resistente à toxicidade do efluente. O tratamento é obtido, à medida que o efluente avança pelo plano, através de processos físicos, químicos e biológicos (PAGANINI, 1997).

A TABELA 3.2 contém um resumo comparativo da qualidade esperada para o efluente final dos métodos de tratamento por disposição no solo, e a TABELA 3.3 apresenta uma relação das condições limites de aplicabilidade destes sistemas.

Parâmetro	Infiltração Lenta (após 1,5m de solo)	Infiltração Rápida (após 4,5m de solo)	Escoamento Superficial (após 45m de escoamento)
DBO (mg/l)	< 5	< 5	< 15
SST (mg/l)	< 5	< 5	< 20
N-NH ₄ ⁻² (mg/l)	< 2	< 2	< 2
N-total (mg/l)	< 8	< 20	< 5
P-total (mg/l)	< 0,30	< 5	< 6

TABELA 3.2: Comparação qualitativa das águas residuais dos sistemas de disposição no solo

Fonte – METCALF & EDDY (1991)

Fator Interveniente	Infiltração Lenta	Infiltração Rápida	Escoamento Superficial
Chuvas	Podem obrigar a reduzir a taxa de aplicação se forem intensas e contínuas	Podem obrigar a reduzir a taxa de aplicação se forem intensas e contínuas	Podem obrigar a reduzir a taxa de aplicação se forem intensas e contínuas
Temperatura	A eficiência é maior nos climas mais quentes	A eficiência é maior nos climas mais quentes	A eficiência é maior nos climas mais quentes
Evaporação	As grandes evaporações favorecem o aumento das taxas de aplicação	As grandes evaporações favorecem o aumento das taxas de aplicação	As grandes evaporações favorecem o aumento das taxas de aplicação
Ventos	Os predominantes preferencialmente devem soprar da área urbana para a área de tratamento quando este for próximo	Os predominantes preferencialmente devem soprar da área urbana para a área de tratamento quando este for próximo	Os predominantes preferencialmente devem soprar da área urbana para a área de tratamento quando este for próximo
Topografia	Terrenos preferencialmente planos (na aspersão, declividades de até 20%)	Terrenos planos ou pouco ondulados, providos de cobertura resistente à erosão	Terrenos planos ou pouco ondulados, declividades entre 2 a 8%
Área	23 – 280ha.	3 – 23há.	6.5 – 45ha.
Textura do Solo	Média a Grossa	Grossa	Fina
Infiltrabilidade do Solo	Média a moderadamente alta (1 – 4 cm/h)	Alta (mais de 5cm/h)	Baixa (menos de 0,5cm/h)
Profundidade da Camada de Solo	Mais de 1,50m	Mais de 3,9m	Mais de 0,50m
Drenagem do Solo	Moderadamente bem drenado	Bem drenado	Pobremamente drenado
Relação de Adsorção de Sódio (RAS)	Preferencialmente menor do que 10 em solos argilosos. Valores maiores dependem de estudo prévio.	Preferencialmente menor do que 10 em solos argilosos. Valores maiores dependem de estudo prévio.	Preferencialmente menor do que 10 em solos argilosos. Valores maiores dependem de estudo prévio.
Vegetação	Necessária	Desnecessária	Necessária
Profundidade do Lençol Subterrâneo	Mais de 1,50m	Mais de 4,5 a 6,0m	Mais de 0,90m
Pré-Tratamento Conveniente	Decantação Primária	Decantação Primária	Desarenação

TABELA 3.3 : Condições de aplicabilidade dos métodos de disposição no solo

Fonte: adaptado de ARAÚJO (1998)

3.5 Escoamento Superficial no Solo

Neste sistema, o efluente líquido é distribuído na parte superior de uma rampa e, após escoar sobre a superfície da mesma, é recolhido na parte inferior através de uma calha que o conduz ao ponto de lançamento. A descarga deste efluente é controlada, geralmente usando sistemas de aspersores ou tubulações perfuradas. O efluente a ser tratado pode ser constituído na sua forma bruta, ou depois de sofrer algum tipo de tratamento preliminar, primário ou até secundário. A FIGURA 3.3 descreve detalhadamente o sistema.

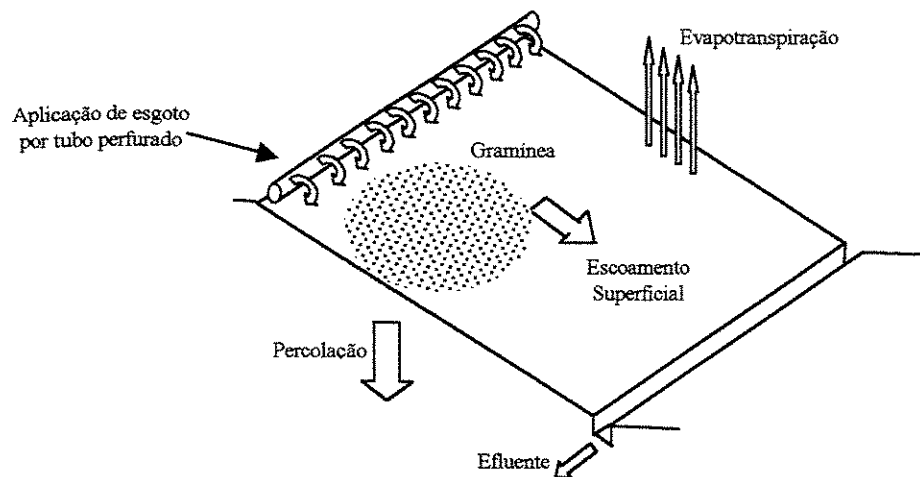


FIGURA 3.3: Processo de escoamento superficial no solo

Fonte – adaptado de FIGUEIREDO (1985).

O sistema de escoamento superficial deve ser empregado em solos que possuem baixa permeabilidade. Parte do líquido distribuído se perde por evapotranspiração, parte infiltra no solo, e o restante escoar até o final da rampa, onde é coletado (CORAUCCI FILHO, 1991).

Ao escoar pela superfície do solo, o efluente é tratado através de processos físicos, químicos e biológicos. Devido à pequena espessura da lâmina líquida, o que favorecem as trocas gasosas com a atmosfera, o processo de tratamento é principalmente aeróbio e portanto não apresenta os odores desagradáveis da degradação anaeróbia. A população microbiana que vive aderida à vegetação e ao solo é responsável pela degradação biológica dos sólidos solúveis e sólidos suspensos do esgoto. Também devem-se considerar as reações físicas de filtração e sedimentação dos resíduos ocasionadas pela vegetação, e que ocorrem na parte inicial da rampa (NOUR, 1993).

3.5.1 Considerações de Projeto

No escoamento superficial, os principais parâmetros de projeto e considerações que podem ser descritos:

- **Técnicas de aplicação:** os sistemas de distribuição exercem uma influência considerável na performance do tratamento. Quanto maior a uniformidade na lâmina de escoamento, melhor será o efluente final. Dentre os métodos de distribuição de efluente, podemos citar (CORAUCCI FILHO, 1991 e ARAÚJO, 1998):
 - a) Tubulações com aberturas reguláveis: tubulações com orifícios laterais reguláveis;
 - b) Tubulações recortadas ou perfuradas: tubulações com furos ou recortes laterais. Os tubos devem ser cuidadosamente nivelados para uniformizar o escoamento;
 - c) Orifício borbulhante: pequenas luvas de 1" a 2" de diâmetro conectadas à tubulações enterradas;
 - d) Canais de distribuição: pequenos canais, geralmente em alvenaria, com comportas laterais do tipo stop-log que distribuem o esgoto;
 - e) Aspersores de baixa pressão: semelhantes aos orifícios borbulhantes, porém utilizando aspersores trabalhando sob pressão (10 a 15 N/cm²); e,
 - f) Aspersores de alta pressão: aspersores trabalhando com pressões variando de 35 a 55 N/cm².
- **Declividade das Rampas:** é a declividade apresentada pela superfície do terreno, devendo ser constante ao longo de todo o seu comprimento. A declividade recomendada para a rampa está situada na faixa de 2 a 8%,. Declividades menores que 2% podem causar o empoçamento do efluente ao longo da rampa, o que além de

prejudicar a eficiência do sistema e causar a deposição de sedimentos, também favorece a proliferação de mosquitos e outros vetores. Entretanto, o uso de declividades superiores a 8% podem causar o erosionamento do solo, favorecendo a formação de caminhos preferenciais no solo das rampas.

- **Comprimento do Tabuleiro:** é a extensão longitudinal da superfície física do solo, definida no sentido do escoamento do despejo. De maneira geral, observa-se que a eficiência do processo é diretamente relacionada com o comprimento da rampa. Portanto, o comprimento da rampa varia de acordo com o pré-tratamento pelo qual o esgoto passa antes de atingir as rampas. Quanto maior o grau de depuração em que se encontra o efluente do pré-tratamento, menor será o comprimento da rampa. Entretanto, OVERCASH *et al.* (1978), estudando o tratamento de esterco diluído de aves, determinou que rampas com comprimento maior que 15-18 metros, não obtinham melhora significativa na remoção de DBO com este tipo de efluente.

Dependendo do comprimento da rampa, esta pode ser dividida em três partes, sendo que em cada uma predomina um processo de tratamento. Logo no início da rampa (primeiro terço) predomina o processo anaeróbio de tratamento devido a alta carga orgânica e baixo índice de oxigênio dissolvido no efluente. No terço médio, após a diminuição da carga orgânica, predomina o processo aeróbio de tratamento, ocorrendo uma degradação a nível secundário. Finalmente, no trecho final da rampa, com a taxa

de remoção de matéria carbonácea diminuindo, predomina a remoção de nutrientes, ocorrendo desta forma um tratamento a nível terciário (NOUR, 1993).

- **Período de Aplicação:** refere-se ao tempo de aplicação do esgoto sobre o tabuleiro no espaço de um dia (*h/dia*). O sistema pode ser operado de forma contínua ou intermitente, no primeiro caso ele opera 24 h/dia, como no caso de grandes sistemas, visando assim minimizar os requisitos de área. Em sistemas menores, torna-se mais conveniente operar de forma intermitente, em períodos que variam de 6 a 12 horas/dia, e no restante do tempo o esgoto seria armazenado. (CORAUCCI FILHO, 1991).
- **Frequência de Aplicação:** refere-se ao número de dias que ocorreu o escoamento no intervalo de uma semana (*dias/semana*). A falta de aplicação por períodos muito longo ocasiona a desidratação do biofilme que atua no processo de tratamento. Frequências de aplicação mais altas, em torno de 7 dias/semana diminuem a necessidade de reservação do efluente, e a área de terreno utilizada no sistema (PAGANINI, 1997).
- **Taxa de Aplicação:** é o volume de efluente aplicado no tabuleiro, durante um determinado tempo, dividido pela largura da rampa ($m^3/h.m$). A taxa de aplicação exerce influência na eficiência do tratamento, pois atua no tempo no qual o esgoto permanece na rampa. CORAUCCI FILHO *et al.* (1997), variando a taxa de aplicação

entre 0,15 a 0,30 m³/h.m, em rampas com 20m de comprimento, demonstrou que os diferentes volumes aplicados apresentaram desempenhos semelhantes no tratamento, na investigação de DQO, DBO, sólidos dissolvidos e voláteis.

- **Carga Hidráulica:** corresponde ao volume aplicado sobre uma unidade de área do tabuleiro. É mais representativa que a taxa de aplicação, já que não indica apenas uma vazão específica do sistema, sendo por isto o parâmetro mais utilizado de dimensionamento e operação. A relação entre a carga hidráulica, taxa de aplicação linear, período de aplicação e comprimento da rampa é dado por:

$$Ch = \frac{q \times P}{L}$$

Onde: Ch = carga hidráulica, m³/m².dia ou m/dia

q = taxa de aplicação, m³/h.m

P = período de aplicação, h/dia

L = comprimento do tabuleiro, m

Quanto maior for o nível de pré-tratamento do efluente aplicado, maior a carga hidráulica que pode ser utilizada, uma vez que diminui a necessidade de altas taxas de eficiência para obter a qualidade necessária.

- **Dimensionamento:** SMITH & SCHROEDER (1985), obtiveram uma equação matemática para descrever a DBO do efluente aplicado ao longo do comprimento da rampa. A relação proposta é:

$$\frac{C - C_{\text{mín}}}{C_o} = A \times e^{\left(\frac{-k \times L}{q^n}\right)}$$

Onde:

- C = concentração da DBO no ponto L (mg/l);
- C_o = concentração inicial da DBO do efluente (mg/l);
- C_{mín} = Concentração mínima factível da DBO efluente (5 mg/l);
- A = coeficiente determinado experimentalmente;
- k = taxa hidráulica constante, empiricamente determinada(m/h);
- L = distância do ponto de aplicação (m);
- q = taxa de aplicação linear (m³/h.m); e,
- n = constante determinada empiricamente.

3.5.2 Cobertura Vegetal

As gramíneas cultivadas no solo da rampa devem ter raízes que apresentem crescimento altamente intrincados, a fim de proporcionar uma maior área superficial de contato para a formação do biofilme. Dentre as funções da cobertura vegetal destacam-se (ZUCCOLO *et al.* 1985):

- proteção do solo contra a erosão, proporcionando uma maior rigidez ao mesmo e reduzindo a formação de caminhos preferenciais;
- meio suporte para a população microbiana, o biofilme responsável pela degradação da matéria carbonácea; e,
- absorção de nutrientes em seu metabolismo, principalmente o fósforo e o nitrogênio.

A espécie de gramínea utilizada deve apresentar alta absorção de nutrientes; alta resistência à umidade constante; alta resistência à toxidade do efluente; tempo de crescimento longo, a fim de evitar cortes freqüentes na camada vegetal; e, adaptação ao clima do local e o solo utilizado (ARAÚJO, 1998).

3.5.3 Efeito das Precipitações

Pouco se conhece a respeito do efeito da chuva na eficiência do tratamento, sendo que o assunto não possui muitos dados na literatura.

FIGUEIREDO *et al.* (1984) demonstram que as mudanças ocorridas na eficiência do tratamento, durante a ocorrência de precipitações, são pequenas. Neste caso,

verificaram que as concentrações de DBO e sólidos suspensos de origem inorgânica no final da rampa aumentavam com as chuvas, sendo proporcional à duração e intensidade destas.

Segundo FIGUEIREDO, isto se deve ao fato de que a chuva lava a superfície das rampas, fragmentando o biofilme e aumentando a concentração de sólidos e matéria orgânica no efluente final.

3.5.4 Partida nos Sistemas de Escoamento Superficial

Durante um período de tempo, ocorre a adaptação do sistema, constituindo o estabelecimento da cobertura vegetal, a formação do biofilme sobre a cobertura do solo e das plantas e o aumento da população microbiana. Este período pode durar de 3 a 4 meses (CHERNICHARO, 1997).

Uma característica importante do sistema é o seu tempo de restauração do equilíbrio. OVERMAN & WOLFE (1986) observaram, em um sistema estudado, que mesmo após 3 semanas sem receber efluente eram necessárias apenas 24 horas para que o processo atingisse novamente o equilíbrio. Ou seja, o sistema retorna em pouco tempo aos níveis de eficiência anteriores à interrupção da aplicação.

3.5.5 Eficiência do Processo

O sistema apresenta um grau de eficiência na depuração do efluente bastante satisfatório:

- **Matéria Orgânica:** como dito anteriormente, a matéria orgânica biodegradável presente nos esgotos é removida através de processos físicos, químicos e biológicos, sendo que os primeiros atuam como agentes facilitadores da decomposição química e biológica (USEPA, 1981). Os mecanismos de depuração podem ser:

- a) A matéria orgânica particulada é retida no solo devido às suas propriedades filtrantes, sendo estabilizada pelos microorganismos do filme biológico; e,
- b) A matéria orgânica não decantável, coloidal e solúvel adsorve às partículas de solo, sendo estabilizada pelos microorganismos do filme biológico.

O biofilme é composto por uma grande infinidade de microrganismos, entre eles as bactérias (predominantes), fungos, algas, protozoários, vermes e outros em menor quantidade. As quantidades deste variam de acordo com a espessura do filme líquido, o tipo de efluente e o clima (PAGANINI, 1997).

A solubilização de compostos orgânicos no sistema solo-planta, impossibilita que o efluente tratado tenha valores de DBO abaixo de 3 – 5 mg O₂/l, mesmo que se aplique água tratada.

- **Sólidos Suspensos** : os sólidos se depositam no solo e são adsorvidos pelo biofilme como substrato, sendo degradados. Devido a baixa velocidade do líquido na superfície do terreno e pela pequena profundidade da lâmina d'água, a maior parte dos sólidos é removida nos primeiros metros da rampa. Portanto, é nesta faixa que esta acumulada a maior parte do lodo biológico.

Segundo os dados obtidos na literatura, pode-se dizer que a eficiência na remoção de sólidos suspensos através do método de escoamento superficial no solo, oscila em torno de 90%.

- **Fósforo** : a remoção de fósforo atinge valores na ordem de 40% de eficiência. O seu processo envolve diversos mecanismos como adsorção por hidróxidos de ferro e alumínio e minerais argilosos; precipitação química, com alumínio, ferro e sob a forma de fosfato de cálcio; imobilização na forma de compostos orgânicos na camada de lodo biológico; e, utilização pela gramínea em seu metabolismo. Observa-se que uma maior frequência no corte da vegetação aumenta a remoção de fósforo total. Este fósforo é utilizado pela planta no metabolismo durante seu crescimento, indicando

que a remoção de nutrientes esta ligada diretamente com a remoção de massa vegetal do sistema de tratamento (NOUR, 1993)

- **Nitrogênio** : o nitrogênio é removido do efluente através de processos de nitrificação, seguida pela absorção pelas plantas; nitrificação seguida de desnitrificação, promovidas pelas bactérias do solo; volatilização da amônia; e, lixiviação (ARAÚJO, 1998).
- **Patogênicos** : na remoção de microorganismos no método de escoamento superficial no solo destacam-se (USEPA, 1981):
 - a) Filtração física através do biofilme;
 - b) Sedimentação;
 - c) Exposição a condições ambientais adversas, como a umidade do solo, temperatura, pH e insolação;
 - d) Adsorção às partículas do solo;
 - e) Predação; e,
 - f) Dessecamento durante os períodos secos.

4 METODOLOGIA

4.1 Descrição do sistema de tratamento

O sistema de tratamento que foi utilizado para o desenvolvimento deste trabalho localiza-se no bairro da Graminha no município de Limeira, SP, em área pertencente à empresa Águas de Limeira S.A., concessionária do serviço de águas daquele município. Foi alimentado com o efluente de um sistema de filtros anaeróbios com recheio de bambu, conforme esquema contido na FIGURA 4.1; os quais fazem parte de projetos de pesquisa operados pela equipe de Saneamento da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP.

Algumas características médias do efluente do sistema de filtros anaeróbios estão apresentadas na TABELA 4.1. Os valores apresentados são referentes a ensaios realizados semanalmente entre os dias 22 de fevereiro de 1999 e 17 de novembro de 1999, no efluente do filtro mantido com tempo de detenção de 5hrs.

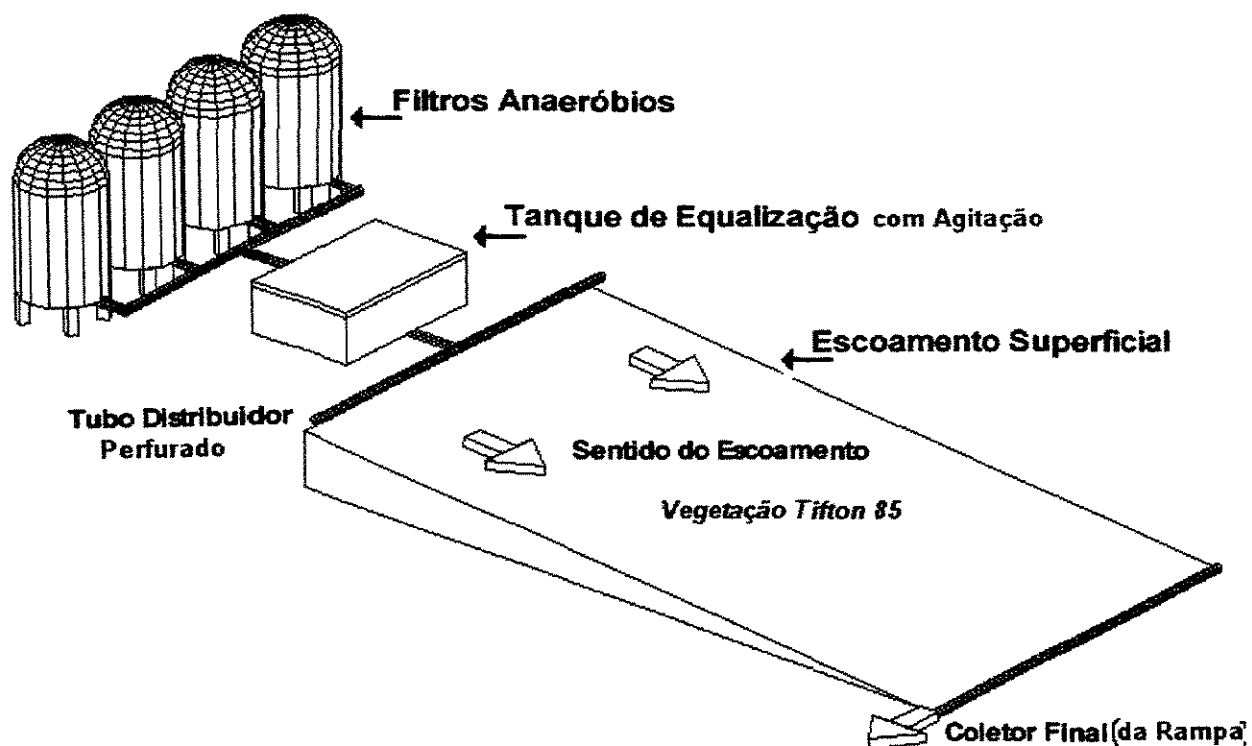


FIGURA 4.1 – Esquema de Montagem do Sistema de Pós-Tratamento de Efluente de Filtro Anaeróbio

Parâmetro	Valor Médio	Desvio Padrão
pH	7,10	0,17
DQO (mg/L)	230,50	111,51
DBO (mg/L)	66,00	61,90
SST (mg/L)	57,00	28,90
Fósforo (mg/L)	6,15	2,83

TABELA 4.1 – Caracterização do efluente a ser tratado no sistema em estudo

O esgoto sanitário, depois de coletado em um interceptor, passa por uma peneira estática de madeira seguindo para uma caixa de regularização de volume. Esse equipamento já existe no local (FIGURA 4.2 e FIGURA 4.3), é o responsável pela alimentação do sistema de tratamento de esgotos composto por filtros anaeróbios com recheio de bambu. Essa caixa consiste em um reservatório de fibrocimento onde, por meio de um extravasor, o nível de esgoto permanece constante. A partir deste, o esgoto parte para o sistema de tratamento constituído por quatro filtros anaeróbios, de fluxo ascendente.

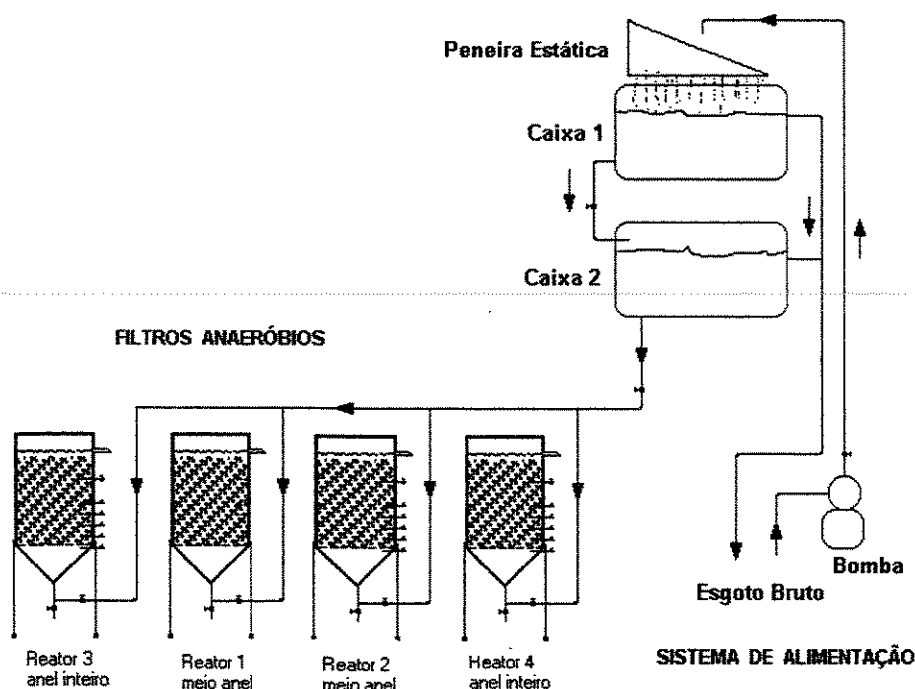


FIGURA 4.2 – Esquema de Montagem do Tratamento Preliminar e Montagem dos Filtros.

Fonte: ROZON, 2000

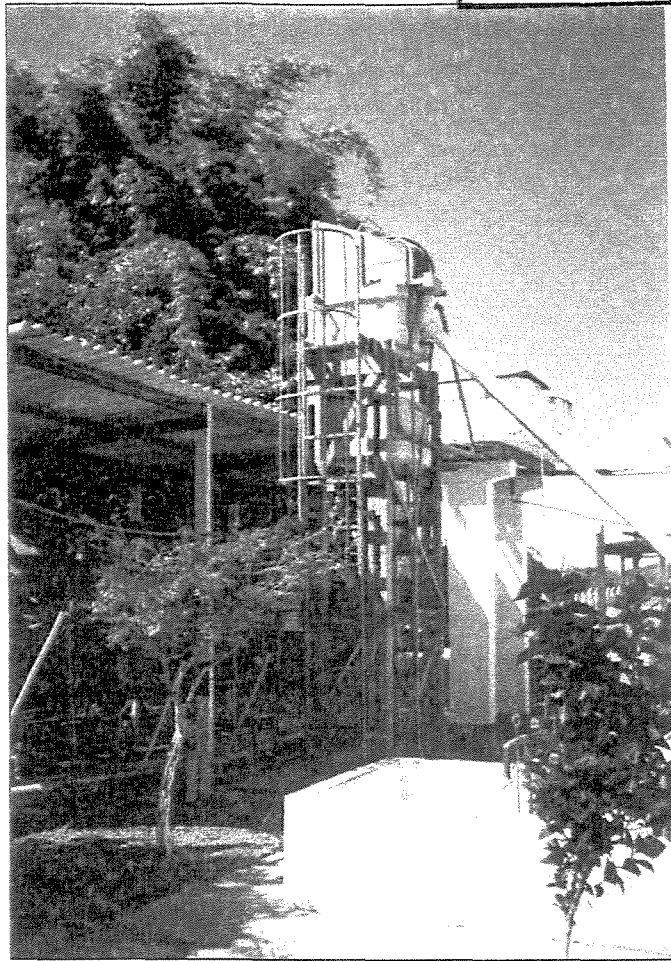


FIGURA 4.3 – Tratamento Preliminar (Reservatório Superior e Caixa de Areia)

Os filtros anaeróbios possuem forma cilíndrica, com volume individual de 500 litros, possuem enchimento de bambu e eram operados com tempos de detenção hidráulico de 7 a 9 horas, porém, para aumentar o volume de efluente a ser tratado, o tempo de detenção foi reduzido à 3 horas sendo a sua vazão controlada através de registros do tipo pressão instalados na entrada de cada filtro (FIGURA 4.4).

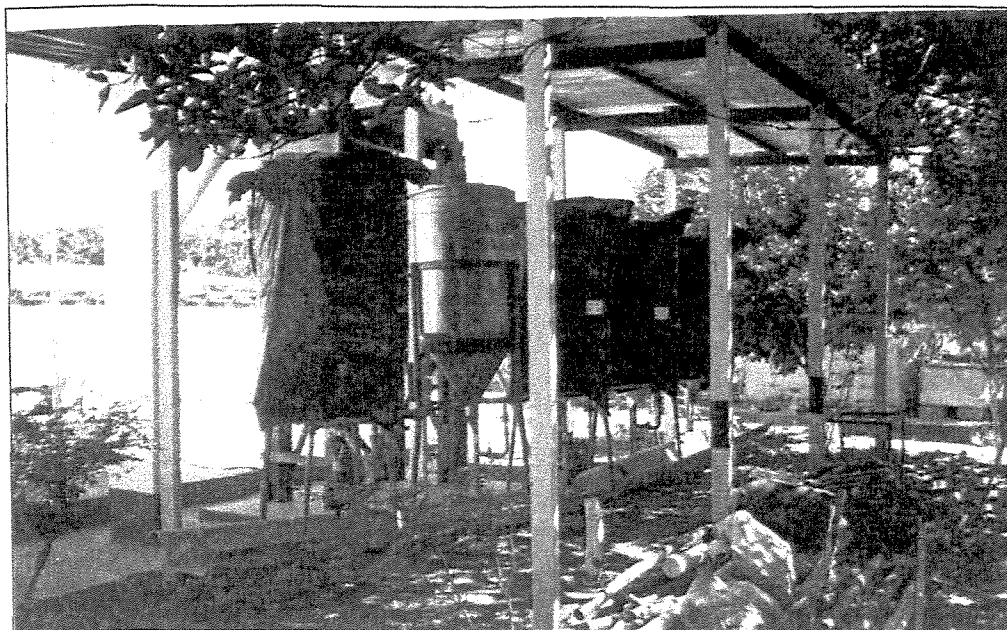


FIGURA 4.4 – Filtros Anaeróbios de Fluxo Ascendente.

O efluente dos filtros é descarregado em um pequeno reservatório, com volume de 40 litros, o qual alimenta um segundo sistema de tratamento constituído por um conjunto de valas de filtração modificadas, sendo este também objeto de pesquisa da equipe da Faculdade de Engenharia Civil da UNICAMP, e também alimenta um tanque de homogeneização, com volume de 300 litros. À este reservatório, encontra-se ligada uma bomba hidráulica controlada por uma chave elétrica do tipo bóia de controle superior (FIGURA 4.5). A bomba alimenta o sistema de pós-tratamento objeto deste trabalho.

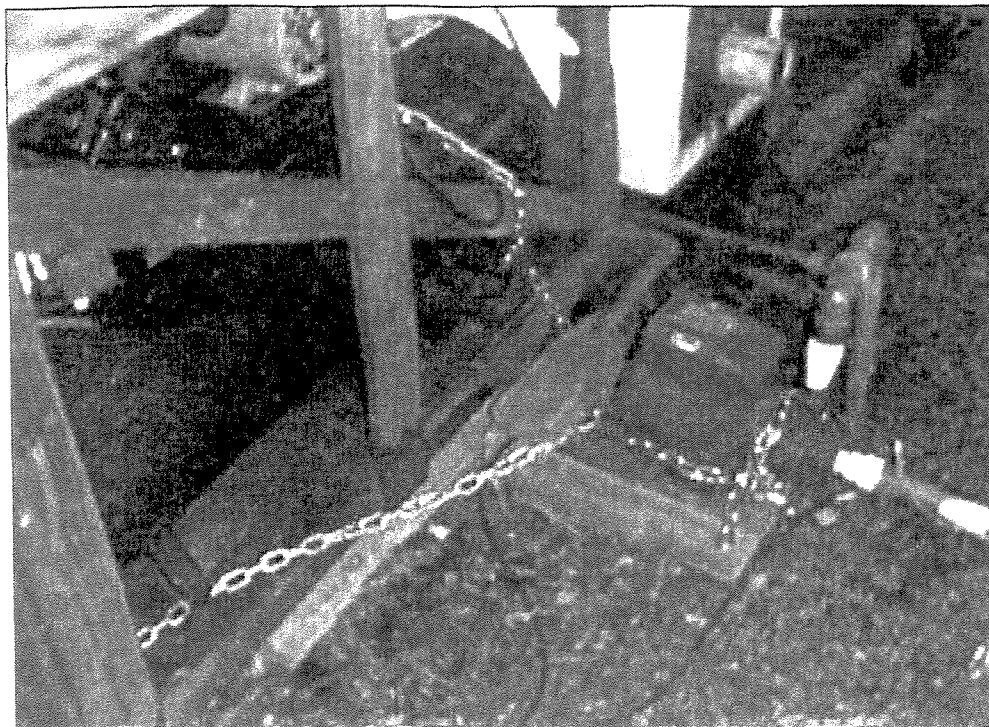


FIGURA 4.5 – Bomba Centrífuga de Rotor aberto (recalque para o tanque pulmão).

O sistema de pós-tratamento utilizado consiste em uma rampa de escoamento superficial, de dimensões: 4,25m de largura por 40m de comprimento, e uma declividade média de 3,5%, cultivada com gramínea Tifton 85 (*Cynodon sp*) (FIGURA 4.6). O efluente é aplicado na cabeceira da rampa – o seu ponto de cota mais elevada – através de tubulação em PVC DN 100 perfurado a cada 10cm com orifícios de 10mm de diâmetro. As taxas hidráulicas de aplicação foram de 0,10; 0,20; 0,30 e 0,40 m³/h.m. O período de aplicação foi de 8 horas por dia e a frequência de aplicação de 5 dias por semana.



FIGURA 4.6 – Preparo das mudas da gramínea utilizada.

A cada 5m de rampa, existe um anteparo em concreto, com aproximadamente 2cm de altura, 2,5cm de largura e comprimento igual a largura da rampa, os quais visam uniformizar o escoamento no sentido longitudinal da rampa (Figura 4.7).

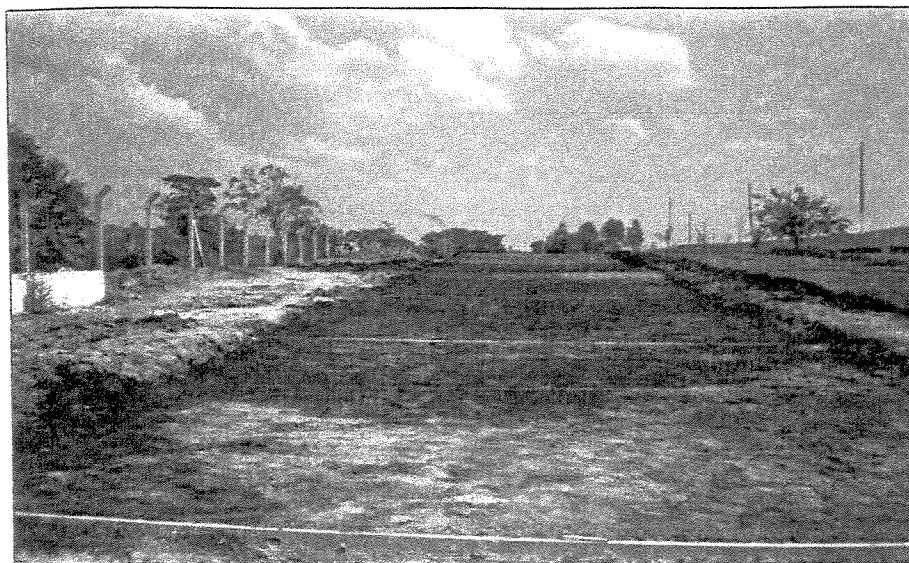


FIGURA 4.7 – Detalhe dos anteparos de concreto utilizados para uniformizar o escoamento.

Os volumes aplicados no solo, provenientes dos reatores anaeróbios, foram ajustados, tornando constante a taxa de aplicação de efluente no solo, através da utilização de um tanque de reservação e equalização de efluente, de forma circular e capacidade volumétrica de 2000 litros, construído em fibra de vidro resinada, localizado 30cm acima do ponto de aplicação, de forma que o efluente é aplicado por gravidade e a sua vazão controlada através de um registro de pressão existente antes do tubo de aplicação. O tanque foi alimentado com efluente dos filtros anaeróbios através da bomba hidráulica citada anteriormente. As FIGURA 4.8 e FIGURA 4.9 localizam as principais peças e equipamentos utilizados na planta piloto do projeto.

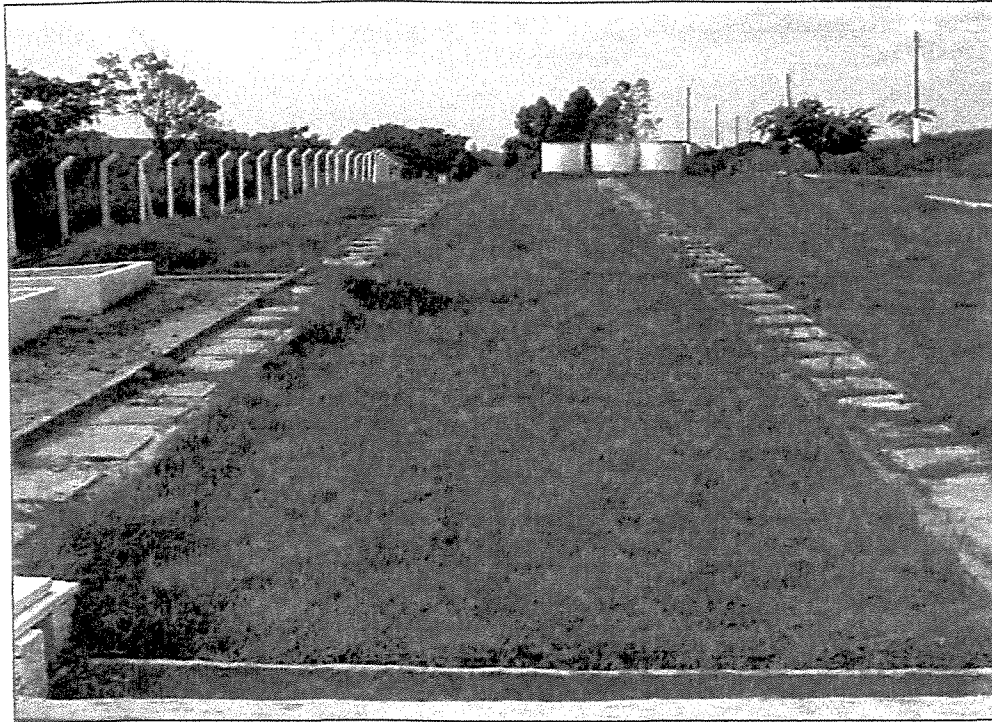


FIGURA 4.8 – Vista da rampa utilizada no projeto (rampa central); Ao fundo os reservatórios de fibra de vidro, volume de 2000L cada um.

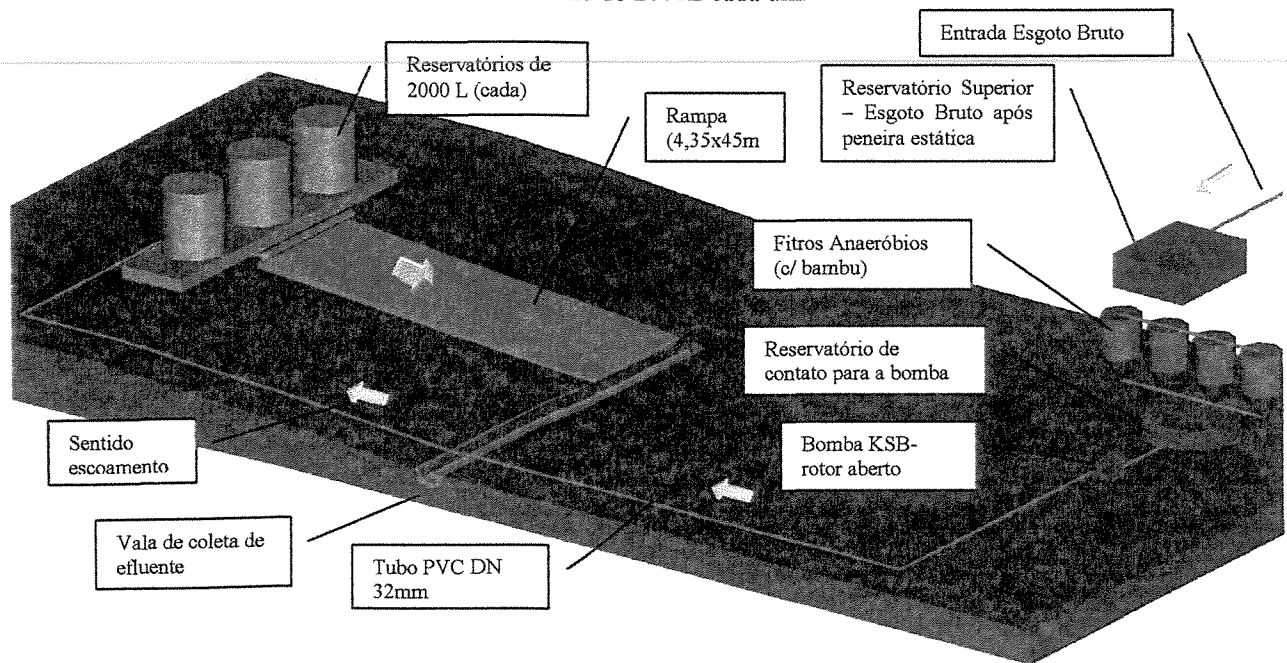


FIGURA 4.9 – Maquete do Sistema

4.2 Parâmetros Estudados

Na avaliação de desempenho do escoamento superficial, como pós-tratamento, são analisados os seguintes parâmetros: pH, DBO, DQO, séries de sólidos (sólidos suspensos, dissolvidos, sedimentáveis), nitrogênio, fósforo. Em relação ao projeto inicial, foi acrescentada a análise da alcalinidade, por ser de fácil realização e apresentar resultados úteis à pesquisa. As análises de laboratório foram baseadas nos métodos descritos no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater*, da *AWWA/APHA*, 19^ª ed., e tiveram frequência semanal (após cada coleta).

4.3 Pontos de amostragem

As amostragens foram realizadas nos seguintes pontos: afluente e efluente do sistema de filtros anaeróbios (sistema de tratamento do efluente), e nos pontos demonstrados na FIGURA 4.10 , ou seja, na entrada da rampa e a cada 5 metros seguindo o sentido do escoamento até a saída.

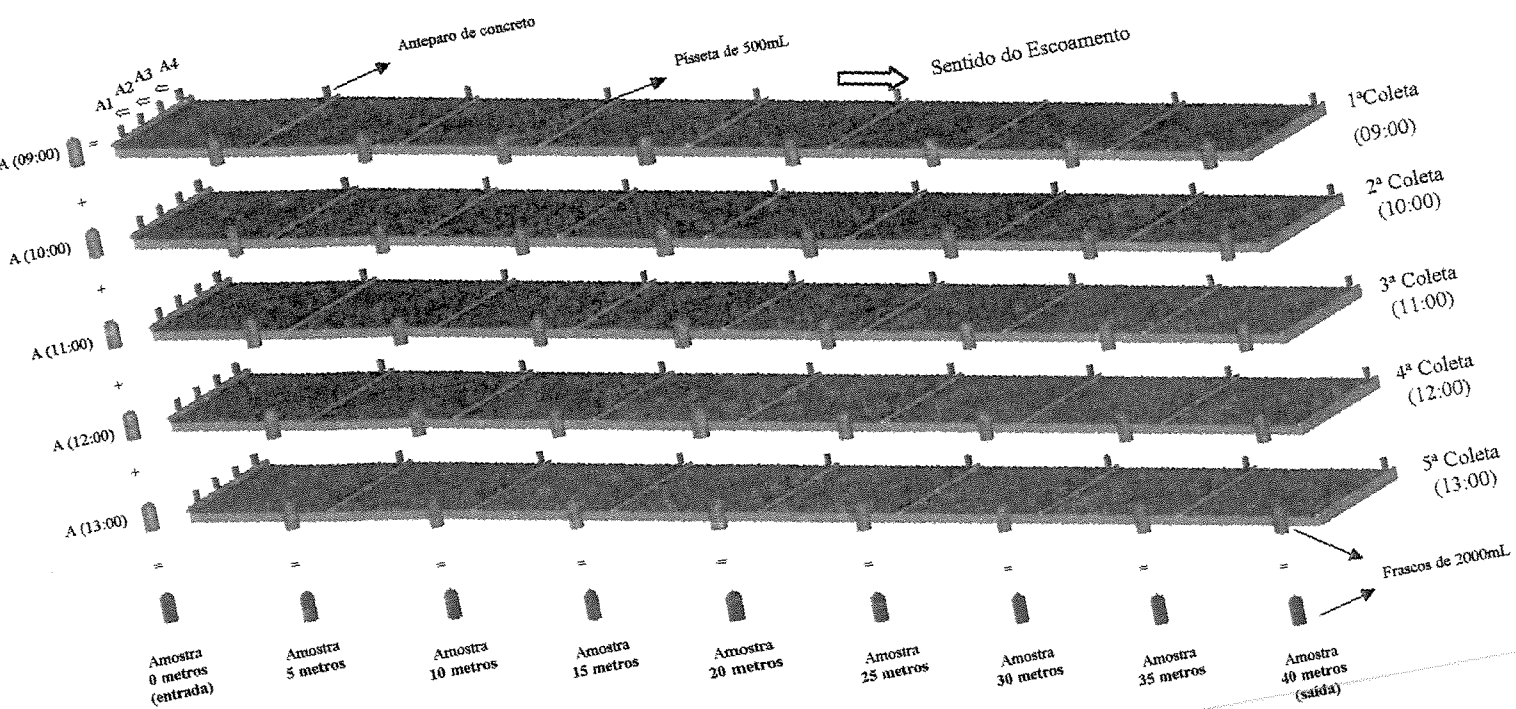


FIGURA 4.10 - Pontos de coleta de efluente na rampa

4.3 Frequência de amostragem

As amostras foram coletadas quase que invariavelmente todas as semanas, nas quartas-feiras. O sistema era ligado todos os dias úteis às 07:20, levando de 1:00 à 1:30 para alcançar a estabilidade. A partir das 09:00 até as 13:00 eram coletadas amostras a cada hora em cada ponto de coleta, a fim de compor uma única amostra. As coletas horárias foram compostas por 4 amostras coletadas no sentido transversal ao escoamento. Como pode ser visto no esquema apresentado na FIGURA 4.10.

O projeto inicial previa coletas a partir das 8:00 horas até as 16:00 horas, em coletas de 1:30 horas de intervalo, entretanto, como mencionado anteriormente, estes horários foram alterados porque o sistema demora a estabilizar e também porque as análises começavam a ser realizadas no mesmo dia da coleta, necessitando-se de tempo livre no laboratório.

A coleta era iniciada na saída da rampa e progredia no sentido contrário ao do escoamento, a fim de evitar que os sólidos movimentados pelo caminhar sobre a rampa interferissem nas amostras.

A sucção efetuada pela pisseta deve a mínima possível, a fim de evitar o desprendimento de sólidos do solo ou do biofilme da rampa, os quais podem contaminar a amostra.

4.4 Parâmetros de dimensionamento

Foi avaliada a eficiência do sistema na remoção dos parâmetros físico-químicos citados na metodologia, de acordo com a variação do tempo de detenção hidráulico dos reatores anaeróbios (3 horas) (ROZON, 2000) e a taxa de aplicação superficial no solo (0,10; 0,20; 0,30; 0,40 m³/h.m), para uma declividade média da rampa de 3,5%. Foram também observados o período de aplicação nas rampas (8 h/d) e a frequência (5 d/sem). Para ajustar os volumes provenientes dos reatores anaeróbios e os aplicados no solo, foi utilizado um tanque de equalização com agitação, dimensionado de forma a atender as necessidades do projeto.

Foi efetuado o corte da gramínea a cada 30 dias corridos, a fim de evitar o surgimento de pequenos animais, como rãs, cobras e roedores sobre a rampa, ou vetores, como moscas e mosquitos (FIGURA 4.11).



FIGURA 4.11 – Primeiro corte de grama efetuado (aos 30 dias).

Os resultados obtidos foram colocados em gráficos e posteriormente analisados.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

5.1 PROJETO E OPERAÇÃO

No período inicial do projeto, procedeu-se com a irrigação da rampa com a taxa de aplicação de 0,10 m³/h.m, como previsto no projeto original, seguindo da aplicação das taxas 0,20; 0,30 e finalmente 0,40 m³/m.h. Os tempos de irrigação, foram respectivamente de 4 meses (visando a adaptação da rampa ao efluente - estabilização do biofilme aderido), 2,5 meses (considerando o tempo de atraso), 6 semanas (aproximadamente 45 dias) e 6 semanas para a última taxa. Inicialmente era previsto que os filtros anaeróbios operassem com um tempo de detenção entre 7 e 9 horas, entretanto, constatou-se que devido a dificuldade encontrada em manter a vazão constante, uma vez que os registros de pressão utilizados para regular a vazão obstruíam facilmente, adotou-se um tempo de detenção menor – 3 horas, com maior vazão (em relação ao tempo de detenção anterior) e conseqüentemente uma maior abertura na gaveta do registro – mantendo-se assim o reservatório pulmão na cabeceira da rampa sempre com volume de

efluente suficiente para manter o sistema em equilíbrio. Constatou-se também que o volume de 2000 litros não era suficiente para manter a rampa funcionando durante todo o período de aplicação, nas 2 últimas taxas de aplicação. Problema este contornado com a utilização de mais 2 reservatórios de 2000 litros na cabeceira da rampa, aumentando assim a capacidade pulmão para 6000 litros. Visando evitar instabilidade da taxa aplicada, recomenda-se o uso de tanques de nível constante para conservar estável a pressão manométrica nos registros, e assim, a vazão aplicada.

Pode-se verificar também que a primeira taxa de aplicação superficial (0,10 m³/m.h), por ser relativamente pequena, apresenta problemas conhecidos na literatura: formação de caminhos preferenciais de fluxo, com diferenciação na altura da lâmina d'água no perfil transversal da rampa e conseqüente aparecimento de zonas mortas ou falhas na continuidade das linhas de escoamento. Por melhor regularizada que esteja a superfície da rampa, a fim de evitar a formação de caminhos preferenciais, estes problemas podem aparecer, principalmente pela diferença de velocidade entre linhas de escoamento paralelas. Isto pode ser facilmente observado devido a desuniformidade da cor e tamanho da vegetação de cobertura. A medida que foram sendo utilizadas taxas de aplicações maiores, a vegetação foi adquirindo tamanho e cor mais uniforme, bem como a espessura da lâmina de efluente sobre a rampa.

5.2 RESULTADOS OBTIDOS

Dentro do escopo do trabalho, foram obtidos as tabelas e os gráficos de desempenho do sistema para todas as taxas de aplicação. A seguir são apresentados os gráficos para a taxa de aplicação 0,10 m³/m.h e 0,30m³/m.h. O resultados obtidos referem-se aos filtros operando com um tempo de detenção de 3 horas.

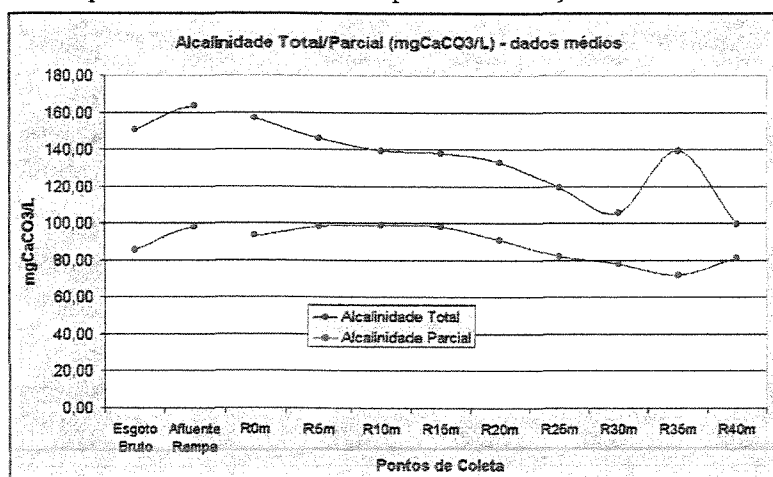


FIGURA 5.1 - Alcalinidade Total e Parcial ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação —

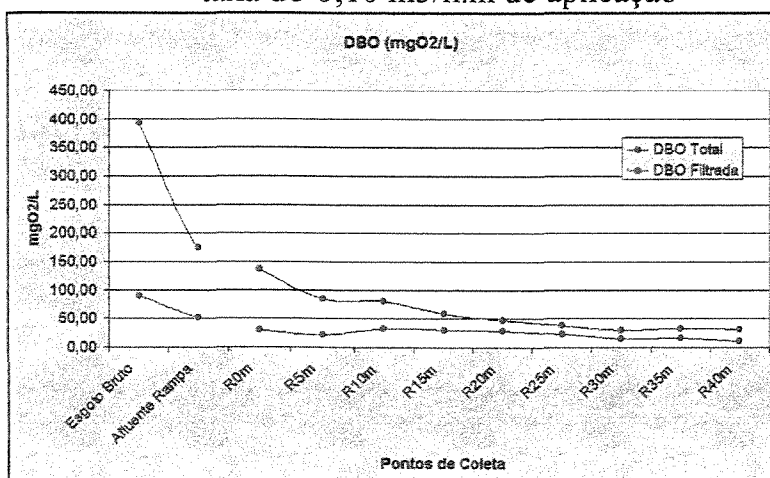


FIGURA 5.2 – DBO Total e Filtrada ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação —

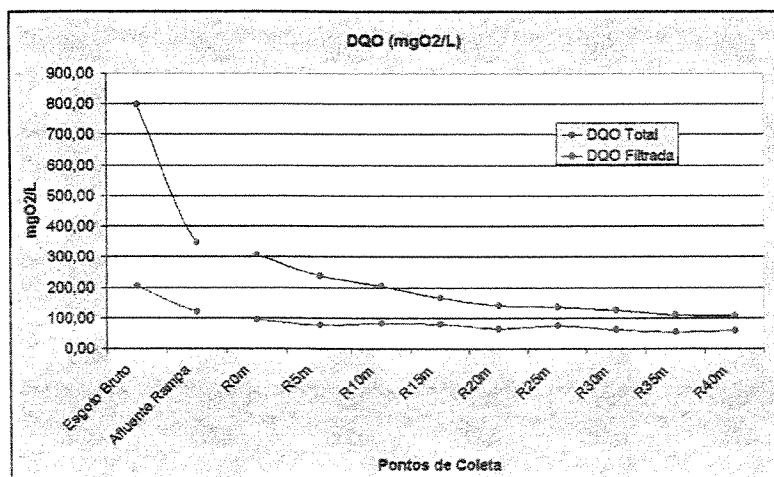


FIGURA 5.3 – DQO Total e Filtrada ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação –

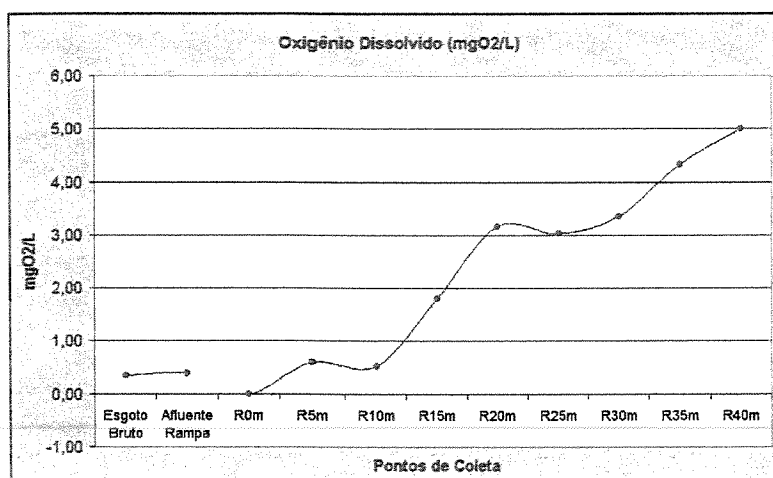


FIGURA 5.4 – Oxigênio Dissolvido ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

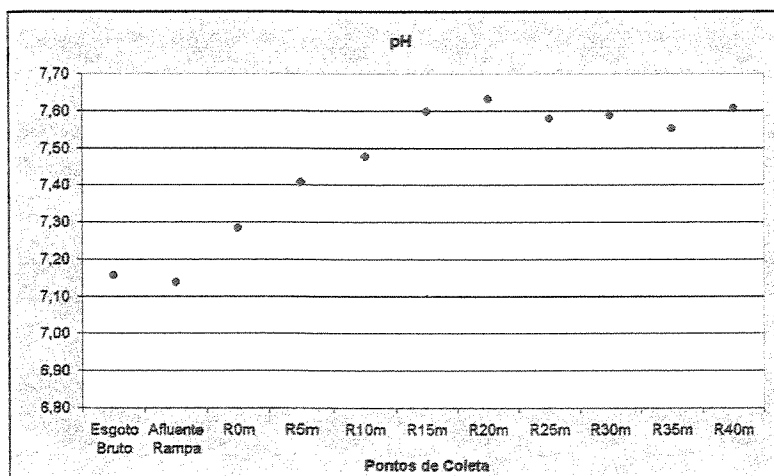


FIGURA 5.5 - pH ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação –

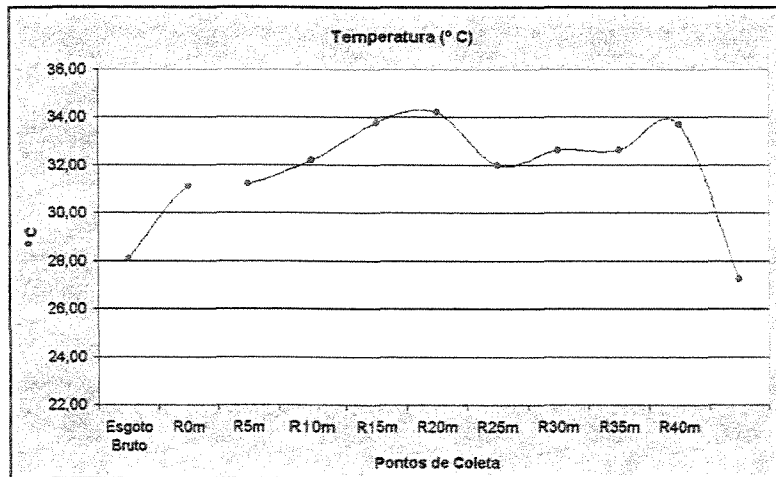


FIGURA 5.6 - Temperatura ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação —

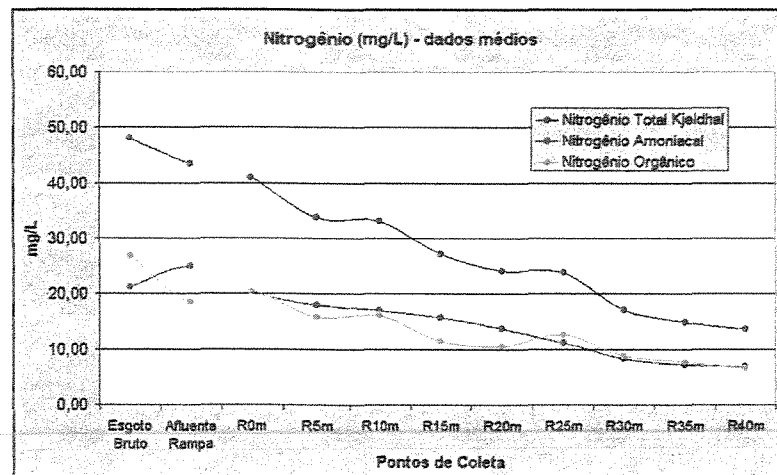


FIGURA 5.7 – Formas de Nitrogênio ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação —

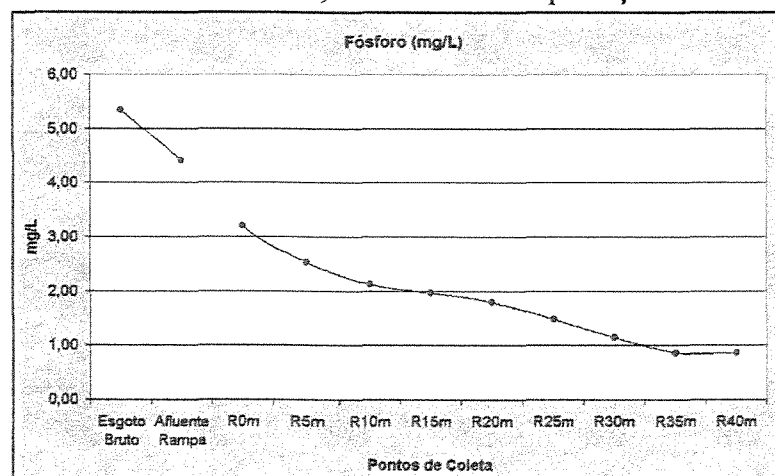


FIGURA 5.8 - Fósforo ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação —

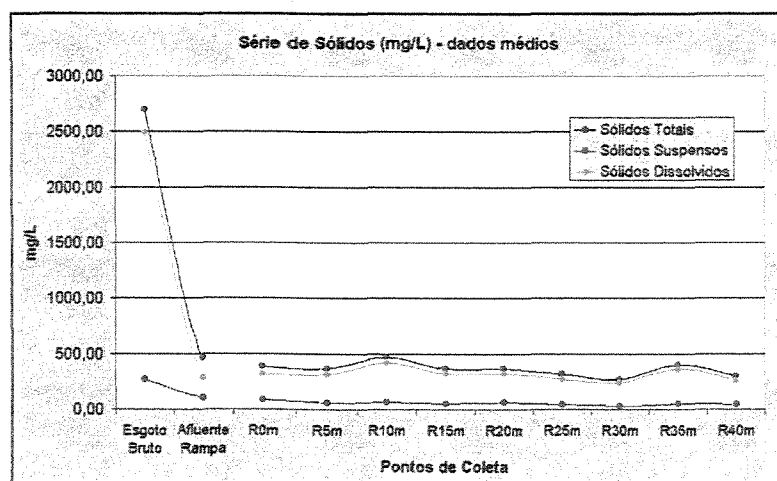


FIGURA 5.9 – Sólidos Totais, Suspensos e Dissolvidos ao longo do comprimento da rampa

— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação —

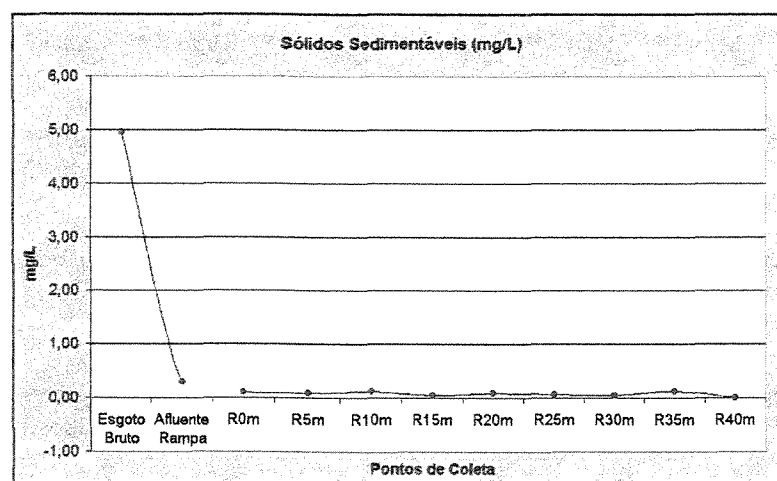


FIGURA 5.10 – Sólidos Sedimentáveis ao longo do comprimento da rampa

— taxa de 0,10 m³/h.m de aplicação —

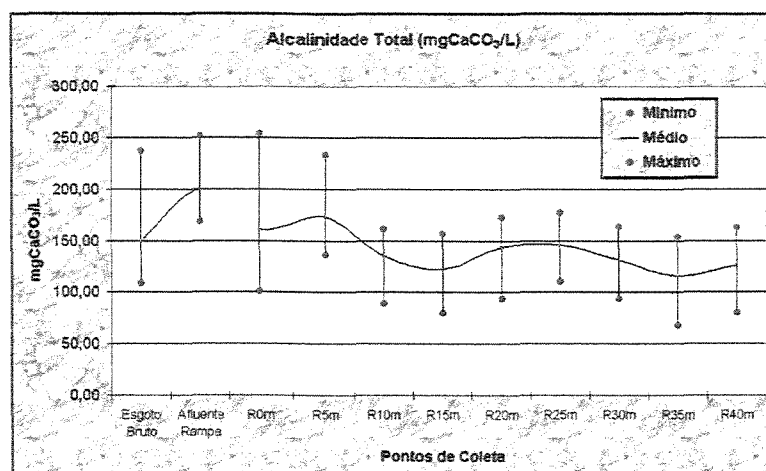


FIGURA 5.11 - Alcalinidade Total ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

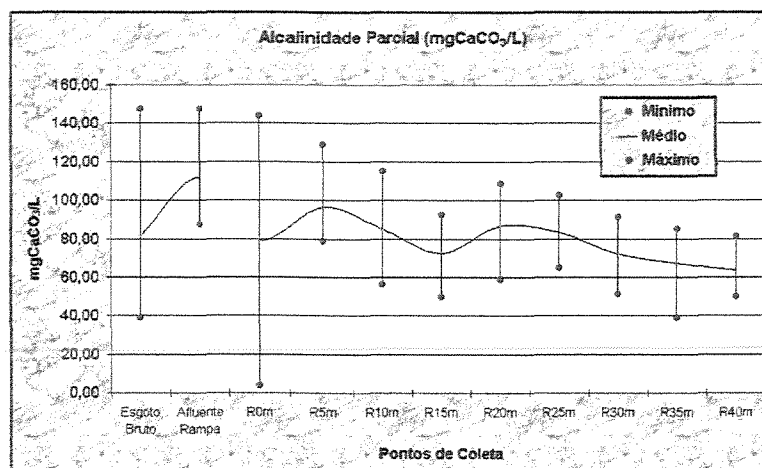


FIGURA 5.12 - Alcalinidade Parcial ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

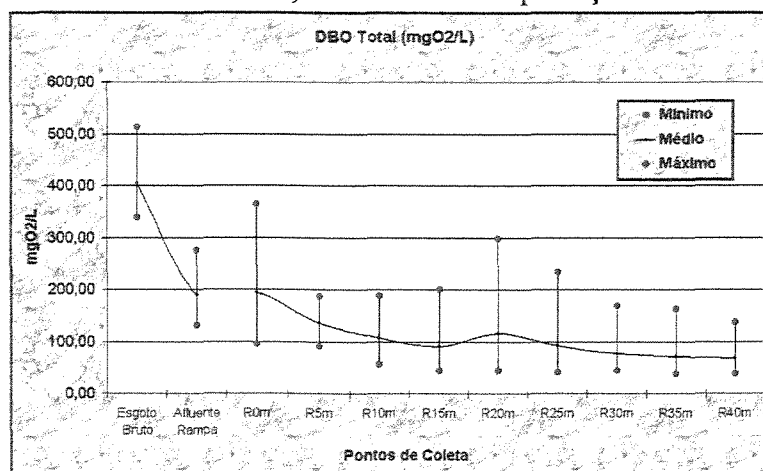


FIGURA 5.13 – DBO Total ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

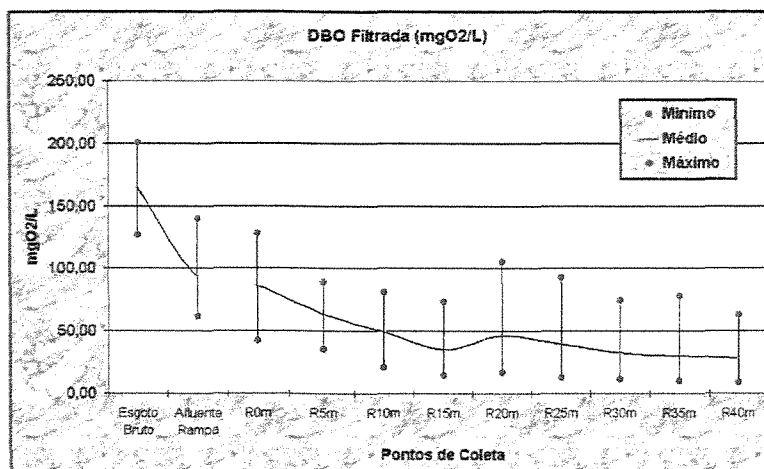


FIGURA 5.14 – DBO Filtrada ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

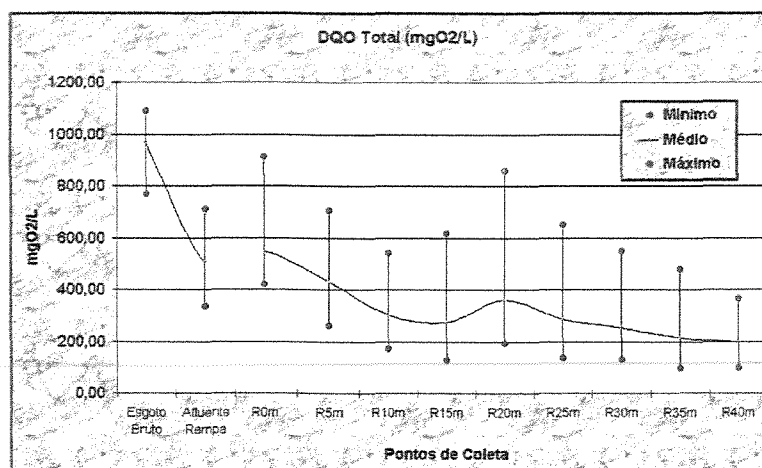


FIGURA 5.15 – DQO Total ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

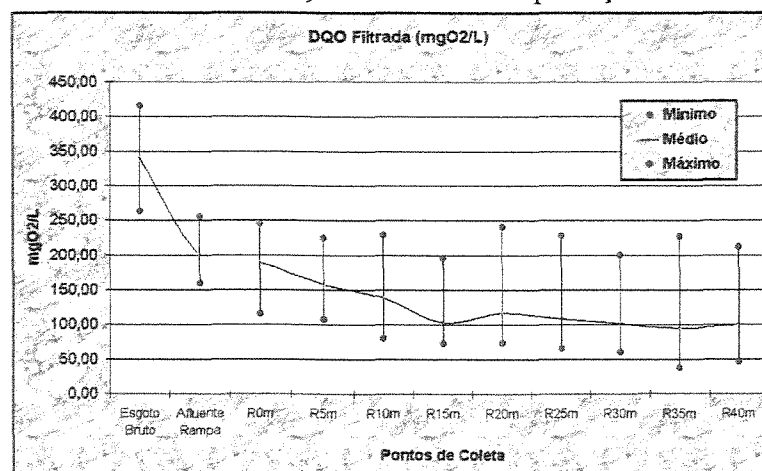


FIGURA 5.16 – DQO Filtrada ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

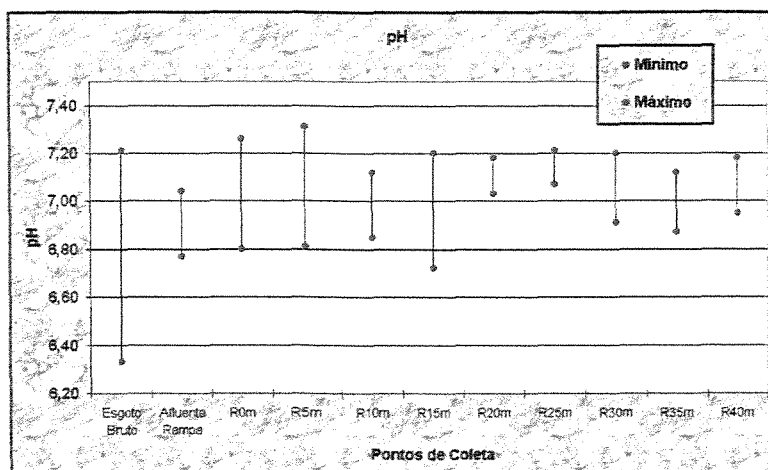


FIGURA 5.17 - pH ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

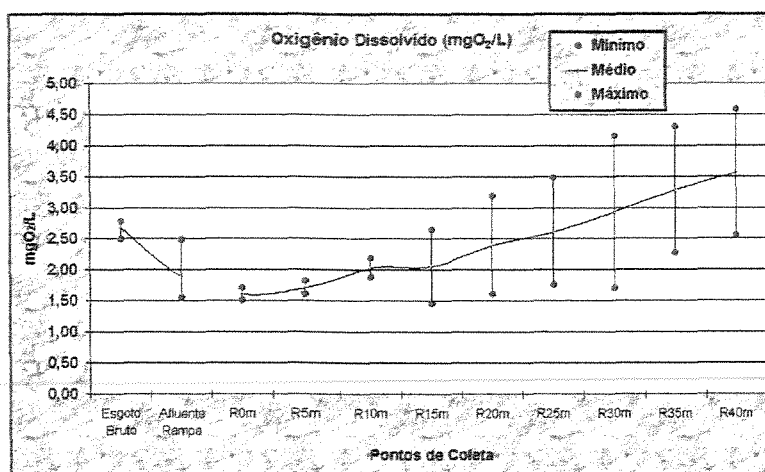


FIGURA 5.18 – Oxigênio Dissolvido ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

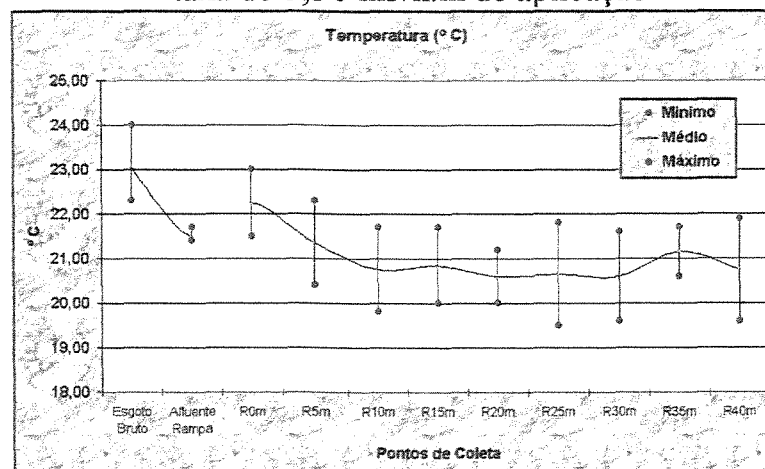


FIGURA 5.19 - Temperatura ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

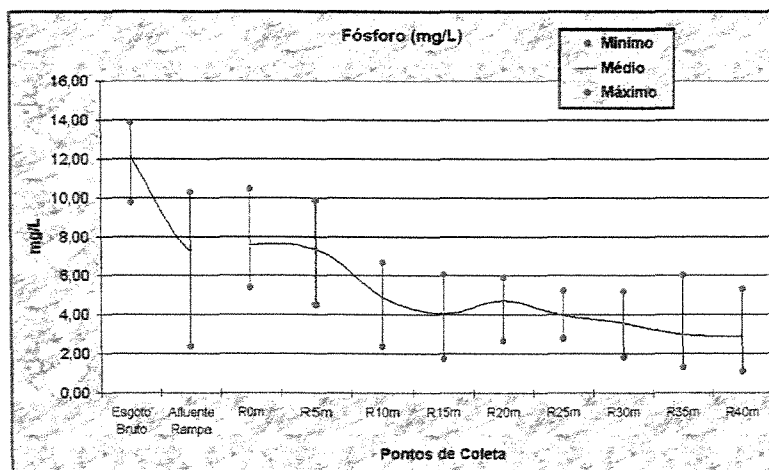


FIGURA 5.20 - Fósforo ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação —

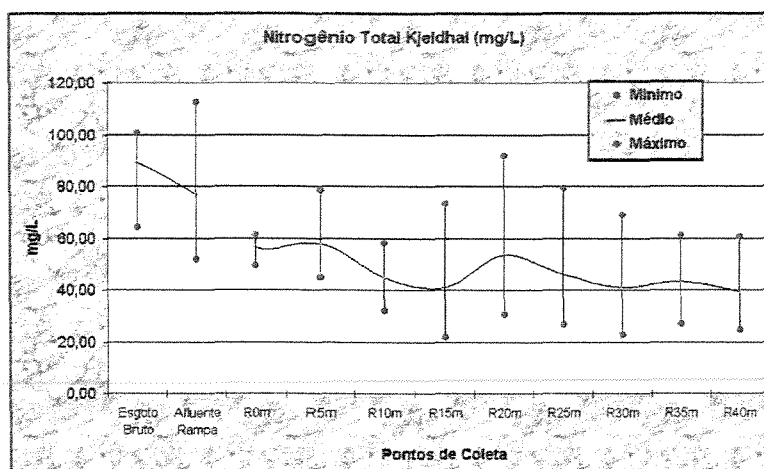


FIGURA 5.21 – Nitrogênio Total Kjeldhal ao longo do comprimento da rampa

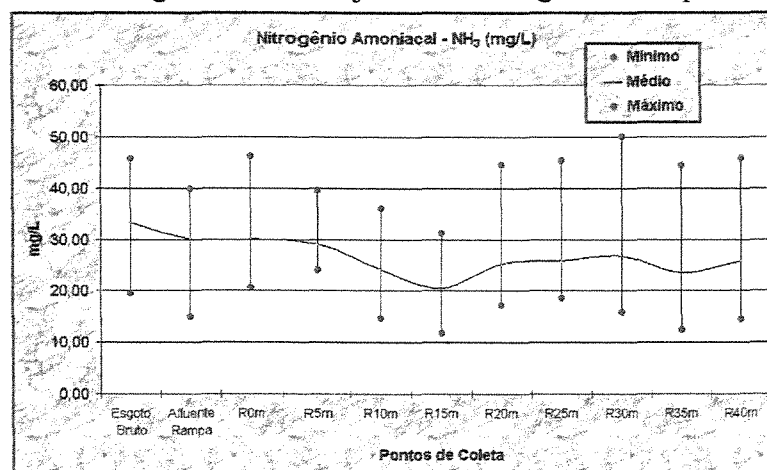


FIGURA 5.22 – Nitrogênio Amoniacal ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação —

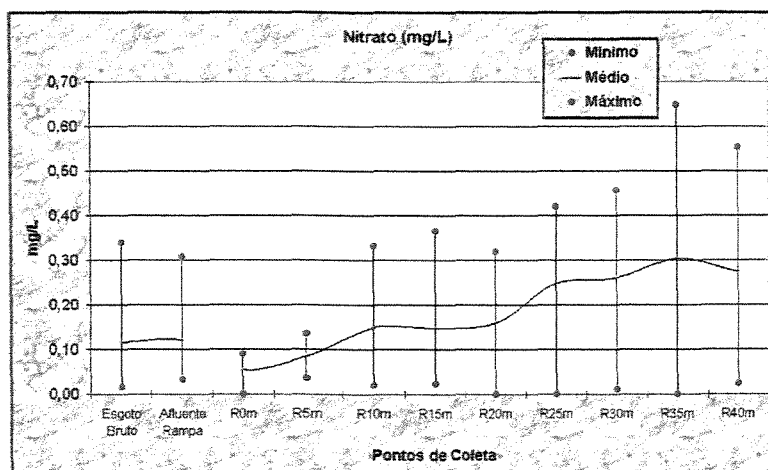


FIGURA 5.23 - Nitrato ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação —

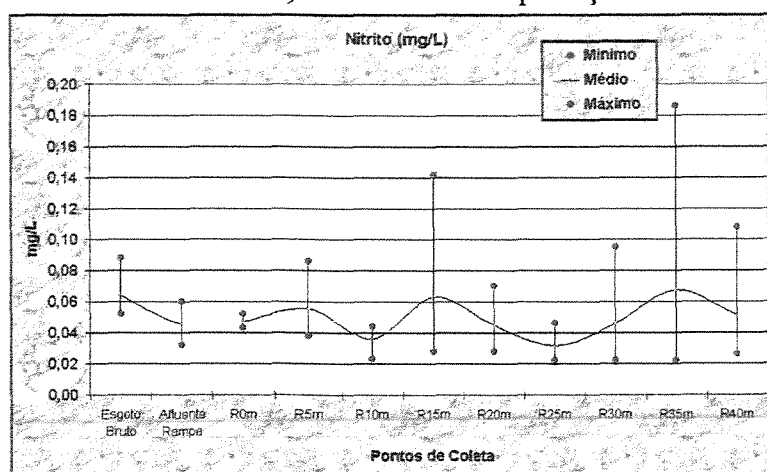


FIGURA 5.24 - Nitrito ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação —

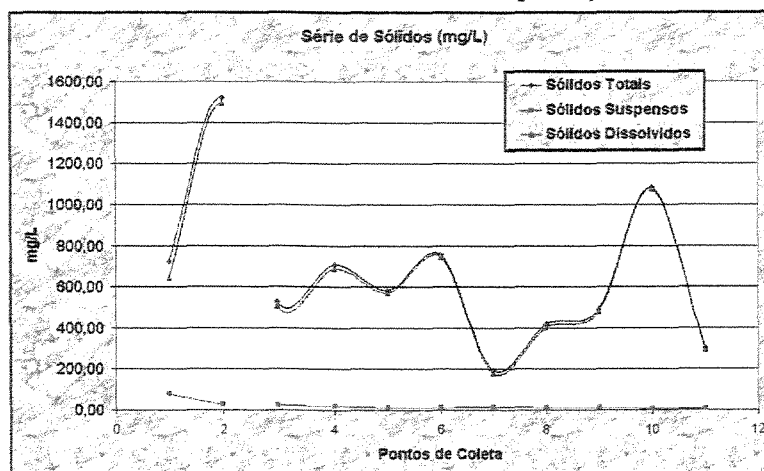


FIGURA 5.25 – Sólidos Totais, Suspensos e Dissolvidos ao longo do comprimento da rampa
— taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação —

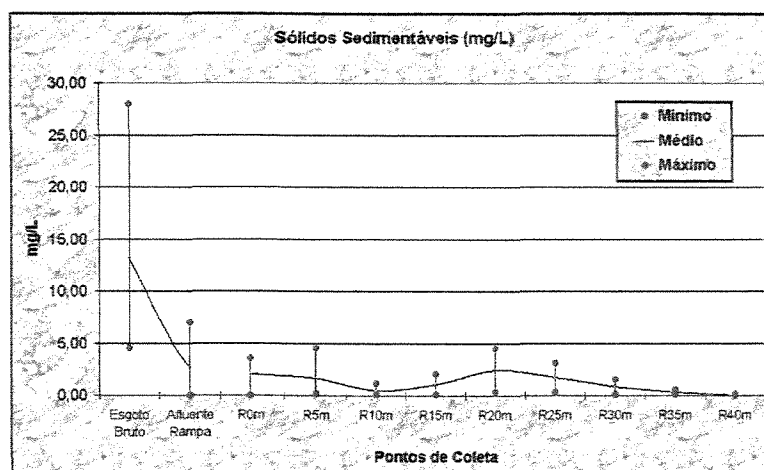


FIGURA 5.26 – Sólidos Sedimentáveis ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

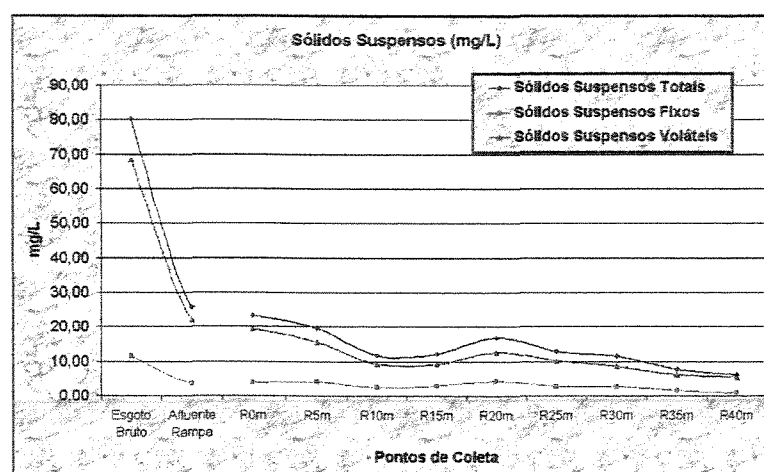


FIGURA 5.27 – Sólidos Suspensos ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,30 m³/h.m de aplicação –

Pode-se observar, que de forma geral, o tratamento com escoamento superficial no solo tende a efetuar a remoção de carga orgânica de maneira satisfatória, alcançando níveis de tratamento condizentes com a legislação em vigor, semelhante e por vezes superior aos sistemas normalmente utilizados em plantas de tratamento de efluentes.

Utilizado como polimento do efluente anaeróbio, em um sistema reator filtro anaeróbio/escoamento superficial, pode-se observar a grande remoção de carga orgânica nos reatores, a níveis de tratamento na ordem de 80% (período de detenção de 3 horas nos filtros), bem como a retenção de sólidos dentro dos reatores anaeróbios.

Observou-se também, que apesar da elevação da taxa de aplicação, o tratamento por disposição no solo manteve a DBO do efluente final abaixo de 50,0 mg/L, níveis médios de sólidos suspensos menores que 50,0 mg/L e oxigênio dissolvido maior que 3,50 mgO₂/L. Inclusive, neste parâmetro, pode-se verificar a aeração gradativa do efluente a medida que o mesmo escoava sobre a superfície da rampa.

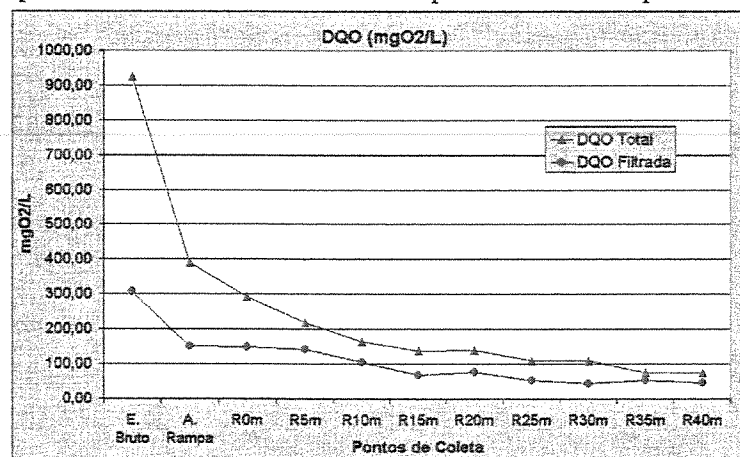


FIGURA 5.28 – DQO ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,20 m³/h.m de aplicação –

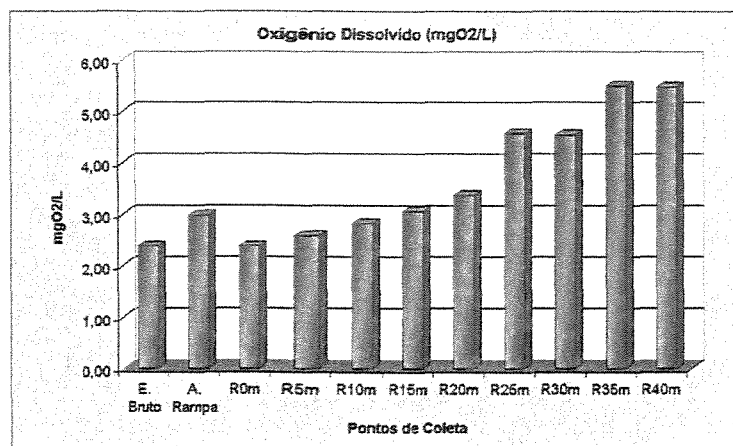


FIGURA 5.29 – Oxigênio Dissolvido ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,20 m³/h.m de aplicação –

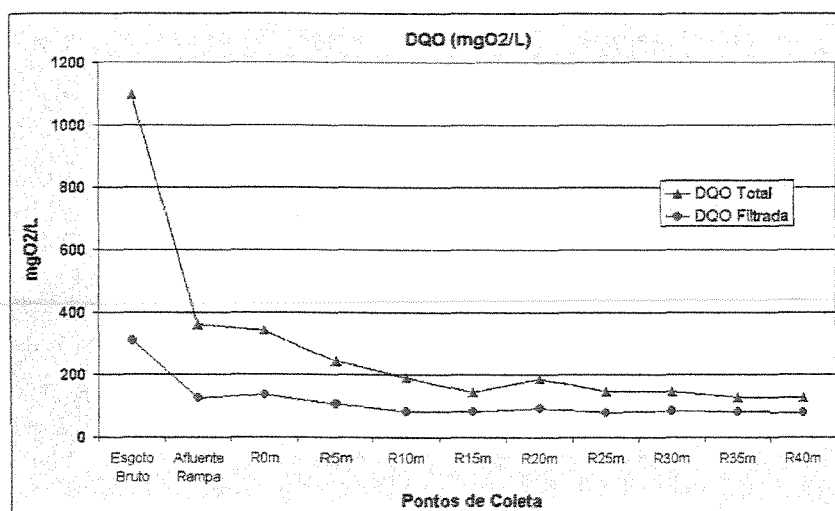


FIGURA 5.30 – DQO ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,40 m³/h.m de aplicação –

As projeções das demais análises apresentaram tendências e equações características de curva semelhantes às apresentadas.

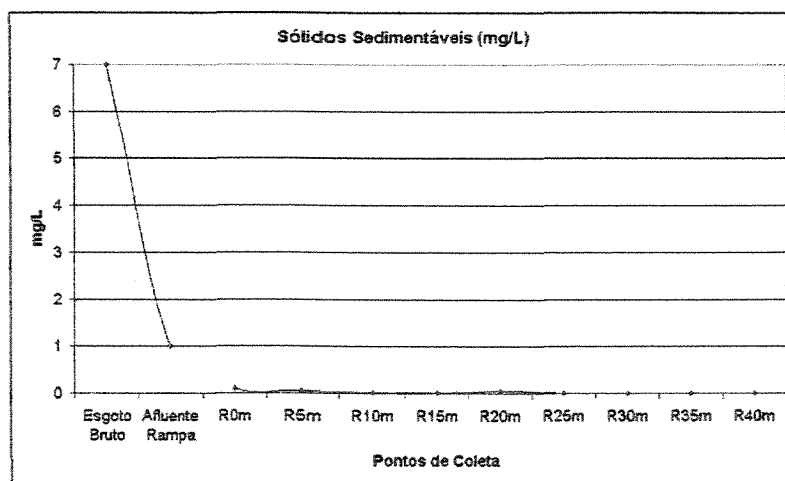


FIGURA 5.31 – Sol. Sedimentáveis ao longo do comprimento da rampa
– taxa de 0,40 m³/h.m de aplicação –

Esteticamente, o efluente final é claro e sem odor característico, não apresentando aparência desagradável ou mesmo repulsiva (FIGURA 5.32).

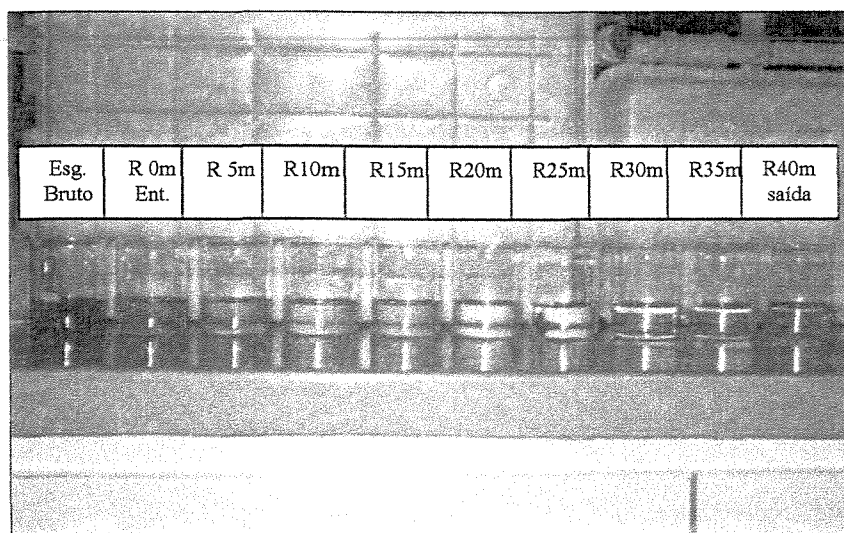


FIGURA 5.32 – Amostragem de efluente ao longo do escoamento

Todas as curvas médias dos parâmetros analisados apresentam um ovalização em torno do ponto de amostragem R20m, isto se deve ao fato de existir um estreitamento na

largura da lâmina de escoamento do efluente neste ponto. O desnível transversal do solo produzia um estreitamento na lâmina, na ordem de 12%, ou seja, a largura útil neste ponto é de 3,85m (largura total da rampa = 4,35m). O problema, inicialmente de difícil solução, uma vez que tanto o escoamento quanto a cobertura vegetal já estavam formados e qualquer intervenção poderia acarretar em atrasos no cronograma do projeto, bem como outras imperfeições na rampa. Entretanto, após a aplicação da primeira taxa de escoamento (0,10m³/m.h), e análise dos dados obtidos, resolveu-se conservar o desnível, objetivando analisar o comportamento do sistema frente ao obstáculo.

Quanto ao aumento das taxas de aplicação ao longo do período de projeto, verificou-se que a medida que aumenta o volume aplicado, melhor é o perfil da lâmina de escoamento, apresentando maior uniformidade transversal e evitando o aparecimento de “zonas mortas”, áreas em que a velocidade de escoamento é reduzida, ou mesmo igual a zero. Entretanto, o terço inicial de tratamento, área em que ocorre a maior porcentagem de degradação da matéria orgânica, tende a apresentar um deslocamento no sentido do escoamento, ou seja, um aumento deste trecho. Entretanto, os dois terços seguintes mantêm um certo tamponamento do sistema; Como pode ser visto na análise dos gráficos, o aumento da taxa de aplicação altera as características do efluente final do sistema, ou seja, da taxa de eficiência do sistema, entretanto, esta variação não é proporcional ao aumento da vazão afluyente.

Quanto aos custos de implantação do sistema, verificou-se a sua exequibilidade frente aos processos conhecidos e comumente utilizados em projetos de estações de tratamentos de esgotos. Não se considerando os custos com aquisição de terreno, utilizou-se US\$5.300,00 entre terraplenagem, construção das estruturas e plantação das gramíneas, para uma população equivalente a 125 habitantes, ou seja, US\$42,40/hab no sistema piloto. PAGANINI (1997) encontrou a relação de US\$38,00/hab num sistema em escala real. Na FIGURA 5.33 podem ser verificados os custos de implantação de sistemas de tratamento de efluentes.

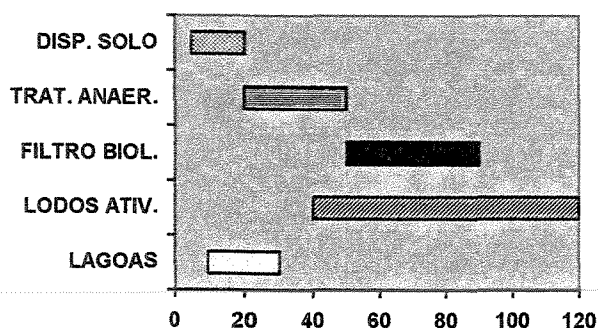


FIGURA 5.33 – Custos de Implantação, em US\$/hab
Fonte - adaptado de VON SPERLING (1996)

A planta piloto mostrou eficiência compatível com a legislação, e muitas vezes superior aos valores encontrados na literatura, em comparação a outros sistemas de tratamento de efluentes, como Lagoas de Estabilização, Reatores UASB, Filtros Anaeróbios, etc. Como pode ser observado na comparação entre as FIGURAS 5.2, 5.13 e 5.34.

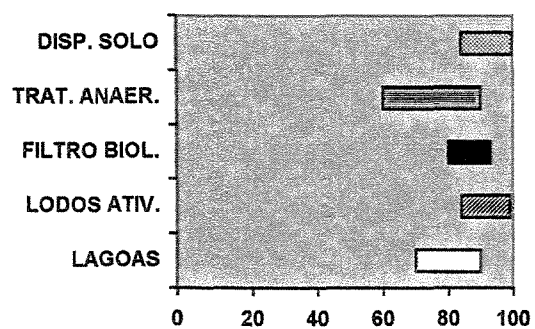


FIGURA 5.34 – Eficiência na Remoção da DBO (%)
Fonte - adaptado de VON SPERLING (1996)

6. CONCLUSÕES

Conforme era a princípio esperado, o sistema de disposição no solo por escoamento superficial comportou-se de maneira satisfatória, tanto no sistema em si, quanto no conjunto filtros/disposição no solo. Atendendo em vários pontos a legislação vigente, resolução 020/86 do CONAMA. O sistema demonstrou também notória vantagem em relação aos demais no aspecto que tange remoção de nutrientes, por exemplo, nitrogênio e fósforo.

Com nos objetivos deste trabalho, conclui-se que o sistema de aplicação de esgotos no solo, atuando como pós-tratamento de filtros anaeróbios pode atuar com uma grande gama de taxas de aplicação ($0,10 - 0,40 \text{ m}^3/\text{m.h}$), comportando-se de maneira semelhante quanto às características do efluente final produzido.

Entretanto vale salientar que taxas de aplicação mais elevadas envolvem o melhor dimensionamento dos filtros anaeróbios, a fim de evitar uma velocidade

excessiva do esgoto dentro do reator e o conseqüente carreamento do material adsorvido ao meio suporte.

Fica aqui a recomendação de que os tratamentos por disposição no solo, principalmente por tratarem-se de sistemas em que o país apresenta pouca experiência em seu uso, carecem de maiores estudos, como, por exemplo, pesquisas com aplicações de maiores taxas e estudos de viabilidade econômica, a fim de baratear o seu custo de implantação, diminuindo assim a relação custo por volume de efluente tratado.

A contribuição efetiva e segura, do ponto de vista sanitário e ambiental, será na utilização de um sistema de fácil construção e operação, possuindo baixo custo e, portanto acessível às comunidades que tenham limitações orçamentárias.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1 ARAÚJO, G.C. **Avaliação do Pós-Tratamento de Efluentes de Reatores UASB através de um Sistema de Aplicação Superficial de Esgotos no Solo.** Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. Belo Horizonte, 1999.
- 2 ANDRADE NETO, C.O. **Sistemas simples para tratamento de esgotos sanitários.** Experiência brasileira. ABES, São Paulo, 301p. 1997.
- 3 ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 13969 – Tanques Sépticos – Unidades de Tratamento Complementar e Disposição Final dos Efluentes – Projeto, Construção e Operação.** 60p. 1997.

- 4 BARIJAN, F.P.O.; FIGUEIREDO, R.F. de. Produção de Lodo em um Reator Anaeróbio de Fluxo Ascendente e Manta de Lodo. **XXV Congresso Interamericano de Ingenieria Sanitária y Ambiental**, Cidade do México, México, 4 a 7 de setembro de 1997.
- 5 CAMPOS, J.R.; DIAS, H.G. Potencialidades do filtro anaeróbio. **Revista DAE**, v. 49, n. 154, p. 73-76, 1989.
- 6 CAMPOS, J.R. (coordenador). **PROSAB – Tratamento de Esgotos Sanitários por Processo Anaeróbio e Disposição no Solo**. **ABES**, São Paulo, 464p. 1999.
- 7 CARRARO, V.; FIGUEIREDO, R.F. de; VIEIRA, D.B. Feasibility of Wide Furrow Irrigation for Treatment of Citrus Processing Wastewaters. **Anais, 51st Industrial Waste Conference**, Purdue University, W. Lafayette, Ind., EUA, 6 a 8 de maio de 1996.
- 8 CASSEB, M.M.S. **Avaliação do desempenho de um reator anaeróbio de fluxo ascendente e manta de lodo, em escala piloto, tratando esgotos sanitários da cidade de Belo Horizonte**. Dissertação de Mestrado, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. Belo Horizonte, 1996.

- 9 CHERNICHARO, C.A.L. Princípios do tratamento biológico de águas residuárias. Vol.5. Reatores Anaeróbios. **Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG.** São Paulo, 246p. 1997.
- 10 CORAUCCI FILHO, B. **Tratamento de Esgotos Domésticos no Solo pelo Método do Escoamento Superficial.** Tese de Doutorado, Departamento de Engenharia Hidráulica e Sanitária da Escola Politécnica, USP. São Paulo, 1991.
- 11 CORAUCCI FILHO, B; FIGUEIREDO, R.F. de; VIEIRA, D.B. et al. Avaliação da Qualidade Sanitária da Água Infiltrada no Solo localizado em Área de Despejo de Efluentes da Indústria Cítrica. **18º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, Foz do Iguaçu, PR, CD-Rom, p. 156-164, 14 a 19 de setembro de 1997.
-
- 12 COUTO, L.C.C.; FIGUEIREDO, R. F. Filtro Anaeróbio com Bambu para Tratamento de Esgotos Domésticos. **Ingenieria Sanitária**, v. XLVII , n. 1, p. 77-80, 1993.
- 13 EPA TECHNOLOGY TRANSFER SEMINAR PUBLICATION. Land Treatment of Municipal Wastewater Effluents, Design Factors. **Environmental Protection Agency (E.P.A.)**, 72 p., 1976.

- 14 FIGUEIREDO, R. F. Tratamento de Esgotos pelo Processo de Escoamento Superficial no Solo. **Revista DAE**, v. 45, n. 140, p. 62-66, 1985.
- 15 FIGUEIREDO, R. F. Rainfall and Overland Flow Performance. **Journal of Environmental Engineering**, v. 110, n. 3, p. 768-794, 1984.
- 16 GUJER, W; ZEHNDER, A.J.B. Conversion Processes in Aerobic Digestion. **Water Science Technology**, v. 15, p 127-167, 1983.
- 17 HELIOTIS, F.D. Water storage capacity of wetland used for wastewater treatment. **Journal of Environment Engineering**, v. 115, n. 4, p 822-834, 1989.
- 18 HUTTUNEN, A. Nutrient retention in the vegetation of an overland flow treatment system in northern Finland. **Aquatic Botany**, v. 55, n. 1, p 61-73, 1996.
- 19 MACHADO, R.M.G.; CHERNICHARO, C.A.L. Avaliação do desempenho de filtros anaeróbios utilizados para o polimento de efluentes de reatores UASB. **Anais, 19º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, ABES. P87, 1997.
- 20 METCALF & EDDY. Wastewater Engineering: treatment, disposal and reuse. ed. 3, 1334 p, 1991.

- 21 NOUR, E. A. A. **Tratamento do efluente de uma indústria cítrica pelo método de escoamento superficial no solo.** Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP. Campinas, 1993.
- 22 OVERCASH, M.R.; COVIL, D.M.; GILLIAM, J.W.; WESTERMAN, P.W. and HUMENIK, F.J. Overland flow pretreatment of poultry manure. **Journal Environmental Engineering Division**, v. 104, n. 2, p 339-350, 1978.
- 23 OVERMAN, A.R.; WOLFE, D.W. Overland flow treatment of wastewater at Florida State Prison. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 58, n. 9, p 903-910, 1986.
-
- 24 PAGANINI, W.S. Disposição de esgotos no solo (escoamento à superfície). **Fundo editorial da AESABESP**, São Paulo, 232p., 1995.
- 25 PINTO, J.D.S. **Tratamento de Esgotos Sanitários em filtro anaeróbio utilizando escória de alto-forno como meio suporte.** Dissertação, Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, UFMG. Belo Horizonte, 1995.

- 26 PINTO J.D.S; CHERNICHARO C.A.L. Tratamento de esgotos domésticos em filtro anaeróbio utilizando rejeito da indústria siderúrgica como meio suporte. **Anais, 18º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental**, ABES. Salvador, 1995.
- 27 KRUZIC, A.P. Natural treatment and on-site processes. **Water Environment Research**, v. 69, n. 4, p 522-526, 1997.
- 28 ROZON, S. A. **Filtro Anaeróbio com Enchimento de Bambu para Tratamento de Esgotos Sanitários: Avaliação da Partida e Operação**. Dissertação de Mestrado, Faculdade de Engenharia Civil, UNICAMP. Campinas, 2000.
-
- 29 SMITH, R.G. , SCHROEDER, E.D. Physical design of overland flow systems. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 55, n. 3, p 255-260, 1983.
- 30 SMITH, R.G. , SCHROEDER, E.D. Field studies of overland flow process for the treatment of raw and primary treated municipal wastewater. **Journal of Water Pollution Control Federation**, v. 57, n. 7, p 785-794, 1985.
- 31 **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**, 19th ed., **American Public Health Association**, New York, 1995.

- 32 TERADA, M.; ZUCCOLO, A.C.F.; PAGANINI, W.S. Tratamento de esgotos domésticos por disposição no solo com utilização de gramíneas. **Revista Engenharia Sanitária**, v. 25, n. 4, p 457-463, 1986.
- 33 U.S. ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Process design manual: land treatment of municipal wastewater. Technology Transfer. Cincinnati. 1981.
- 34 VAN HANEDL, A.C.; LETTINGA, G. Tratamento Anaeróbio de Esgotos: Um manual para regiões de clima quente. Campina Grande - PB, 240p. 1994.
- 35 VON SPERLING, M. Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos. DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL DA UFMG, Belo Horizonte, 243p. 1996
- 36 YOUNG, J. C. Factors affecting the design and performance of upflow anaerobic filters. **Water Science & Technology**, v. 24, p. 135-155, 1991.
- 37 ZUCCOLO, A.C.F.; TERADA, M. Tratamento de esgotos domésticos por disposição no solo com utilização de gramíneas. **Revista DAE**, v. 45, n. 142, p 249-254, 1985.