

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO PARA O
TRATAMENTO DE ÁGUA E RECUPERAÇÃO DE AMBIENTES
LÊNTICOS A PARTIR DA FILTRAÇÃO EM SOLO NATURAL
COMO MEIO FILTRANTE: ESTUDO DE CASO NO LAGO DO
HU/UFSC- FLORIANÓPOLIS/SC**

Francielly da Rosa

Florianópolis
2019



Universidade Federal de Santa Catarina
Curso de Graduação em Engenharia
Sanitária e Ambiental

Francielly da Rosa

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO PARA O
TRATAMENTO DE ÁGUA E RECUPERAÇÃO DE AMBIENTES
LÊNTICOS A PARTIR DA FILTRAÇÃO EM SOLO NATURAL
COMO MEIO FILTRANTE: ESTUDO DE CASO NO LAGO DO
HU/UFSC- FLORIANÓPOLIS/SC**

Trabalho de Conclusão de Curso
submetido ao Departamento de
Engenharia Sanitária e Ambiental da
Universidade Federal de Santa
Catarina para a obtenção do Grau de
Engenheira Sanitarista e Ambiental
Orientador: Sergio Luiz Belló
Coorientador: Prof. Dr. Maurício Luiz
Sens

Florianópolis
2019

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor,
através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Universitária da UFSC.

da rosa, francielly
IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO PARA O
TRATAMENTO DE ÁGUA E RECUPERAÇÃO DE AMBIENTES
LÊNTICOS A PARTIR DA FILTRAÇÃO EM SOLO NATURAL COMO
MEIO FILTRANTE : ESTUDO DE CASO NO LAGO DO HU/UFSC-
FLORIANÓPOLIS/SC / francielly da rosa ; orientador,
Sergio Luiz Belló, coorientador, Mauricio Luiz Sens,
2019.

86 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) -
Universidade Federal de Santa Catarina, Centro
Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e
Ambiental, Florianópolis, 2019.

Inclui referências.

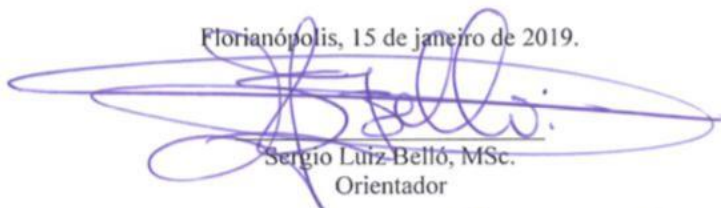
1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Filtração
em solo natural. 3. Tratamento de água. 4.
Recuperação de corpos hídricos. I. Belló, Sergio Luiz.
II. Sens, Mauricio Luiz. III. Universidade Federal
de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária
e Ambiental. IV. Título.

Francielly da Rosa

**IMPLANTAÇÃO DE UM SISTEMA ALTERNATIVO PARA O
TRATAMENTO DE ÁGUA E RECUPERAÇÃO DE AMBIENTES
LÊNTICOS A PARTIR DA FILTRAÇÃO EM SOLO NATURAL
COMO MEIO FILTRANTE: ESTUDO DE CASO NO LAGO DO
HU/UFSC - FLORIANÓPOLIS/SC**


Trabalho submetido à Banca Examinadora como requisito parcial obrigatório para Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental - TCC II.

Florianópolis, 15 de janeiro de 2019.

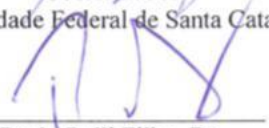


Sergio Luiz Belló, MSc.
Orientador


Banca Examinadora:



Maurício Luiz Sens, Dr.
Coorientador
Universidade Federal de Santa Catarina



Paulo Belli Filho, Dr.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina



Thyara Campos Martins Nonato, Dr.
Membro
Universidade Federal de Santa Catarina

Este trabalho é dedicado à minha mãe,
que não largou minha mão nem por
um minuto, abdicando dos seus sonhos
para que eu pudesse realizar os meus!

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço à Deus, por todas as proteções e bênçãos na minha vida e por não ter me deixado desistir nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, que estiveram sempre presente na minha vida, incentivando-me a estudar, apoiando-me e dando estrutura financeira, sentimental e psicológica para eu chegar até aqui. À minha mãe, guerreira dona Ana Lúcia, minha base, meu porto seguro, minha parceira de vida, de amor, de cuidado. Serei eternamente grata e estaremos para sempre juntas!

À minha irmã linda, Vanessa, minha parceirinha e melhor amiga, dando-me as mãos e me apoiando sempre que eu parecia desmoronar, àquela que me deu meu maior presentinho, meu afilhado Matheus. Quando se têm um porquê e um por quem, tudo se torna mais leve! E ao meu cunhado, Dé, com seu jeitinho peculiar de me ajudar e me proteger.

À minha prima, Juli, desde pequena juntas e peça fundamental na minha vida, amo você!

Às minhas amigas de vida, Babi e Tati, parceirinhas, ouvindo minhas reclamações e lamúrias da minha vida acadêmica e me fazendo descontraí e esquecer de tudo por alguns momentos. Obrigada e espero ter sempre vocês comigo.

Aos amigos que a Engenharia me trouxe. Minha amiga Amábile. Quantos e quantos dias estudando até tarde na Biblioteca, quantas risadas, finais de semana de trabalhos, tardes inteiras de conversas jogadas fora, quantas idas à farmácia para olhar rótulo de produtos de cabelo. Obrigada pela parceria! À minha amigona Vanessa, desde o primeiro semestre, sempre juntas nos perrengues da faculdade e da vida também. Obrigada, minha Sherlock Holmes preferida. Minha amiga Fabi, muita parceria nos estudos, trabalhos e loucuras da vida acadêmica. Meus colegas Alondra, Tairine e Paulo, obrigada por toda ajuda, incentivo e companheirismo.

Ao meu orientador Sergio. Aos meus colegas do LAPOÁ, Fernando e Ailton, que nesta última etapa, durante o período de TCC, dispuseram-se de tempo e paciência para ajudar no desenvolvimento do meu trabalho.

À Universidade Federal de Santa Catarina, minha segunda casa e que me acolheu durante este longo período.

Por fim, ao meu amor, Bruno. Pessoa incrível que conheci em meio a um turbilhão de sentimentos, tarefas e mudanças. Obrigada pela parceria, cuidado e carinho comigo.

Ninguém caminha sem aprender a caminhar, sem aprender a fazer o caminho caminhando, refazendo e retocando o sonho pelo qual se pôs a caminhar.
(Paulo Freire)

RESUMO

O crescimento populacional sem planejamento tem contribuído para a poluição dos corpos hídricos. Para viabilizar a recuperação destes mananciais, propôs-se o estudo de filtração em solo natural, uma técnica alternativa, que visa o tratamento de água de ambientes lânticos e avalia sua recuperação. Assim, este estudo objetivou a implantação de sistemas de filtração da água, bem como a identificação dos seus parâmetros de projeto, a fim de analisar sua eficiência. Neste estudo, foram implantados dois sistemas pilotos de tratamento: a) o sistema em escala real, que correspondeu à filtração nas margens do lago do HU/UFSC, em Florianópolis, Santa Catarina, Brasil; b) o sistema em colunas filtrantes de sedimento, referente à simulação do sistema em escala real, construído em laboratório. A caracterização do sedimento, que serve como meio filtrante do sistema, foi realizada a partir de ensaios granulométricos e de condutividade hidráulica, tendo como resultados a predominância de areia fina a média, que juntas representam 87,07% e o coeficiente de condutividade hidráulica $k = 6,4 \times 10^{-4}$, respectivamente, que demonstra um solo bom para o desenvolvimento do estudo proposto. O controle da qualidade da água produzida pelo sistema em escala real, bem como o enquadramento do lago, segundo as recomendações do CONAMA 357/05, foram avaliados a partir do monitoramento dos parâmetros: pH, temperatura, oxigênio dissolvido, cor aparente, turbidez, sólidos dissolvidos totais, coliformes totais e *E. Coli*. Observou-se que o sistema piloto em escala real, por estar em fase inicial de desenvolvimento, em período de aclimação, apresentou resultados não satisfatórios em relação à remoção dos contaminantes e melhoria dos parâmetros analisados; e o corpo hídrico foi enquadrado, dentre os parâmetros estudados, como classe 4, que utiliza a água para fins menos exigentes. Identificou-se o nível e o fluxo do escoamento de água no lençol freático, por medições realizadas nos piezômetros instalados no local de estudo. Por fim, apresentou-se os parâmetros de projeto do sistema piloto, referentes em ambos os sistemas. Neste estudo verificou-se que o pouco tempo entre a implantação do sistema e o andamento deste trabalho não permitiu que os resultados fossem satisfatórios. Com base nestes, concluiu-se ainda que, o número de amostras das análises foi insuficiente para a construção de dados e relações confiáveis.

Palavras-chave: Filtração em solo natural. Tratamento de água. Recuperação de corpo hídrico.

ABSTRACT

Unplanned population growth has contributed to the pollution of hydrous bodies. In order to make possible the recovery of these sources, the study of filtration in natural soil was proposed, an alternative technique, which aims at the treatment of water from lentic surroundings and evaluates its recovery. Thus, this study aimed at the implantation of water filtration systems, as well as the identification of their design parameters, in order to analyze their efficiency. In this study, two pilot treatment systems were implemented: a) the real-scale system, which corresponded to the filtration on the banks of lake HU/UFSC, in Florianópolis, Santa Catarina, Brazil; b) the system in sediment filter columns, referring to the simulation of the real scale system, built in the laboratory. The sediment characterization, which serves as the filtering medium of the system, was carried out from granulometric and hydraulic conductivity tests, resulting in the predominance of fine to medium sand, which together represent 87,07% and the coefficient of hydraulic conductivity $k = 6,4 \times 10^{-4}$, respectively, which demonstrates a good soil for the development of the proposed study. The control of the water quality produced by the system in real scale, as well as the classification of the lake, according to the recommendations of CONAMA 357/05, were evaluated by monitoring parameters: pH, temperature, dissolved oxygen, apparent color, turbidity, total dissolved solids, total coliforms and *E. Coli*. It was observed that the pilot scale system, in its initial stage of development, during acclimation period, presented unsatisfactory results in relation to the removal of the contaminants and improvement of the analyzed parameters; and the hydrous body was classified as class 4. The level and flow of the water runoff in the groundwater were determined by measurements performed on the piezometers installed at the study site. Finally, the design parameters of the pilot system, referring to both systems, were presented. In this study it was verified that the short time between the implantation of the system and the progress of this work did not allow the results to be satisfactory. Based on these, it was also concluded that, the number of samples of the analyzes was insufficient for the construction of data and reliable relations.

Keywords: Filtration in natural soil. Water treatment. Recovery of hydrous body.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1- Classes de condutividade hidráulica saturada de acordo com a característica granulométrica.....	35
Figura 2- Mapa de Localização da área de estudo	44
Figura 3- Esquema do ensaio de carga variável	46
Figura 4- Indicador de nível de água utilizado no ensaio.....	47
Figura 5- Construção da vala de infiltração	51
Figura 6- Construção do sistema de recalque da água do lago.....	52
Figura 7- Esquema do funcionamento da estrutura em escala real	53
Figura 8- Construção e implantação dos piezômetros.....	54
Figura 9- Esquema do sistema piloto	56
Figura 10- Sistema piloto	57
Figura 11- Curva granulométrica obtida a partir do ensaio granulométrico	61
Figura 12- Comportamento da temperatura da água bruta e da água filtrada em solo natural.....	63
Figura 13- pH das amostras da água bruta e filtrada em solo natural....	64
Figura 14- Dados obtidos da concentração de oxigênio dissolvido da água bruta e filtrada.....	65
Figura 15- Dados de cor aparente da água bruta e água filtrada	67
Figura 16- Dados de turbidez obtidos da água bruta e filtrada.....	68
Figura 17- Dados obtidos de sólidos dissolvidos totais.....	69
Figura 18- Locação dos piezômetros e identificação do fluxo da água do sistema em funcionamento	72

LISTA DE TABELAS

Tabela 1- Classificação granulométrica indicado pela NBR 6502/95...	45
Tabela 2- Tecnologias e equipamentos empregados	49
Tabela 3- Caracterização da amostra coletada para ensaio de granulometria	60
Tabela 4- Caracterização do aquífero de acordo com a condutividade hidráulica e o material.	62
Tabela 5- Dados estatísticos obtidos de pH da água bruta e filtrada	65
Tabela 6- Dados estatísticos obtidos para concentração de oxigênio dissolvido	66
Tabela 7- Dados obtidos de cor aparente da água bruta e da água filtrada em solo natural	67
Tabela 8- Dados obtidos de turbidez da água bruta e água filtrada.....	68
Tabela 9- Dados obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L).....	69
Tabela 10- Dados obtidos de coliformes totais (100/mL).....	70
Tabela 11-Dados obtidos de coliformes termotolerantes (100/mL).....	70
Tabela 12- Enquadramento do corpo hídrico a partir dos parâmetros analisados de acordo com o CONAMA 357/05	71
Tabela 13- Medições do nível do escoamento da água no lençol freático	72
Tabela 14-Parâmetros de projeto utilizadas nas colunas filtrantes.....	73

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT – Associação Brasileira de Normas Técnicas
CTC- Centro Tecnológico
CONAMA- Conselho Nacional do Meio Ambiente
C1- Coluna filtrante 1
C2- Coluna filtrante 2
C3- Coluna filtrante 3
C4- Coluna filtrante 4
D10- Diâmetro Efetivo de 10%
D90- Diâmetro efetivo de 90%
E. Coli- Escherichia Coli
ENS/UFSC- Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da Universidade Federal de Santa Catarina
FM- Filtração em margem
FL- Filtração lenta
HU/UFSC- Hospital Universitário Professor Polydoro Ernani de São Thiago pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina
K- Condutividade Hidráulica
LAPOÁ- Laboratório de Potabilização das Águas
LIMA- Laboratório Integrado de Meio Ambiente
OD- Oxigênio Dissolvido
PVC- Policloreto de polivinila
P4- Piezômetro 4
P10- Piezômetro 10
SDT – Sólidos Dissolvidos Totais
TD- Tempo de detenção
Tf- Taxa de filtração

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	31
1.1	OBJETIVOS	32
1.1.1	Objetivo geral.....	32
1.1.2	Objetivos específicos	32
2	FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA	33
2.1	AMBIENTES LÊNTICOS – ASPECTOS GERAIS	33
2.2	HIDROGEOLOGIA	33
2.2.1	Condutividade hidráulica.....	35
2.3	INTERAÇÃO ENTRE CORPO HÍDRICO E ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS.....	36
2.4	PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA	37
2.4.1	Parâmetros físicos, químicos e biológicos	38
2.5	REMOÇÃO DE CONTAMINANTES NO PROCESSO DE FILTRAÇÃO EM SOLO NATURAL COMO MEIO FILTRANTE ...	39
2.6	SIMILARIDADE DA FILTRAÇÃO EM SOLO NATURALCOM A FILTRAÇÃO EM MARGEM (FM) E COM A FILTRAÇÃO LENTA (FL).....	41
3	MATERIAIS E MÉTODOS.....	43
3.1	CONSIDERAÇÕES GERAIS	43
3.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO	43
3.2.1	Ensaio de Caracterização Granulométrica.....	44
3.2.2	Ensaio de Condutividade Hidráulica.....	45
3.2.2.1	Realização do Ensaio	46
3.3	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO	48
3.3.1	Ensaio preliminares (parâmetros de qualidade da água)	48
3.4	ESTRUTURA EM ESCALA REAL	50
3.4.1	Funcionamento do sistema	52
3.4.2	Piezômetros.....	53
3.5	SISTEMA EM COLUNAS FILTRANTE S - PILOTO	55

3.5.1	Parâmetros de projeto do sistema em colunas filtrantes - piloto	58
4	RESULTADOS E DISCUSSÕES	60
4.1	CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DO LOCAL DE ESTUDO	60
4.1.1	Análise Granulométrica	60
4.1.1.1	Porosidade Efetiva	61
4.1.2	Análise da Condutividade Hidráulica	61
4.2	CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO	62
4.2.1	Observações gerais	62
4.2.2	Avaliação da qualidade da água após sua passagem pelo sistema de filtração	63
4.2.2.1	Influências da temperatura e pH	63
4.2.2.2	Oxigênio Dissolvido (OD mg/L)	65
4.2.2.3	Cor aparente e Turbidez	66
4.2.2.4	Sólidos Dissolvidos Totais	69
4.2.2.5	Coliformes Totais e <i>Escherichia Coli</i>	70
4.2.3	Enquadramento do corpo hídrico	70
4.3	LOCAÇÃO DOS PIEZÔMETROS	71
4.3.1	Identificação do nível e fluxo de escoamento da água no lençol freático	71
4.4	PARÂMETROS DE PROJETO - SISTEMA PILOTO	73
5	CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES	75
	REFERÊNCIAS	76
	APÊNDICE A – Medições do rebaixamento do lençol freático durante o ensaio e os cálculos para determinar o coeficiente de condutividade hidráulica	81
	Cálculos para determinar o coeficiente de condutividade hidráulica:	82
	APÊNDICE B – Cálculos dos parâmetros de projeto do sistema em colunas filtrantes- piloto	83

ANEXO A – Ábaco da variação da porosidade e a vazão específica em relação a granulometria	85
ANEXO B – Tabela dos limites de classe dos parâmetros monitorados segundo a Resolução CONAMA 357/05.....	86

1. INTRODUÇÃO

Com o processo de urbanização sem planejamento, os corpos hídricos têm se tornado alvo de contaminação e isto traz como consequências uma série de problemas que demandam esforços por parte de técnicos e profissionais de engenharia, no processo de elaboração de técnicas de tratamentos de água específicos, que sejam capazes e eficientes em remover tais contaminantes, seja para fins de consumo humano ou estéticos. Neste contexto, muitos estudos têm sido desenvolvidos, principalmente do ponto de vista das pesquisas realizadas em campo, buscando entender a interação entre o corpo hídrico e o mecanismo de transporte do agente poluidor. A recuperação de corpos hídricos pode ser possível, diante de métodos e ações estruturais que visam tanto a melhoria da qualidade da água, como a revitalização do ecossistema, para que este retorne ao seu equilíbrio natural.

Uma técnica largamente empregada no mundo para tratamento de água é a Filtração em Margem (FM), conhecida por apresentar baixos custos de implantação e resultados significativos na remoção de contaminantes altamente poluidores. Esta técnica consiste na utilização de sedimentos naturais contidos nas margens do corpo hídrico como meio filtrante. Para que isto ocorra, Bauwer (2002) indica a construção de poços de produção próximos ao corpo hídrico de estudo, de modo que o bombeamento induza um fluxo de água através do solo, neste percurso os contaminantes são removidos e se obtém água de melhor qualidade.

Neste trabalho, optou-se por adequar o sistema de filtração em margem sob uma nova perspectiva, a qual se objetiva, principalmente, a recuperação de um corpo d'água natural. Assim, nesta técnica se induz a água do corpo hídrico a passar pelo sedimento do próprio lago, que serve como material filtrante. Após esta passagem, conhecidas as condições hidrogeológicas do local, a água é reconduzida ao corpo hídrico pelo lençol freático, por meio da ação da gravidade. A filtração da água ao longo do solo natural apresenta-se como uma alternativa de pré-tratamento de água que será avaliada, para a remoção de microorganismos patogênicos, contaminantes químicos e biológicos, partículas em suspensão, a fim de melhorar a qualidade da água deste ambiente.

Foi implantado um sistema em escala real nas proximidades do Hospital Universitário Professor Polydoro Ernani de São Thiago, pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), por ser

um local que apresenta condições hidrogeológicas adequadas e um reservatório de água doce, além de evidenciar em seu entorno um intenso processo de urbanização e sofrer influências deste processo. Para obter outros parâmetros de projeto e resultados mais consistentes, construiu-se um sistema piloto em colunas filtrantes, em escala laboratorial, no Laboratório de Potabilização de Águas (LAPOÁ), localizado no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS), pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina, tendo o solo natural do local de estudo como meio filtrante.

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo geral

Implantação de um sistema para recuperação do Lago do HU por meio da filtração em solo natural.

1.1.2 Objetivos específicos

- Caracterização do solo do local de estudo e a identificação do fluxo de infiltração;
- Avaliação dos parâmetros físicos, químicos e biológicos de influência no processo, bem como o enquadramento dos parâmetros analisados quanto a classificação dos corpos d'água (resolução CONAMA 357/05);
- Obtenção de parâmetros de projeto dos sistemas piloto, tais como: vazão, tempo de detenção e taxa de filtração.

2. FUNDAMENTAÇÃO TEÓRICA

2.1 AMBIENTES LÊNTICOS – ASPECTOS GERAIS

Uma designação genérica para os ambientes lênticos é “lago”, seja ele de origem natural ou não (VEIGA, 2010). Lago é o nome comum dado a toda massa de água que se acumula de forma natural em uma depressão topográfica totalmente cercada por terra. A origem dos lagos é variável e depende da geomorfologia do terreno, favorecendo a acumulação de água em cavidades terrestres, cuja formação se deu pelas mais diversas razões (ANA, 2013). De acordo com Tundisi & Tundisi (2008), os ambientes lênticos possuem diversas características que os conferem uma série de cuidados especiais quanto ao risco de sofrerem processos de poluição, visto que a dispersão vertical e longitudinal depende de mecanismos externos tais como vento, descargas na superfície, fluxo; e internas como estratificação, mistura vertical, formação de ondas internas.

As principais características de ecossistemas lênticos são a alta capacidade de solubilização de compostos orgânicos, gradientes verticais, baixo teor de sais dissolvidos, alta densidade e viscosidade da água, capacidade de sedimentação, temperatura e radiação subaquática (ANA, 2013). Os ambientes lênticos (lagos ou reservatórios) têm a dificuldade, em muitos casos, de renovação de porções fluidas que sofreram processos de poluição, em parte devido às dificuldades de circulação a que estas porções estão sujeitas e também pelos processos de degradação, muitas vezes, mais intensos (VEIGA, 2010). Desta forma, torna-se indispensável a procura por técnicas específicas de tratamento de água, que sejam eficazes e de baixo custo, para a remoção dos contaminantes destes ambientes visando a sua manutenção e recuperação.

2.2 HIDROGEOLOGIA

O solo é um sistema dinâmico e heterogêneo formado por três fases: sólida (cerca de 50%), líquida (cerca de 25%) e gasosa (cerca de 25%). As duas últimas fases são os principais meios de transporte das substâncias solúveis e voláteis no solo. A fase sólida é responsável pela retenção e armazenamento de componentes orgânicos e inorgânicos. Os fenômenos que ocorrem para esta retenção e armazenagem dependem diretamente da granulometria do solo, principalmente do teor de argila e da quantidade de matéria orgânica presente no solo (MICHELAN, 2010)

apud LEÃO, 1997). A classificação granulométrica do solo pode ser dividida em: argila, silte, areia fina, areia grossa e pedregulho.

Sens et al. (2006) indica que o modo pelo qual a água se move no solo depende de três forças que agem sobre a água:

- Adsorção – por atração molecular, que retém uma fina película de água em volta das partículas do solo;
- Capilaridade – como resultado da tensão superficial, que retém ou move a água em pequenas aberturas;
- Gravidade – que move a água através dos poros maiores, por diferença de carga ou quando existe gradiente hidráulico. A resultante dessas forças depende, em parte, da quantidade de umidade presente em relação ao espaço livre do material poroso.

O processo de filtração depende essencialmente das características do solo, tanto pela produtividade do sistema, quando pela qualidade da água pretendida (MONDARDO, 2009). De acordo com Michelin (2010), a constituição geológica (permeabilidade e granulometria das partículas do solo), definem a velocidade com que a água percorre o meio filtrante. Durante o processo de transporte pelo subsolo, o conteúdo filtrado fica em contato com o material sólido do aquífero podendo dar início à adsorção dos compostos orgânicos. O grau de adsorção depende da natureza dos compostos e do tipo de material de sólido presente (SENS et al., 2006).

Entre as características do fluxo da água está o coeficiente de permeabilidade ou condutividade hidráulica, que corresponde à taxa de infiltração do fluido em meio poroso (MICHELAN, 2010). A condutividade hidráulica de um determinado solo sofre influência de fatores como a qualidade da água utilizada: viscosidade da água, textura, granulometria e consistência do solo, presença de ar nos poros do solo, efeito da ação de microrganismos, entre outros (BOUWER, 2002).

Segundo Michelin (2010), a granulometria do solo interfere na sua capacidade de absorver água para o seu interior. Quanto maior o tamanho dos grãos, maior o tamanho dos poros e menor força capilar e tensão superficial e conseqüentemente a facilidade da passagem de água pelo solo (MONDARDO, 2009).

A determinação das características do solo e análise do material que compõe o aquífero são realizadas através de ensaios em campo ou laboratoriais, denominados ensaios de permeabilidade ou condutividade hidráulica e ensaio da composição granulométrica.

2.2.1 Condutividade hidráulica

No fenômeno da percolação da água através do solo, a condutividade hidráulica (K) é o coeficiente de proporcionalidade entre a velocidade do fluxo e o gradiente hidráulico. É a propriedade de um solo poroso que descreve sua capacidade em transmitir água. Quando o solo está saturado, ela é denominada condutividade hidráulica saturada (CAUDURO E DORFMAN, 1986). A condutividade hidráulica é uma função do arranjo poroso do solo, variando de solo para solo e, para um mesmo solo, com a sua porosidade e grau de compactação. Assim, em um dado perfil a condutividade hidráulica pode variar nos diferentes horizontes do solo (SANTOS, 2009). Desta forma, o autor supracitado, adaptou tabela de classificação de condutividade hidráulica segundo Cauduro e Dorfman (1986) e de Oosterbaan e Nijland (1994) de acordo com a caracterização granulométrica do solo, como mostrado na Figura 1. As características granulométricas do solo concedem influência na determinação dos valores de K_{sat} , assim as argilas permitem menor fluxo de água devido seu menor índice de vazios e as areias são mais permeáveis.

Figura 1-Classes de condutividade hidráulica saturada de acordo com a característica granulométrica

Classe	Condutividade hidráulica saturada		Exemplo de textura
	(mm/h)	(m/d)	
Muito lenta	< 1	< 0,03	Argila densa
Lenta	1 a 5	0,03 a 0,1	Argila
Moderadamente lenta	5 a 20	0,1 a 0,5	Argila siltosa
Moderada	20 a 60	0,5 a 1,5	Silte
Moderadamente rápida	60 a 130	1,5 a 3	Areia fina
Rápida	130 a 250	3 a 6	Areia média
Muito rápida	> 250	> 6	Areia grossa

FONTE: Santos (2009)

A condutividade hidráulica (K) devido a sua importância em informar sobre a capacidade de transporte de água, solutos e substâncias químicas no solo deve ser bem caracterizada, pois de um modo geral, seu valor é usado nos cálculos de fluxos no solo (MESQUITA E MORAES, 2004). A condutividade hidráulica é calculada por equações que descrevem a relação existente entre ela, as condições de fluxo e a descarga (CAURDURO E DORFMAN, 1986).

De acordo com Cauduro e Dorfman (1986), a condutividade hidráulica (K) pode ser determinada tanto em campo quanto em

laboratório com amostras de solos sem modificações. Os autores indicam que as determinações de K no campo, o volume de solo afetado pela medida é maior do que nas determinações em laboratório, logo, os resultados obtidos em campo são mais exatos. O método de ensaio em campo impõe-se certas condições ao fluxo da água através de um volume de solo e mede-se a descarga ou densidade de fluxo (SANTOS, 2009).

2.3 INTERAÇÃO ENTRE CORPO HÍDRICO E ÁGUAS SUPERFICIAIS E SUBTERRÂNEAS

Para melhor compreensão das interações entre o corpo hídrico, as águas subterrâneas e de superfície é necessário conhecer suas interligações, visto que a taxa de recarga e a qualidade da água subterrânea dependem diretamente dos mananciais de superfície.

Conforme indicado por Bouwer et al. (2002) a interação dos corpos hídricos com a água subterrânea é governada pela posição em que a água superficial se encontra em relação ao sistema de fluxo de água subterrânea, pelo clima da região, condições geológicas das suas margens e a perspectiva geomorfológica, ou seja, se o fluxo é direcionado do corpo d'água superficial para o subsolo ou o contrário.

Distintas condições climatológicas como a pluviometria podem influenciar o processo de interação entre o corpo hídrico e as águas de superfície e subterrânea. Desta forma, Paiva (2009) afirma que a intensidade com que acontece o evento de precipitação, pode ter como consequência, o acréscimo considerável no escoamento superficial e subsuperficial, quando ocorrer um excesso da taxa de infiltração do solo ou o nível do lençol freático alcançar cotas bem superiores ao do manancial.

No interior do meio subterrâneo, acontecem diversos processos de atenuação natural atuantes para a degradação de contaminantes no ambiente filtrante. Desta forma, cada processo é responsável por eliminar um poluente distinto e estes processos ocorrem também em zonas distintas. Os processos de biodegradação são normalmente mais importantes para os poluentes orgânicos, já a sorção é mais importante para retardo de metais e outras substâncias não degradáveis. Os efeitos biológicos existentes estão atrelados à particularidade do meio ambiente na zona hiporreica, onde não há luz, com uma fauna característica de microorganismos, tais como fungos, bactérias e protozoários, que atuam na biodegradação. A zona hiporreica pode atuar como uma fonte de

matéria orgânica dissolvida, dependendo do volume e direção do fluxo, concentrações de carbono orgânico e atividade biótica (PAIVA, 2009).

As zonas ripárias são ecossistemas compreendidos entre o ambiente terrestre e o aquático. Wenger (1999) relata os principais contaminantes que são retidos ou removidos na zona ripária, tais como o fósforo, nitrogênio e outros nutrientes que possam causar a eutrofização dos ecossistemas aquáticos, sedimentos oriundos do escoamento superficial, pesticidas. Para o autor citado, esta zona apresenta outras funções como a manutenção de habitat para peixes e outros organismos aquáticos e o armazenamento as águas dos períodos de cheias.

2.4 PARÂMETROS DA QUALIDADE DA ÁGUA

Von Sperling (2005) indica que os corpos d'água possuem componentes que alteram o seu grau de pureza, estes podem ser retratados de acordo com suas características físicas, químicas e biológicas. Tais características se manifestam na forma de parâmetros de qualidade da água e são expressas como:

- Características físicas: as impurezas enfocadas sob a perspectiva física estão relacionadas, majoritariamente, aos sólidos presentes na água, sendo que estes sólidos podem ser em suspensão, coloidais ou dissolvidos, dependendo do tamanho;
- Características químicas: as características químicas de uma água podem ser explanadas por meio de uma das duas classificações: matéria orgânica ou inorgânica;
- Características biológicas: os seres presentes na água podem ser vivos ou mortos. Dentre os seres vivos, há os pertencentes aos reinos animal e vegetal, além dos protistas (VON SPERLING, 2005).

As características físicas, químicas e biológicas das águas naturais transcrevem processos ocorrentes no corpo hídrico e na bacia hidrográfica, como consequência das capacidades de dissolução de uma ampla gama de substâncias e de transporte pelo escoamento superficial e subterrâneo (LIBÂNIO, 2008). Para o controle da qualidade da água anterior, nas águas superficiais originalmente, e posterior, na produção de água potável, alguns parâmetros precisam ser analisados e acompanhados durante o processo de tratamento dos contaminantes físicos, químicos e biológicos (RAY et al., 2003).

2.4.1 Parâmetros físicos, químicos e biológicos

Uma das principais características físicas observadas em um corpo hídrico é o material em suspensão nele contido. A medição deste material é manifestada por meio do parâmetro físico da água denominado turbidez. Assim, conforme indica Rocha (2007), a turbidez é medida por meio da capacidade em que a luz consegue penetrar no interior do rio e, quanto maior esta penetração, menor é a turbidez. A cor presente nas águas é uma outra característica física proveniente de materiais em suspensão. Como corrobora Barbosa (2015), a presença de materiais coloidais confere às águas a manifestação de cor.

Uma terceira característica física de igual influência para as questões ambientais no ambiente lântico é a temperatura. Este parâmetro afeta um importante número de outros parâmetros de qualidade da água. Os gases solúveis diminuem enquanto que a solubilidade mineral cresce com o aumento da temperatura. Taxas de respiração e crescimento de organismos aquáticos têm na temperatura um importante parâmetro de controle (ROCHA, 2007). De acordo com o autor supracitado, os lagos que apresentam grande profundidade são caracterizados por uma variação de temperatura no sentido vertical, tornando suas águas estratificadas. O desenvolvimento deste processo é determinante na qualidade da água deste corpo hídrico. Assim, a distribuição de temperatura ao longo da profundidade de um reservatório ou de um lago natural pode ser determinante na escolha do método de análise para estudar a qualidade de suas águas (ROCHA, 2007).

A condutividade elétrica, outro parâmetro a ser considerado, uma vez que, conforme indica Libânio (2008), constitui-se um importante indicador de eventual lançamento de efluentes por se relacionar à concentração de sólidos dissolvidos. O autor afirma que condutividade elétrica é expressa por $\mu\text{S}/\text{cm}$ e em águas naturais os valores comuns são inferiores a $100 \mu\text{S}/\text{cm}$, no entanto, em corpos d'água que recebem elevadas cargas de efluentes de diferentes tipos, estes valores podem chegar a $1000 \mu\text{S}/\text{cm}$.

Os sólidos totais dissolvidos (STD) compreendem os sais inorgânicos e pequenas quantidades de matéria orgânica dissolvida na água. Os STD originam-se de fontes naturais, esgoto, escoamento superficial urbano e despejos industriais (PAIVA, 2009).

No que diz respeito aos parâmetros químicos da água, estes apresentam grande importância para os ambientes lânticos, visto que os nutrientes que são representados por estes parâmetros, desempenham um papel fundamental, pois são responsáveis pelos processos de

eutrofização que ocorrem no corpo hídrico. Um dos principais parâmetros químicos da qualidade da água é o oxigênio dissolvido. Segundo as óticas de Rocha (2007) o oxigênio dissolvido é um dos parâmetros mais utilizado para determinar a qualidade da água de qualquer corpo d'água, pois a presença desta substância dissolvida na água é essencial para o ecossistema aquático.

Outro parâmetro de igual importância é o pH, os seus valores podem indicar formas de poluição químicas contidas na água. No curso de um corpo hídrico, a modificação do pH resulta de diversos fatores naturais, como clima, geologia e vegetação, podendo assim ser resultado de interferências antropogênicas (TUNDISI & TUNDISI, 2008). As águas naturais de superfície apresentam pH variando de 6,0 a 8,5, que representa um intervalo adequado à manutenção da vida aquática (LIBÂNIO, 2008).

Em relação aos parâmetros biológicos, a água é afetada principalmente pela formação de microrganismos patogênicos que podem lhe conferir gosto e odor, além da transmissão de diversas doenças através desta água. Nos ambientes lênticos, estes microrganismos se manifestam por meio do lançamento excessivo de carga orgânica e nutrientes que servem como alimento para seu desenvolvimento. Para analisar a qualidade da água de um corpo hídrico, Rocha (2007) afirma que o principal indicador da presença de bactérias é o grupo coliformes total, que tem sua origem nas fezes humanas, desta forma, o grupo coliforme termotolerante é o indicador de organismos que provêm do organismo de animais de sangue quente e sua concentração é utilizada para avaliação dos aspectos sanitários de qualidade da água.

2.5 REMOÇÃO DE CONTAMINANTES NO PROCESSO DE FILTRAÇÃO EM SOLO NATURAL COMO MEIO FILTRANTE

As águas superficiais são frequentemente contaminadas por microrganismos patogênicos. Esta contaminação é ocasionada principalmente pela descarga de esgoto e escoamento de efluentes de solo agrícola (SENS et al, 2006). Michelan (2010) afirma que os contaminantes biológicos encontrados na água superficial são, principalmente, protozoários, bactérias e vírus. No entanto, os coliformes termotolerantes e totais e, em alguns casos, os esporos de bactérias aeróbias e anaeróbias também são monitorados.

Segundo Schmidt (2003) a remoção de contaminantes biológicos por meio do seu percurso pelo solo, é considerado um sistema eficiente, onde acontece a inativação dos patógenos através da combinação de processos de adsorção com o material do aquífero. De acordo com o autor supracitado, o processo de remoção é mais eficiente quando a velocidade da água subterrânea é lenta e quando a água está em contato com a superfície do grão. Nessas circunstâncias, a rota de fluxo é tortuosa, fornecendo uma ampla oportunidade para os organismos entrarem em contato com os contaminantes e com o material sedimentar, que favorecem os mecanismos de adsorção, degradação e interceptação das partículas presentes na água (SENS *et al.*, 2009). Sob condições favoráveis, pode-se alcançar até 8 logs de remoção de vírus ao longo de uma distância de 30 m em aproximadamente 25 dias.

Durante a passagem pelo solo, os microrganismos podem ser removidos da fase aquosa por filtração, biodegradação, inativação, aderência aos grãos do aquífero (adsorção em combinação com a inativação), sedimentação e por diluição resultante da mistura com águas subterrâneas (SCHIJVEN *et al.*, 2002). Desta forma, a eficiência da filtração depende da fixação dos microrganismos ao solo e, na sequência, da sua inativação para a efetiva remoção destes da água superficial que se infiltrou no subsolo (MICHELAN, 2010).

Dash *et al.* (2010) em estudo da técnica filtração em margem no rio Haridwar, na Índia, obtiveram a remoção de 2,5 log e 3,5 de coliformes totais e termotolerantes, respectivamente, para o período de monção. Para o período de não monção, obteve-se 4,7 log e 4,4 log de remoção de coliformes totais e termotolerantes, respectivamente. Estes valores representam 99,9% de remoção para ambos os parâmetros. “Log de remoção” é um termo de abreviação para remoção, que se refere ao processo físico-químico de tratamento de água para remover ou inativar os microrganismos, assim 1 log de remoção equivale a redução de 90% do organismo alvo (RAY *et al.*, 2003). Em estudos desenvolvidos na Lagoa do Peri, Rabelo (2006) obteve como resultados a remoção de até 98,9% de fitoplâncton e de até 99,2% de cianobactérias, por meio da simulação da técnica de filtração em margem em colunas filtrantes.

De acordo com Ray *et al.* (2003) a temperatura e a turbidez são os contaminantes físicos de maior preocupação. As variações de temperatura podem influenciar no processo de filtração e ocorrem devido a diversos fatores dentre eles fatores hidrogeológicos e distância do rio ao poço.

Dash *et al.* (2010) no mesmo estudo citado anteriormente, observaram 2,5 log de remoção da turbidez, o que corresponde a 95% de

remoção. Sens et al. (2006) em pesquisas desenvolvidas na Lagoa do Peri, por meio da construção de um sistema piloto para a simulação da filtração em margem, foi obtido, após monitoramento de cinco meses, remoção efetiva de 3 a 95 % de turbidez e 80 a 100% de cor aparente. No mesmo local, Rabelo (2006) observou remoção de 84,9% de turbidez.

2.6 SIMILARIDADE DA FILTRAÇÃO EM SOLO NATURAL COM A FILTRAÇÃO EM MARGEM (FM) E COM A FILTRAÇÃO LENTA (FL)

O processo de filtração em solo natural como meio filtrante têm suas similaridades com outros tipos de filtração, dentre elas a filtração em margem (FM) e a filtração lenta, devido a algumas características em comum, tais como a velocidade de filtração, remoção de partículas, distância entre o aquífero e o meio filtrante.

No processo de filtração em margem (FM) o meio filtrante é o próprio material sedimentar das margens do manancial superficial e do aquífero (RAY et al., 2003). Para isto, constroem-se poços de captação nas margens do manancial, criando artificialmente uma diferença de nível entre o manancial e o lençol freático, induzindo o escoamento em direção ao poço. Os possíveis contaminantes presentes na água superficial são removidos nesse percurso (SENS et al, 2006). De acordo com o autor supracitado no processo de filtração em margem, quanto menor for a velocidade com que a água passa pelo material filtrante mais eficiente será a remoção dos contaminantes presentes na água.

Durante o processo de infiltração induzida, a água entra em contato com o subsolo, desta forma ocorre a adsorção de compostos orgânicos neste. O grau de adsorção varia dependendo da natureza do composto e do tipo de material sólido presente no subsolo. De modo geral, o contato da água infiltrada com grandes áreas e uma distância grande entre o poço e o manancial, aumenta a adsorção de substâncias (WORCH et al, 2002).

A filtração lenta é uma tecnologia para a potabilização de água utilizada há séculos e ainda considerada eficiente. Em sistemas desse tipo, a água é introduzida no filtro com baixas taxas de filtração (entre 3 e 12 m³/m².d), o que permite a remoção de patógenos principalmente por meio da atividade biológica (SOUZA, 2015).

Na filtração em margem, a velocidade da infiltração em várias interfaces, em relação ao rio/ aquífero, depende da posição do poço coletor (SENS et al. (2006). Sens et al. (2006) apud Mikels (1992)

estimaram que a velocidade média de infiltração para um poço coletor de pequena capacidade em Kalama, Washington, era de $3,7 \times 10^{-4}$ m/d, que é substancialmente mais baixo do que as taxas mencionadas para a filtração lenta.

O processo de filtração em margem tem algumas similaridades se comparada a filtração lenta. A formação da camada biológica similar ao *schmutzdecke* é formada na interface manancial/ aquífero, especialmente quando a velocidade de escoamento do rio é baixa, e esta é “levada” devido a variação de vazão no rio (SOARES, 2009). Este tratamento depende das atividades microbianas e das transformações químicas presentes nas camadas do meio filtrante, que vem a colmatá-lo. As integrações biogeoquímicas é que sustentam a qualidade do meio filtrante o que depende da mineralogia do aquífero, das concentrações presentes do oxigênio, do nitrogênio presente na superfície da água, da matéria orgânica e do uso do solo no entorno do manancial (Hiscock & Grischek, 2002).

3. MATERIAIS E MÉTODOS

3.1 CONSIDERAÇÕES GERAIS

Os estudos experimentais foram realizados no Laboratório de Potabilização de Água (LAPOÁ) e no Laboratório Integrado do Meio Ambiente (LIMA), ambos situados no Centro Tecnológico (CTC) pertencentes à Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Trindade.

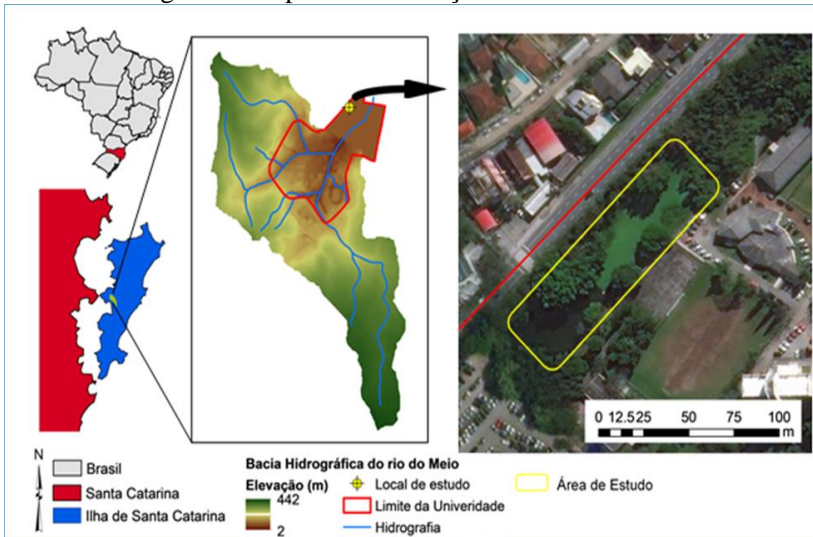
Para os estudos sobre filtração em solo natural como meio filtrante, foi construído uma estrutura de filtração em escala real na margem do Lago do Hospital Universitário (HU), visando avaliar o potencial de recuperação de corpos d'água. Para a simulação das características deste processo, bem como a obtenção de parâmetros de projeto que representam ambos os sistemas, foi montado um sistema de colunas filtrantes em escala de bancada no laboratório LAPOÁ.

As análises do processo de filtração da estrutura em escala real, tiveram início em 18 de outubro de 2018 e finalização em 14 de dezembro de 2018. Durante este período, uma série de contratempos ocorreram, dentre eles, pode-se mencionar a interrupção do funcionamento da bomba que faz o recalque da água do lago para o sistema. Assim, os resultados obtidos podem sofrer algum tipo de alteração devido a estes fatores.

3.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo popularmente conhecido como Lago do HU, possui aproximadamente 0,0252 km², localizada entre as coordenadas 27° 25'44 S e 48° 31' 03 W, está inserida na Bacia do Rio do Meio, a qual abrange o Campus da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), como indicado na Figura 2. Situa-se próximo às dependências do Hospital Universitário, em uma região cercada por intensa urbanização. Devido a quantidade de biodiversidade no local e também por apresentar ligações diretas com o manguezal do Itacorubi, o estudo da qualidade da água do Lago do HU, para sua recuperação, possui grande importância para a manutenção de outros ecossistemas.

Figura 2- Mapa de Localização da área de estudo



Fonte: Autor (2018).

A classificação do solo, bem como suas características físicas e hidráulicas foram realizadas por meio de ensaios que serão descritos nos tópicos 3.2.1 e 3.2.2.

3.2.1 Ensaio de Caracterização Granulométrica

Para realização do ensaio granulométrico do solo, a amostra foi preparada em laboratório conforme recomendações da NBR 6457/ 86 e análise granulométrica do solo foi realizada com embasamento na NBR 7181/84. O solo utilizado para a realização do ensaio foi retirado durante a implantação dos piezômetros de monitoramento, a qual é detalhada no tópico 3.4.2. Após a coleta de amostra do solo, foi separado a quantidade representativa de 1Kg e levado para a estufa a uma temperatura de 105°C durante um período de 24h, para retirar a umidade da amostra. Posteriormente a este processo, adicionou-se a amostra no conjunto de peneiras sobrepostas, da malha mais grossa para mais fina, e na mesa vibratória para a segregação granulométrica.

A caracterização do solo pela sua granulometria se deu pela classificação da NBR 6502/95, conforme indicado na Tabela 1.

Tabela 1- Classificação granulométrica indicado pela NBR 6502/95

Partícula	Fração
< 0,002	Argila
0,002 – 0,06	Silte
0,06 – 0,20	Areia fina
0,20 – 0,60	Areia média
0,60 – 2,0	Areia grossa
2,0 – 60,0	Pedregulho

FONTE: (Adaptado NBR 6502/95)

A partir do ensaio granulométrico, obtêm-se a curva de caracterização granulométrica que representa o solo analisado. Com esta curva, pode-se obter outros parâmetros deste solo, como o coeficiente de uniformidade do solo (C_u), o diâmetro efetivo do solo (D_{10}) e a porosidade efetiva.

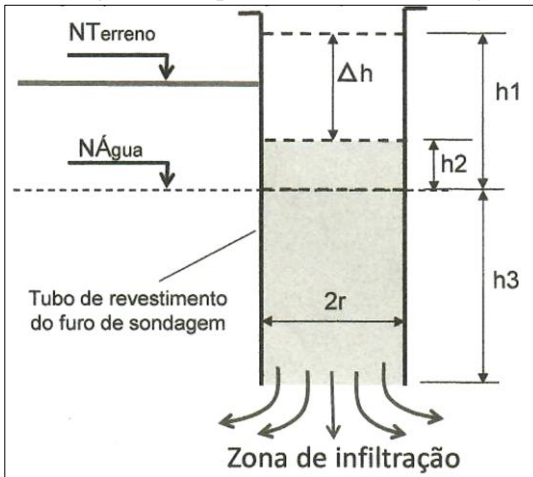
Neste trabalho, a porosidade efetiva é um parâmetro importante para a determinação do tempo de detenção do sistema piloto. Na curva de granulometria é traçado a porcentagem com diâmetro de 90% passantes nas peneiras (D_{90}). Encontrado este valor, utiliza-o no ábaco proposto por Santos (1977), ANEXO A, até o encontro na curva de porosidade efetiva. Desta forma, encontra-se a porcentagem de volume disponível a ser ocupado, ou seja, a porosidade efetiva.

3.2.2 Ensaio de Condutividade Hidráulica

Neste trabalho se optou por utilizar o ensaio realizado em campo, pelo método do piezômetro (ensaio de carga variável), devido a maior representatividade nos resultados.

O método consiste em mensurar o tempo necessário para que infiltre no solo um determinado volume de água. Desta forma, preenche-se até a borda do piezômetro com água, e então é feita a medição da velocidade em que acontece o rebaixamento do nível de água no seu interior, verifica-se o tempo necessário para a carga hidráulica sair de um nível denominado h_1 para h_2 . Na Figura 3 é representado o esquema definido por Caputo (1996), que serviu como embasamento para a realização do ensaio.

Figura 3- Esquema do ensaio de carga variável



Fonte: (CAPUTO, 1996).

Para obter o valor do coeficiente de condutividade hidráulica (K), utilizou-se a equação:

$$K = \frac{r1}{4.h} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad (1)$$

Onde:

K : coeficiente de permeabilidade (cm/s)

$r1$: raio do piezômetro (cm)

h : altura de água acima do nível estático do piezômetro (cm);

Δh : diferença entre altura máxima $h1$ e o nível estático $h2$ da água;

Δt : diferença de tempo, relativo ao Δh .

3.2.2.1 Realização do Ensaio

Inicialmente, para a realização do ensaio de condutividade hidráulica, foi escolhido, arbitrariamente, o piezômetro 4 (P4). Para obter o coeficiente de condutividade hidráulica (K), utilizou-se o ensaio de campo indicado por Caputo (1996).

Preencheu-se o piezômetro com água até a sua borda e foi anotado a primeira medida, $h1$. Saturou-se o piezômetro durante o período de 10 minutos, visto que esta é a recomendação para ensaios

acima do nível de água (NA). Desta forma, para este ensaio, manteve-se o nível de água constante por 10 minutos e se interrompeu o fornecimento de água, tornando-se este instante como tempo zero. Assim foi acompanhado o rebaixamento do nível de água em intervalos curtos de 5s, 15s, 30s, 1 min e posteriormente mais longos de 3 min, 4 min, 5 min, 10 min, 15min, 20 min, 25 min e 30 min. A finalização do ensaio se dá quando o rebaixamento atingir 20% do valor da carga inicial aplicada ou após 30 minutos de ensaio.

Para a realização do ensaio e mensuração do rebaixamento do nível de água, foi utilizado um indicador de nível de água sonoro, cujo modelo é EPP-10/6, apresentado na Figura 4. Este equipamento é composto por uma fita graduada e uma sonda na sua extremidade. Possui dois eletrodos com intervalo de isolamento entre eles. Quando a sonda entra em contato com a água, é emitido um sinal sonoro e de luz. O nível da água é determinado diretamente pela observação da leitura da fita que coincide com a parte superior do piezômetro.

Figura 4- Indicador de nível de água utilizado no ensaio.



Fonte: Autor (2018).

3.3 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

O Lago do HU é considerado um ambiente lântico artificial. Forma um reservatório de água doce com volume estimado de 2.150 m³, com profundidade de aproximadamente 1,5 m e dimensões médias de 27,20 m x 52,76 m.

As coletas para a caracterização da água de estudo e das análises dos parâmetros de qualidade da água, foram realizadas em dois pontos específicos. Na entrada do sistema, junto a bomba de recalque, coletou-se a água do lago, e no piezômetro 10 (P10), escolhido por se localizar próximo do lago, fez-se a coleta da água subterrânea, após o processo de filtração no solo natural.

3.3.1 Ensaios preliminares (parâmetros de qualidade da água)

O monitoramento da qualidade da água do sistema em escala real foi realizado semanalmente, seguindo o protocolo de análises da UFSC, que segue recomendações do Standard Methods (2012), em termos de todos os parâmetros apresentados na tabela 2. Nesta, apresenta-se também, os métodos e equipamentos utilizados para o monitoramento da qualidade da água. Foram realizadas 7 coletas e 7 análises.

Os resultados obtidos destas análises, foram avaliados, e o corpo hídrico foi enquadrado de acordo com a Resolução n° 357/2005 do Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA) e suas modificações nas Resoluções n° 410/2009 e n°430/2011, do mesmo Conselho. A Resolução define que a qualidade da água de um corpo hídrico, faz referência ao tipo de uso ao qual é destinada. Assim, estipula padrões de qualidade da água aceitáveis para cada tipo de uso.

Tabela 2- Tecnologias e equipamentos empregados

Parâmetro	Método	Equipamento
Cor	Espectrofotométrico	<ul style="list-style-type: none"> • Espectrofotômetro HACH DR 2800
Turbidez	Nefelométrico	<ul style="list-style-type: none"> • Turbidímetro HACH 2100N
Coliformes	Substrato cromogênito definido	<ul style="list-style-type: none"> • Substrato ONPG MUG COLILERT • Cartelas Quanti-tray/2000 • Molde de borracha Quanti-tray/2000 • Selador Quanti-tray • Lâmpada UV • Estufa • Autoclave
Condutividade		<ul style="list-style-type: none"> • Medidor multiparâmetros HACH HQ40D • Sonda Condutividade
Temperatura		<ul style="list-style-type: none"> • Medidor multiparâmetros HACH HQ40D • Sonda Condutividade
pH		<ul style="list-style-type: none"> • Medidor multiparâmetros HACH HQ40D • Sonda pH
OD	Deteção por fluorescência	<ul style="list-style-type: none"> • Medidor multiparâmetros HACH HQ40D

Fonte: Autor (2018)

Para a determinação dos sólidos dissolvidos totais, utilizou-se a relação empírica proposta por Dan Eddy (1991), que relaciona a

condutividade elétrica com a concentração de sólidos dissolvidos totais e estima um parâmetro em função do outro.

$$\text{SDT} = 0,64C \quad (2)$$

Onde:

SDT = Sólidos dissolvidos totais (mg/L)

C = condutividade ($\mu\text{S}/\text{cm}$)

3.4 ESTRUTURA EM ESCALA REAL

A estrutura em escala real é constituída de uma vala de infiltração com 1,6 m de profundidade e coberta por 0,6 m de solo natural. Apresenta 5 m de comprimento e uma seção transversal quadrada de 1,0 m x 1,0 m, e como meio filtrante, foi preenchido com brita nº 4, envolvido de manta bidim, para uma vazão inicial de operação estimada de 150 L/d. A área de filtração considerada do sistema é a face esquerda e a face inferior da vala, têm-se assim 10 m², obtém-se uma taxa de infiltração de 0,015 m³/m²d.

A distribuição da água do lago para a vala de infiltração é feita por um sistema de alimentação composto por duas tubulações, uma de dreno de PVC flexível e corrugado com 100mm, cuja finalidade é a proteção da tubulação interna de PVC rígido de 32 mm. Esta tubulação interna se dispõe no meio do material filtrante a 0,7 m do fundo da vala, com recobrimento de 0,30 m. Nesta tubulação, a cada 0,20 m, foi feito furos com 8 mm de diâmetro com a finalidade de fornecer água de maneira homogênea para todo o sistema. A entrada da distribuição fica em um ponto mediano da vala filtrante, ou seja, na metade da tubulação interna tendo 2,5 m para cada lado. Na Figura 5 é apresentada a sequência da construção da vala de infiltração.

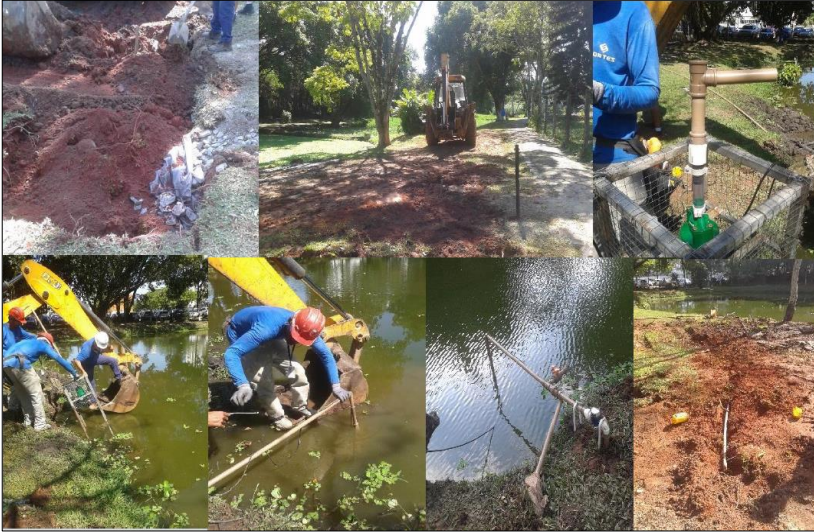
Figura 5- Construção da vala de infiltração



Fonte: Autor (2018).

O recalque da água do lago é executado por um conjunto moto-bomba, emergido no lago, fixado a uma estrutura metálica envolvida por uma manta, cuja finalidade é a proteção do sistema de filtração. A bomba apresenta potência nominal de 1 CV, e o conjunto moto bomba foi acoplado a um mangote flexível de 32 mm, com adaptador no tubo, registro de gaveta e um extravasor para ajuste da vazão, um tê 90° com saída lateral soldável e um registro secundário para coleta de amostra antes da entrada na vala de infiltração. Todas as conexões e tubulações são de 32 mm de diâmetro, fabricados em PVC rígido. Um hidrômetro de baixa vazão antecede a tubulação de recalque da água do lago, que é dirigida pelo sistema até o meio da vala de infiltração. Na Figura 6 é apresentada a construção do sistema de recalque da água do lago.

Figura 6- Construção do sistema de recalque da água do lago

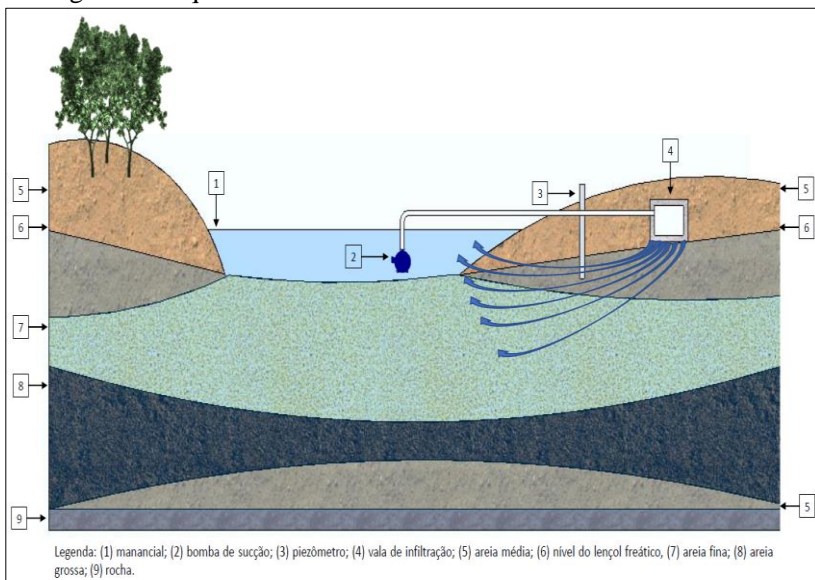


Fonte: Autor (2018).

3.4.1 Funcionamento do sistema

O processo de operação e desempenho são considerados relativamente simples. A água do lago é recalçada por meio de uma bomba submersível que trabalha em constante funcionamento e dirigida para a vala de infiltração, onde ocorre o primeiro tratamento em regime anaeróbio. Após este caminho, a água percola pelo solo e nele é filtrada. A taxa de fluxo gerada acompanha a taxa de infiltração do solo. Neste processo ocorre também a atuação de microrganismos, que garantem um novo tratamento microbiológico, e assim a água segue para o lençol freático. Com a ação da gravidade, o fluxo é contínuo e a água retorna ao corpo hídrico, dando início a um novo ciclo. Na Figura 7 é apresentado o esquema de funcionamento da estrutura em escala real.

Figura 7- Esquema do funcionamento da estrutura em escala real



Fonte: Autor (2018).

3.4.2 Piezômetros

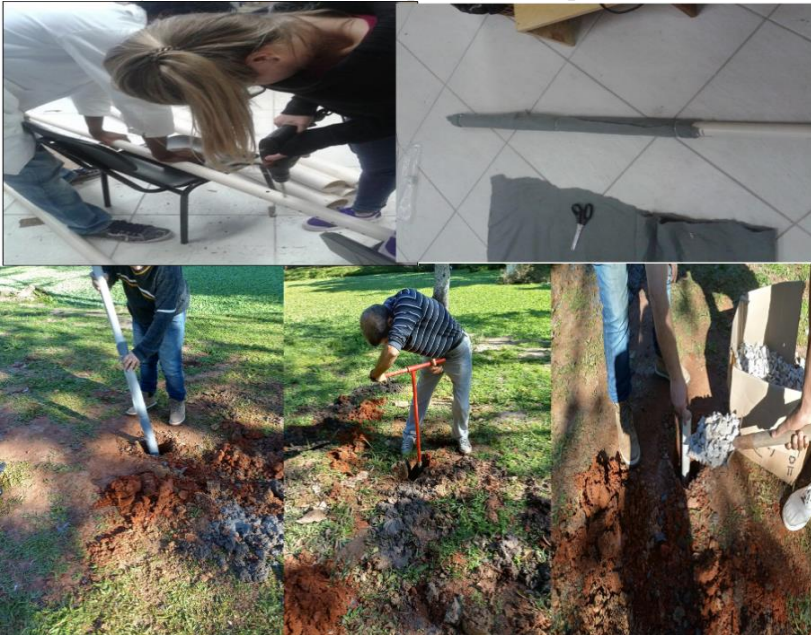
Foram implantados 12 piezômetros, localizados entre a vala de infiltração e o lago, organizados em fileiras paralelas e equidistantes 1,5 m entre si. Com o objetivo de realizar o monitoramento do nível de água do lençol freático, bem como identificar o fluxo do escoamento da água, e servir como ponto de coleta de amostra da água para as análises, após a sua passagem pela vala de infiltração.

A construção dos piezômetros foi feita com tubulações de PVC rígido de diâmetro 150 mm e comprimentos variáveis, respeitando a profundidade do lençol freático e a topografia do terreno. Deixou-se uma folga de 0,20 m acima do nível do solo, em cada piezômetro, para que fosse possível tampar com CAP soldável e removível. Na extremidade inferior dos piezômetros, foi feita perfurações de 8mm espaçados a cada 1 cm, ao longo de 1m. Foi envolvido com manta bidim e fixadas com braçadeiras, com a finalidade de proteção e evitar entupimentos com partículas de solo.

A introdução e construção dos pilotos foi realizada seguindo recomendações da NBR 15495-1/2007- Poços de monitoramento de

águas subterrâneas em aquíferos granulares. Escavou-se buracos com trado manual até alcançar o lençol freático em no mínimo 0,30 m. Introduziu-se os piezômetros nestes buracos, e em cada piezômetro foi adicionado o pré filtro, constituído de areia grossa e pedriscos. Para evitar a infiltração da água de chuva, melhorar o acabamento e fixação dos piezômetros, foi adicionado uma camada de argamassa com cimento e areia de 0,30 m. Na Figura 8 é apresentada a construção e implantação dos piezômetros.

Figura 8- Construção e implantação dos piezômetros



Fonte: Autor (2018).

A identificação da altura do lençol freático dentro dos piezômetros e também do fluxo de água após a entrada na vala de infiltração, foi obtido com o sistema em funcionamento, por meio de um equipamento indicador de nível de água sonoro, o mesmo utilizado no ensaio de condutividade hidráulica, descrito no tópico 3.2.2.1, tendo como referência um ponto pré-estabelecido junto ao passeio.

3.5 SISTEMA EM COLUNAS FILTRANTES - PILOTO

O sistema em colunas filtrantes, foi construído com o objetivo de obtenção de dados mais consistentes em condições possível de serem controladas em laboratório, possuindo características similares a estrutura real. Neste trabalho, serão utilizados apenas alguns parâmetros de projeto que são mais fáceis de serem mensurados por meio deste piloto.

A construção do sistema piloto de bancada para a simulação e efetivação do estudo, foi realizada no Laboratório de Potabilização de Água (LAPOÁ), no Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental (ENS), localizado no Centro Tecnológico (CTC), pertencente à Universidade Federal de Santa Catarina.

O sistema é composto por 4 (quatro) colunas filtrantes dispostas em série, construídas com tubulações de policloreto de vinila (PVC) de 150 mm cada, com anel de borracha e fechamento nas extremidades com um cap soldável de mesmo diâmetro, o qual serve para diminuir a influência da luminosidade. A primeira coluna possui 3,5 m, para que seja possível obter pressão necessária e o sistema opere afogado, com fluxo constante, proporcionado pela ação da gravidade. As demais colunas apresentam 2,20 m cada.

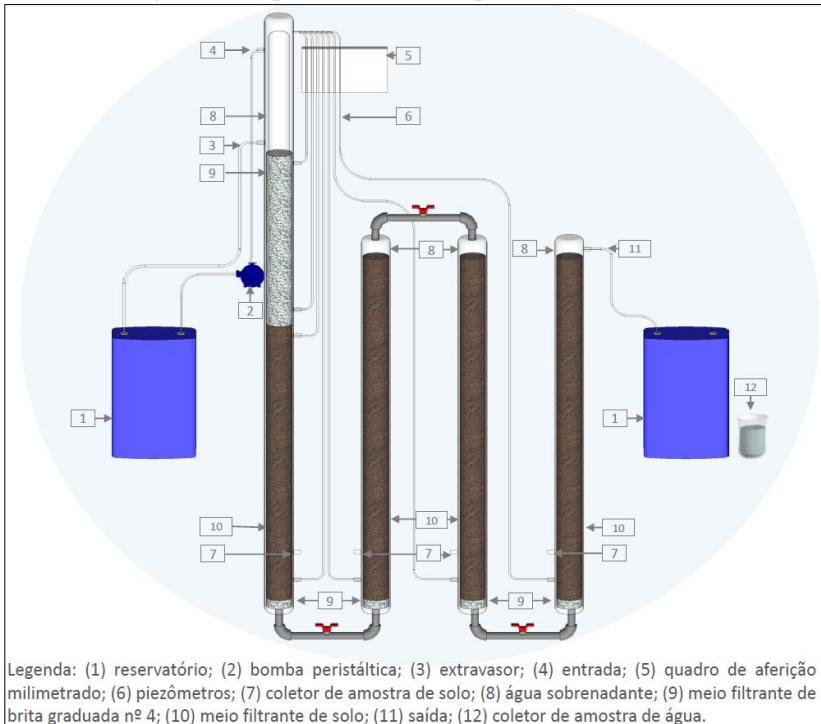
A alimentação do sistema se dá por meio de um reservatório com capacidade de 30 L, este é abastecido pela água bruta coletada do Lago do HU, e um segundo reservatório, de mesma capacidade, que atua como receptor da água após a sua passagem pelo sistema de filtração. A ligação entre as colunas foi feita com tubos de PVC de 32mm.

Para garantir que a água seja conduzida para todas as colunas, foi utilizado uma bomba peristáltica, modelo EX00504. Faz parte do sistema também, um extravasor, localizado a um nível de 0,05 m abaixo da entrada da C1 e conectado a uma mangueira para a recirculação e retorno da água excedente que não foi filtrada, ao reservatório de entrada. A água absorvida e filtrada percorre as colunas de filtração a uma taxa e fluxo constantes até o reservatório na saída do sistema. Na parte inferior foi implantado um painel graduado, que objetiva acompanhar os níveis de água do sistema por meio dos piezômetros que são fixados neste painel.

Ao longo das colunas se instalou piezômetros com o objetivo de medir a perda de carga, bem como monitorar as pressões e fluxo do meio líquido. Na primeira coluna (C1), foram dispostos 3 piezômetros, com alturas de 0,20 m, 1,5 m e 1,7 m. Nos outros piezômetros, C2, C3 e C4, há um piezômetro a uma altura de 0,20 m cada.

Todas as colunas possuem saídas vedadas com silicone na parte inferior, com material flexível, a uma altura de 0,50 m, para que seja possível a retirada de amostra líquida e solo e realizar o monitoramento e as análises destes materiais. Na Figura 9 e na Figura 10, são apresentados o esquema do sistema piloto e a imagem do mesmo, respectivamente.

Figura 9- Esquema do sistema piloto



Fonte: Autor (2018).

Figura 10- Sistema piloto



Fonte: Autor (2018)

O solo natural retirado para a implantação dos piezômetros no local de estudo, lago do HU, onde está montada a estrutura em escala real, foi utilizado como material filtrante que abastece o sistema piloto de bancada. Foi utilizado também, com a mesma finalidade, brita nº 4. Desta forma, o interior das colunas foi preenchido da forma apresentada, seguindo o sentido de baixo para cima:

- Coluna 1: camada suporte 0,05 m de brita, 1,60 m de solo natural e 1,0 de brita graduada número 4;
- Coluna 2: camada suporte 0,05 m de brita e 2,00 m de solo natural;
- Coluna 3: camada suporte 0,0 5m de brita e 2,00 m de solo natural;

- Coluna 4: camada suporte 0,05 m de brita e 1,80m de solo natural.

Como é possível observar, todas as colunas apresentam camada suporte de mesma espessura. Esta camada serve de base ao sedimento para que não haja seu transporte para as colunas e também para evitar entupimento do sistema.

A fim de se evitar a formação de caminhos preferenciais e também garantir carga hidráulica adequada para ocorrer infiltração, o material filtrante das colunas C2, C3 e C4 foram cobertos por uma lâmina de água de 0,10m, na parte superior das colunas.

3.5.1 Parâmetros de projeto do sistema em colunas filtrantes - piloto

Neste trabalho, utilizou-se os principais parâmetros de projeto do sistema em colunas filtrantes, o piloto, com o objetivo de garantir uma representação mais fiel das características da estrutura em escala real, visto que o sistema construído em laboratório possui parâmetros mais controlados. Estes parâmetros são identificados como a distância média da vala de infiltração até o reservatório, espessura das camadas filtrantes e o diâmetro do filtro. A operação do piloto teve início no final do mês de agosto de 2018, assim, embora seja necessário um período para aclimação do sistema, alguns parâmetros são possíveis de serem determinados.

As colunas foram alimentadas a uma vazão adotada de 50 mL/h, considerando que esta vazão é superior ao processo de absorção e filtração do meio filtrante, desta forma, garante-se que o sistema trabalhe afogado. Outros parâmetros foram obtidos através do ensaio granulométrico do meio filtrante, descritos no tópico 3.2.1, cuja curva granulométrica que o representa, encontra-se no Apêndice A. Estes parâmetros são: porosidade efetiva, diâmetro efetivo e coeficiente de uniformidade.

Para obter o tempo de detenção hidráulica das colunas filtrantes, utilizou-se a equação 3.

$$TD = \frac{V \times \text{Porosidade Efetiva}}{Q} \quad (3)$$

Onde:

TD = tempo de detenção (d)

V = Volume (m³)

$Q = \text{Vazão (m}^3/\text{d)}$.

Outro parâmetro relevante é a taxa de filtração do sistema, cuja determinação se dá por meio da equação 4.

$$Tf = \frac{Q}{A} \quad (4)$$

Onde:

$Tf = \text{taxa de filtração (m/d)}$

$Q = \text{Vazão (m}^3/\text{d)}$

$A = \text{Área (m}^2\text{)}$.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 CARACTERIZAÇÃO DO SOLO DO LOCAL DE ESTUDO

4.1.1 Análise Granulométrica

Inicialmente, durante a perfuração do solo para a instalação dos piezômetros, pensou-se que o solo seria classificado como argiloso, devido a uma camada de aproximadamente 0,80 m de cobertura de argila. No entanto, ao se aproximar do ponto de interesse, o lençol freático, constatou-se a predominância de areia. Os dados organizados na Tabela 3, e representados na Figura 11, apresentam a fração dominante de areia no local de estudo.

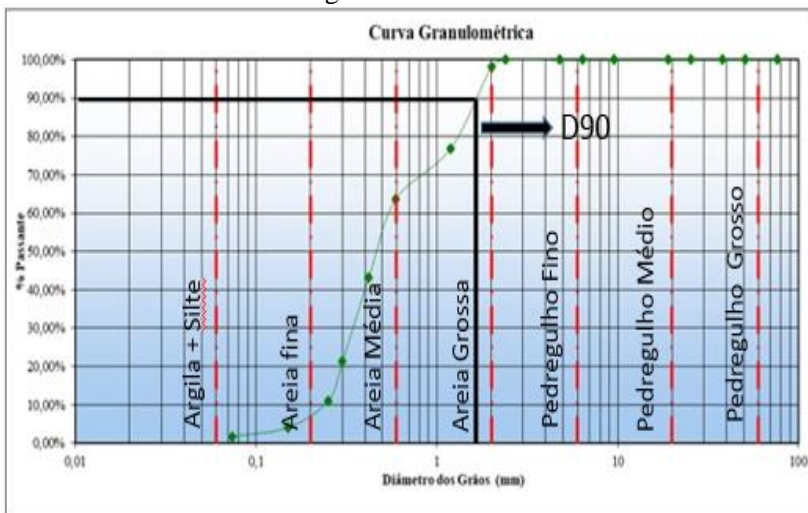
Tabela 3- Caracterização da amostra coletada para ensaio de granulometria

Frações Distribuídas	% Passante
Argila + Silte	1,76
Areia Fina	9,30
Areia Média	52,54
Areia Grossa	34,53
Pedregulho Fino	1,90
Pedregulho Médio	0,00
Pedregulho Grosso	0,00

Fonte: Autor (2018)

Desta forma, a caracterização do solo da área de estudo, por meio do ensaio granulométrico, mostrou predomínio de areia média e grossa, que somadas representam 87,07%. Este resultado é considerado satisfatório, visto que ao se verificar que o sedimento da margem é composto, em sua maioria, por areia de granulometria média a grossa, pode-se concluir que este local apresenta características ideais para a locação deste tipo de sistema de tratamento em margem com solo natural, devido a eficiência de filtração que a areia possui.

Figura 11- Curva granulométrica obtida a partir do ensaio granulométrico



Fonte: Autor (2018)

4.1.1.1 Porosidade Efetiva

A porosidade efetiva foi determinada a partir da curva granulométrica encontrada por meio da realização do ensaio granulométrico com o solo em estudo. Encontrado o valor do diâmetro de 90% (D90) passante nas peneiras, (Figura 11), utiliza-o no ábaco proposto por Santos (1977), (ANEXO A), e encontrou-se a porosidade efetiva de 38%. Este valor representa a porcentagem de espaços vazios pelo que a água percorre pelo meio filtrante.

4.1.2 Análise da Condutividade Hidráulica

O ensaio da condutividade hidráulica foi realizado no piezômetro 4 (P4), escolhido aleatoriamente. A tabela com as leituras das medições do rebaixamento do lençol freático, encontradas a partir do ensaio, para os intervalos de tempo determinados, bem como os cálculos para obtenção do resultado, encontra-se no APÊNDICE A.

Na Tabela 4 são apresentadas a caracterização do escoamento, de acordo com a condutividade hidráulica e o material do solo, propostos por Casagrande (1940).

Tabela 4- Caracterização do aquífero de acordo com a condutividade hidráulica e o material.

K (cm/s)	Material	Características do escoamento
1 a 100	Pedregulho limpo	
0,001 a 1	Areias limpas, misturas de areia limpa e pedregulho	Aquíferos bons
10^{-7} a 10^{-3}	Areias muito finas, siltes, misturas de areia, silte e argila; argilas estratificadas	Aquíferos medianos a pobres
10^{-9} a 10^{-7}	Argilas não Alteradas	Impermeáveis

Fonte: Adaptado CASAGRANDE (1940)

O resultado do coeficiente de condutividade hidráulica obtido no local de estudo foi de $K=6,43.10^{-4}$ cm/s. Segundo a caracterização do escoamento indicada por Casagrande (1940), este valor é satisfatório para o estudo proposto.

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

4.2.1 Observações gerais

A qualidade da água do Lago do HU e da água filtrada em solo natural foram avaliadas em função das análises físico-químicas e biológicas. Nos primeiros dias de instalação, a bomba que faz o recalque da água bruta para o sistema estava funcionando normalmente. Na terceira semana das análises, esta apresentou problemas, o que ocasionou a parada do seu funcionamento. No entanto, foi mantida as coletas no piezômetro P10, para ser possível a avaliação do comportamento do sistema durante este período e também a comparação dos resultados.

O CONAMA 357/2005, apresentado no ANEXO A, traz uma série de parâmetros para o enquadramento dos corpos hídricos doces e salinos. Para fins de estudos e realização deste trabalho, o

enquadramento do corpo hídrico se deu apenas a partir dos parâmetros estudados, apresentados no tópico 4.2.3.

4.2.2 Avaliação da qualidade da água após sua passagem pelo sistema de filtração

4.2.2.1 Influências da temperatura e pH

De acordo com Araújo et al. (2004) a remoção de diversos contaminantes presentes na água, pela ação microbiana presentes no solo natural, dependem diretamente da temperatura, umidade, pH, aeração e quantidade de matéria orgânica. Dentre estes fatores de influência, neste trabalho, foi monitorado a temperatura (Figura 12) e o pH (Figura 13), tanto da água bruta do Lago, quanto a do piezômetro 10 (P10), após a passagem da água pela vala de infiltração.

Figura 12- Comportamento da temperatura da água bruta e da água filtrada em solo natural

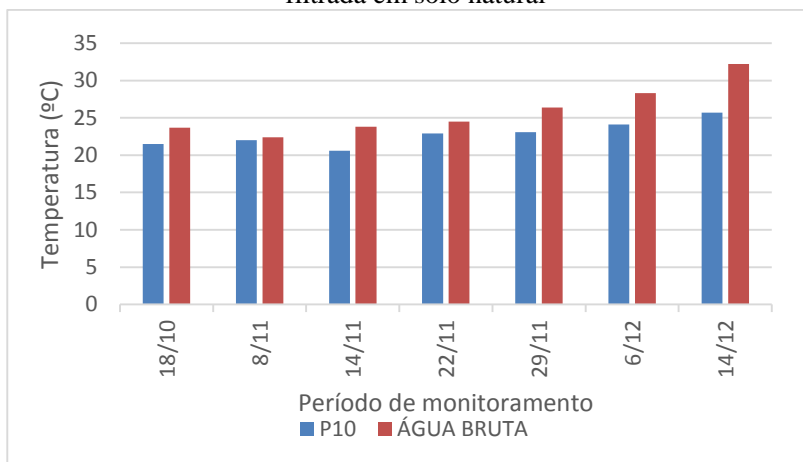
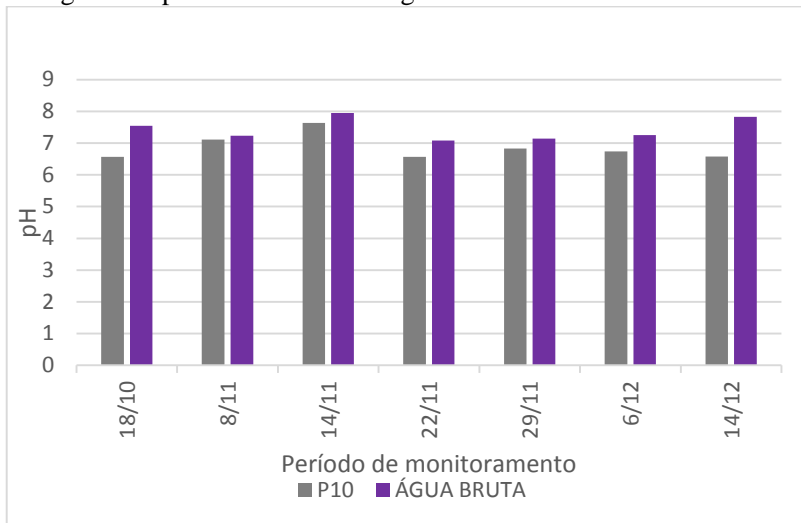


Figura 13- pH das amostras da água bruta e filtrada em solo natural



Acredita-se que a variação de temperatura da água bruta se deu devido a influência de fatores sazonais. Ao se aproximar do mês de dezembro, mês mais quente do ano, é notado um aumento significativo na temperatura da água do lago, este comportamento pode ser observado na Figura 12.

Em relação a água analisada do P10, após passar pelo processo de filtração em solo natural, Wang (2002) indica que a variação da temperatura desta água, com relação à água bruta, é influenciada pelo bombeamento, distância entre o lago e a vala de infiltração e condições hidrogeológicas. Neste contexto, é esperado que a temperatura da água bruta seja superior a temperatura da água filtrada em solo natural, conforme obtido no presente trabalho. Em geral, a temperatura da água bruta não apresentou uma diferença significativa em relação a água filtrada. No entanto, estes dados estão de acordo com o proposto por Wang (2002).

Em relação ao pH, este influencia no tempo de vida dos organismos microbianos que degradam os contaminantes presentes na água. Em ambientes com pH ácido, estes microrganismos reduzem seu tempo de persistência. Com pode ser observado na Figura 13 e na Tabela 5, o pH da água bruta e da água filtrada se mantiveram na faixa de valores considerados neutro, acima de 6, não influenciando na ausência ou persistência de microrganismos no ambiente.

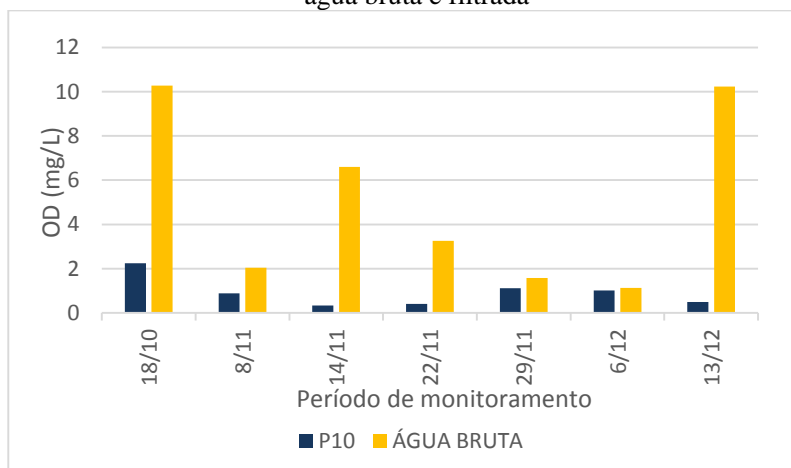
Tabela 5- Dados estatísticos obtidos de pH da água bruta e filtrada

Dados	Água Bruta	P10
Média	7,43	6,86
Mediana	7,25	6,74
Desvio Padrão	0,35	0,39
Coefficiente de variação	4,67	5,75
Nº de amostras	7	7

4.2.2.2 Oxigênio Dissolvido (OD mg/L)

Na Figura 14 é observada a concentração de oxigênio da água do Lago do HU e da água coletada no P10, após sua passagem pelo sistema de filtração em solo natural. É notada uma significativa variação nos valores de concentração de oxigênio, tanto na água bruta, quanto da água filtrada. Este parâmetro sofre influências sazonais diretas como ventos e chuva. Em períodos chuvosos, a concentração de oxigênio da água bruta apresentou elevação. Isto acontece pela presença das gotículas de chuva, que ao entrar em contato com a superfície do manancial, proporcionam aeração da mesma. Devido a estes fatores, justifica-se o oxigênio da água bruta apresentar maior concentração que o da água filtrada. Pode-se observar que em alguns períodos há um decaimento na concentração de oxigênio da água bruta, este, pode estar ligado ao lançamento de esgoto no Lago.

Figura 14- Dados obtidos da concentração de oxigênio dissolvido da água bruta e filtrada



Os estudos de Michelan (2010) apud Stuyzand *et al.* (2006), afirmam que as concentrações de oxigênio dissolvido na água filtrada em solo natural, tendem a diminuir em relação à água bruta, devido ao tempo de percurso entre a captação da água para a vala de infiltração. Para Kuehn e Mueller (2000), as baixas concentrações de oxigênio da água filtrada se deve à presença de compostos, como ferro e manganês, no solo/subsolo por onde a água foi filtrada. Neste trabalho os valores obtidos são organizados na Tabela 6.

Tabela 6- Dados estatísticos obtidos para concentração de oxigênio dissolvido

Dados	Água Bruta (mg/L)	P10 (mg/L)
Média	5,02	0,93
Mediana	3,26	0,88
Desvio Padrão	4,01	0,66
Coefficiente de variação	79,83	70,57
Nº de amostras	7	7

4.2.2.3 Cor aparente e Turbidez

Pode-se observar na Figura 15 e Tabela 7 , que em praticamente todo o período de monitoramento, houve uma diferença bem expressiva entre os valores obtidos de cor aparente da água bruta e da água filtrada. Esta diferença ocorreu também com os valores da turbidez, Figura 16 e Tabela 8.

Para Ray et al. (2003), o sistema de filtração em solo, necessita de um período de aclimação, para que o sistema comece a responder e obter melhoria de ambos os parâmetros. Desta forma, acredita-se que estas diferenças ocorram devido ao curto período do processo de aclimação do sistema. Nota-se que os dados obtidos, principalmente da água bruta, apresentaram valores bem dispersos, para ambos os parâmetros, isto pode ser observado no coeficiente de variação.

Figura 15- Dados de cor aparente da água bruta e água filtrada

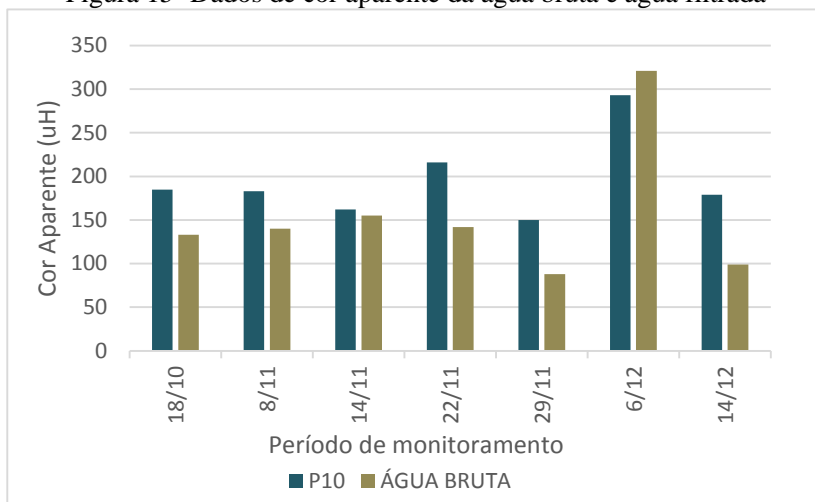


Tabela 7- Dados obtidos de cor aparente da água bruta e da água filtrada em solo natural

Dados	Água Bruta (uH)	P10 (uH)
Média	154,00	195,43
Mediana	140,00	183,00
Desvio Padrão	77,42	47,71
Coefficiente de variação	50,33	24,41
Nº de amostras	7	7

Figura 16- Dados de turbidez obtidos da água bruta e filtrada

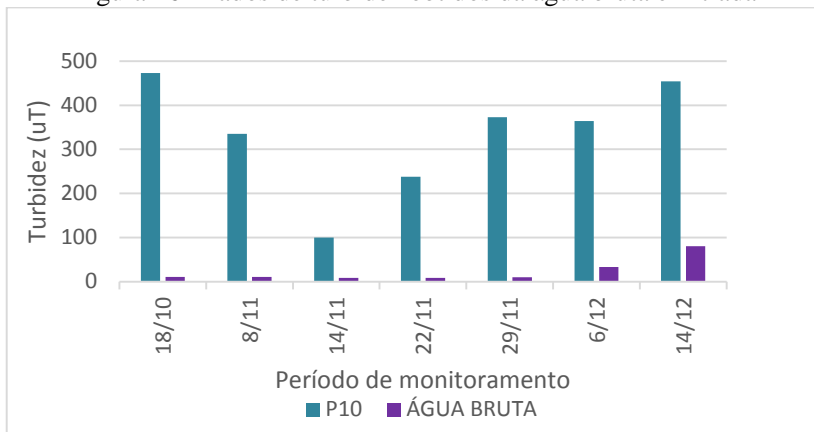


Tabela 8- Dados obtidos de turbidez da água bruta e água filtrada

Dados	Água Bruta (uT)	P10 (uT)
Média	23,14	333,86
Mediana	20,50	364,00
Desvio Padrão	26,73	129,70
Coefficiente de variação	115,52	38,69
Nº de amostras	7	7

É notado que as três primeiras medições, de ambos os parâmetros, encontram-se em constante melhoria, e após este período, houve aumento dos significativo destes valores. Isto pode estar relacionado com o fato de a bomba de recalque da água bruta ter o seu funcionamento interrompido após as três primeiras análises. Assim, é notado que o sistema, mesmo estando em período de aclimação, pode ser eficiente para a melhoria destes parâmetros. Em relação ao parâmetro turbidez, em períodos chuvosos, esta tende a apresentar valores mais agravantes do que em períodos de seca. Desta forma, o aumento do volume de chuva, proporciona a diminuição deste parâmetro, justificando a variação nos valores obtidos.

4.2.2.4 Sólidos Dissolvidos Totais

Neste trabalho, a concentração de sólidos dissolvidos totais foi obtida a partir da relação deste parâmetro com a condutividade hidráulica. Os valores obtidos são apresentados na Figura 17 e na Tabela 9.

Nota-se que os sólidos dissolvidos totais apresentaram comportamento semelhante ao dos parâmetros cor aparente e turbidez. Nas três primeiras medições, enquanto a bomba de recalque de água bruta estava operando, este parâmetro estava apresentando uma melhoria gradativa. Assim que foi interrompido o seu funcionamento, os valores começaram a aumentar.

Figura 17- Dados obtidos de sólidos dissolvidos totais

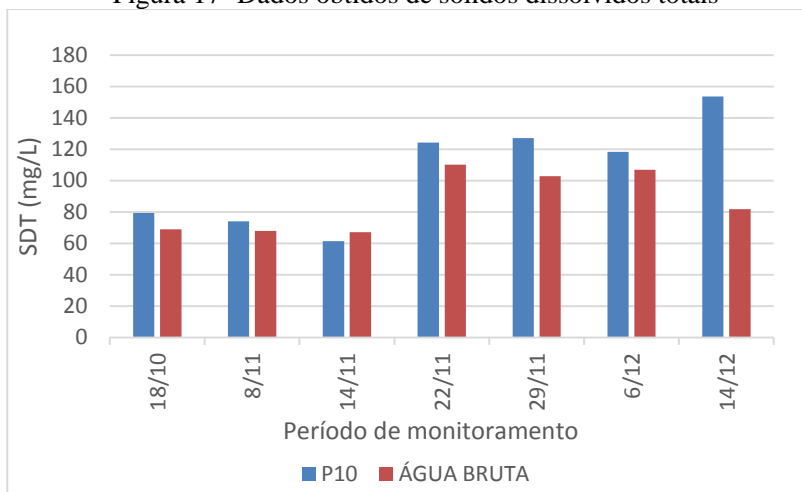


Tabela 9- Dados obtidos de sólidos dissolvidos totais (mg/L)

Dados	Água Bruta (mg/L)	P10 (mg/L)
Média	86,44	105,40
Mediana	81,66	118,34
Desvio Padrão	19,55	33,95
Coefficiente de variação	22,61	32,21
Nº de amostras	7	7

4.2.2.5 Coliformes Totais e *Escherichia Coli*

Pode-se observar que os dados de coliformes totais e os coliformes fecais (termotolerantes) se apresentaram com valores bastante significativos. Para o grupo dos coliformes totais, a média da água bruta foi de $1,4 \times 10^4$ e do piezômetro $1,7 \times 10^4$ e para o grupo dos coliformes termotolerantes a média da água bruta foi de $2,53 \times 10^5$ e $4,2 \times 10^5$ para a água filtrada, como observado nas Tabelas 10 e 11.

Tabela 10- Dados obtidos de coliformes totais (100/mL)

Dados	Água Bruta (100/ml)	P10 (100/ml)
Média	$1,4 \times 10^4$	$1,7 \times 10^4$
Mediana	$4,1 \times 10^2$	$6,1 \times 10^2$
Desvio Padrão	$2,4 \times 10^4$	$2,7 \times 10^4$
Coefficiente de variação	159,25	154,60
Nº de amostras	4	4

Tabela 11-Dados obtidos de coliformes termotolerantes (100/mL)

Dados	Água Bruta (100/ml)	P10 (100/ml)
Média	$2,53 \times 10^5$	$4,2 \times 10^5$
Mediana	$7,7 \times 10^4$	$2,97 \times 10^4$
Desvio Padrão	$3,8 \times 10^5$	$4,9 \times 10^4$
Coefficiente de variação	149,40	117,17
Nº de amostras	4	4

Foram analisados 4 amostras para os parâmetros de coliformes, quantidade menor do que nos outros parâmetros analisados, devido à perda de alguns resultados. Durante as coletas, foi possível observar que a água do lago apresenta odor característico de lançamento de esgoto. Desta forma a presença de bactérias do grupo coliformes é evidenciado. Assim, foi necessário a diluição das amostras em 100x ou 1000x para a realização das leituras, resultando em valores elevados para ambos os parâmetros.

4.2.3 Enquadramento do corpo hídrico

A caracterização das águas de superfície do corpo hídrico em estudo está representada através dos parâmetros apresentados na Tabela 12. Todos os parâmetros da Resolução CONAMA 357/05 no ANEXO B.

Tabela 12- Enquadramento do corpo hídrico a partir dos parâmetros analisados de acordo com o CONAMA 357/05

Parâmetros	Análises (LAGO)	Resolução CONAMA
pH	7,43	6 a 9
Cor Aparente	154,00	-
Cor Verdadeira	54,00	-
Oxigênio dissolvido	10,28	≥2 (mg/L)
Turbidez	23,14	Até 100UNT
Coliformes totais	1,4x10 ⁴	-
Coliformes Termotolerantes	2,53x10 ⁵	-

Fonte: Autor (2018)

A partir dos parâmetros analisados, pode-se enquadrar o Lago do HU como classe 4, que apresenta parâmetros menos exigentes, ou seja, para a situação que a água se encontra atualmente, sua utilização se destina apenas para questões paisagísticas. No entanto, o objetivo da implantação deste sistema de filtração é de efetivar a recuperação desta água para que possa ser utilizada para fins mais nobres.

4.3 LOCAÇÃO DOS PIEZÔMETROS

4.3.1 Identificação do nível e fluxo de escoamento da água no lençol freático

A partir da medição do nível de água nos pontos de locação dos piezômetros, tendo como referência o passeio e o lago, foi determinado o fluxo do escoamento da água no lençol freático do sistema em funcionamento. Na Tabela 13 são apresentadas as medições do escoamento da água no lençol freático, realizadas em campo, nos piezômetros locados no local de estudo.

Tabela 13- Medições do nível do escoamento da água no lençol freático

Piezômetro	Nível do Lençol freático (m)
Lago	0,00
P1	0,970
P2	0,940
P3	0,820
P4	0,755
P5	Leitura não realizada
P6	0,565
P7	0,720
P8	Leitura não realizada
P9	0,580
P10	0,540
P11	0,395
P12	0,365

Fonte: Autor (2018)

O fluxo de infiltração identificado referente ao bombeamento da água do lago para o sistema, é representado na Figura 18. Desta forma, garante-se que a água passe pela vala de infiltração e aconteça as etapas de tratamento desejadas e as impurezas da mesma podem ser eliminadas pelo solo.

Figura 18- Locação dos piezômetros e identificação do fluxo da água do sistema em funcionamento



Fonte: Autor (2018)

4.4 PARÂMETROS DE PROJETO - SISTEMA PILOTO

Na Tabela 14 são apresentados os parâmetros de projeto utilizados para a implantação e desenvolvimento do sistema piloto. O cálculo dos parâmetros taxa de filtração (m/ d) e tempo de detenção (d), foi descrito no APÊNDICE B.

Tabela 14-Parâmetros de projeto utilizadas nas colunas filtrantes

Parâmetros	Coluna 1	Coluna 2	Coluna 3	Coluna 4
Diâmetro interno do filtro (m)	0,145	0,145	0,145	0,145
Comprimento da coluna (m)	3,50	2,20	2,20	2,20
Espessura do meio filtrante (m)	1,60	2,00	2,00	1,80
Diâmetro da camada suporte (m)	0,5	0,5	0,5	0,5
Taxa de filtração (m/d)	0,016	0,016	0,016	0,016
Diâmetro efetivo do solo (D10) %	1,76	1,76	1,76	1,76
Coefficiente de uniformidade do solo	1,5	1,5	1,5	1,5
Porosidade efetiva do solo (%)	30	30	30	30
Tempo de detenção (d)	39	48	48	43

Fonte: Autor (2018)

Nota-se que o parâmetro taxa de filtração se apresenta lento com 0,016 m/d e o tempo de detenção elevado, com um total de 178 dias. Estes valores são referentes a fase inicial de funcionamento do projeto. Ao completar o período de aclimatação, será necessário o ajuste de parâmetros de projeto como a vazão, que influenciará diretamente nos outros parâmetros.

5. CONCLUSÃO E RECOMENDAÇÕES

Como finalização deste trabalho, com base nos resultados obtidos, conclui-se que a caracterização do solo do local de estudo, por meio de ensaios laboratoriais, apresentou resultados satisfatórios tanto para a implantação do sistema, quanto para o seu desempenho.

Apesar de todos os parâmetros avaliados não apresentarem resultados de remoção, para os parâmetros cor aparente, turbidez e sólidos dissolvidos totais, as três primeiras avaliações, antes da interrupção do funcionamento da bomba de recalque da água do Lago, apresentaram resultados com uma gradativa melhoria, mesmo o sistema ainda estando em período de aclimação, indicando que este estava respondendo a proposta do estudo.

O pouco tempo entre a implantação do sistema e o desenvolvimento e conclusão deste trabalho, acarretou em um número limitado de amostragens do monitoramento da qualidade da água produzida pelo sistema. Para o enquadramento dos corpos hídricos de águas doces, o CONAMA 357/05 estabelece uma série de outros parâmetros, que o melhor caracteriza e enquadra de acordo com seu uso. Desta forma, conclui-se que os dados obtidos apresentam baixo nível de confiança e representação. Assim, sugere-se que sejam realizadas mais coletas, para que os parâmetros analisados indiquem maior confiança e relação entre os dados. E que análises de outros parâmetros de qualidade da água, que constam no CONAMA 357/05, sejam realizadas para que o Lago do HU seja melhor enquadrado.

O que concerne o sistema piloto em escala laboratorial, este foi utilizado neste trabalho, para identificar os parâmetros de projeto do sistema. Tais parâmetros, como o tempo de detenção hidráulica e taxa de filtração do sistema, são valores que representam a fase inicial de operação do piloto, a partir de parâmetros que foram arbitrados. Neste contexto, recomenda-se o monitoramento diário das colunas filtrantes de sedimento, para que seja regularizada as variáveis de projeto e após o período de aclimação, o sistema opere de maneira eficiente.

Com este trabalho, não foi possível avaliar a efetivação do sistema em relação a recuperação do Lago. No entanto, acredita-se que com ajustes e melhoramentos dos parâmetros de projeto, este sistema contribuirá para a melhoria do ambiente e este volte a apresentar melhores condições paisagísticas para a população local.

REFERÊNCIAS

AGÊNCIA NACIONAL DE ÁGUAS – ANA., **Monitoramento da qualidade da água em rios e reservatórios: Bases Conceituais para Monitoramento de Águas Continentais**. Unidade 2. Brasília, 2013.

ARAÚJO, A.B., FELIX, E.P., BRITO, N.M. AMARANTE JR, O.P. Interações e destino de pesticidas no ambiente. In: ESPÍNDOLA, E. e WENDLAND, E: **Bacia Hidrográfica – Diversas Abordagens em Pesquisa**. cap.2, v.3, p.17-32, 412p. São Carlos, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6457**: Preparação de amostras de solo para ensaio normal de compactação e ensaios de caracterização- Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1986.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo- Análise Granulométrica- Método de Ensaio. Rio de Janeiro, 1984.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6502**: Rochas e Solos. Rio de Janeiro, 1995.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. NBR 15495-1. Poços de monitoramento de águas subterrâneas em aquíferos granulados. Rio de Janeiro, 2007.

BARBOSA, I.S: **Análise dos Parâmetros Físico-Químicos e Metais presentes nas nascentes do rio Meia Ponte**. [Dissertação]. Pontifícia Universidade Católica de Goiás. Goiás, 2015.

BAUWER, H. **Artificial recharge of groundwater: hydrogeology and engineering**. Journal of Hydrogeology, v.10, p.121-142, 2002.

CAPUTO, H M. **Mecânica dos Solos e suas Aplicações**. Livros Técnicos e Científicos Editora. Vol. 1, 6 ed. Rio de Janeiro, 1996.

CAUDURO, F.A.; DORFMAN, R. **Manual de ensaios de laboratório e de campo para irrigação e drenagem**. Porto Alegre: PRONI/ IPH-UFRGS, 1986. 216 p.

CASAGRANDE, A; R. E. FADUM. **Notes on soil testing for engineering purposes.** Harvard University Graduate. School of Engineering. p.74, 1940.

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE- Resolução CONAMA nº 410/2005. **Dispõe sobre condições e padrões de lançamento de efluentes.**

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE- Resolução CONAMA nº 357/2005. **Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões para lançamento de efluentes , e dá outras providências.**

CONSELHO NACIONAL DE MEIO AMBIENTE- Resolução CONAMA nº 430/2011. Complementa e altera a Resolução nº 357/2005.

DASH, R.R.; GRISCHEK, T. et al.: **River bank filtration in Haridwar India:removal of turbidity, organics and bacterias.** Hidrogeology Journal, Roorkee (India), p.1- 11, 2010.

DAN EDDY, Metcalf. **Wastewater Engineering: Treatment, Disposal and Reuse.** 1991.

HISCOCK, K.M ; GRISCHEK, T: **Attenuation of groundwater pollution by bank filtration.** Journal of Hidrology. Germany. p. 139-144, 2002.

KUEHN, W., MUELLER, U. **Riverbank filtration. An overview.** Journal American Water Works Association, v.92, n.12, p.60-69, 2000.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água.** 2. ed. Campinas: Átomo, 2008.

MESQUITA, M.G.B.F; MORAES, S.O. **A dependência entre a condutividade hidráulica saturada e atributos físicos do solo.** Ciência rural, v.34, n.3, p.963-969, Santa Maria, 2004.

MICHELAN, Denise Conceição de G.C. **Filtração em margem de rio precedendo a filtração lenta, para a remoção de carbofurano, em**

tratamento de água para consumo humano. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010, p.312.

MONDARDO, R. I. **Avaliação da filtração em margem como prétratamento à filtração direta descendente na remoção de células de cianobactérias e saxitoxinas.** 2009. 201p. [Tese]. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

OOSTERBAAN, R.J; NIJLAND, H.J. **Determining the saturated hydraulic conductivity.** In:RITZEMA, H.P. (Ed.). Drainage Principles and Applications. ILRI Publication16, second revised edition, Wageningen, The Netherlands,. p.40, 1994.

PAIVA, A.L.R. O processo de filtração em margem e um estudo de caso no rio Beberibe. [Tese]. Universidade Federal de Pernambuco. Recife, 2009.

RABELO, L. **Estudos preliminares para a implantação da filtração em margem na Lagoa do Peri como pré tratamento de água para a remoção de fitoplâncton.**[Dissertação]. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2006.

RAY, C., MELIN, G. & LINSKY, R.B. **Riverbank Filtration – Improving Source-Water Quality** Water Science and Technology Library, USA. Kluwer Academic Publishers, p.364, 2003.

ROCHA, G.S: **Aplicação da teoria dos números fuzzys nos modelos de transportes de poluentes para avaliar sua capacidade de previsão do risco de contaminação em rios naturais.**[Dissertação].Universidade Federal do Ceará. Ceará, 2007.

SANTOS, Irani dos. **Monitoramento e modelagem de processos hidrogeomorfológicos: mecanismos de geração de escoamento e conectividade hidrológica.** 167 p, 2009. [Tese]. Programa de Pós Graduação em Engenharia Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis.

SANTOS, J. P. Hidráulica de Poços I. In: BRASIL. Gerência de Apoio A Treinamento e Divulgação. CETESB. **Construção, operação e manutenção de poços**. São Paulo: CETESB, 1977, p.56-62.

SCHIJVEN, J. F.; BERGER, P.; MIETTINEN. I. **Bank Filtration for Water Supply**; Ray,C., Ed.; Kluwer Academic Publishers: Norwell, MA, in press, 2002.

SCHMIDT,C.K; LANGE,F.T;BRAUCH,H.J;KUHN,W. **Experiences with riverbank filtration and infiltration in Germany**. Water Technology Center (TZW). Germany, 2003.p.17.

SENS, M. L., DALSSASSO, R. L., MONDARDO, R. I., MELO FILHO, L. C. **Filtração em Margem: Contribuição ao estudo da remoção de cianobactérias e microcontaminantes orgânicos por meio de técnicas de tratamento da água para consumo humano**. PROSAB 4. Rio de Janeiro:ABES, v.1, cap.5, p. 143-300, 2006.

SOARES,M.B,D. **Estudo da Implantação em escala real da filtração em margem em lago de piscicultura extensiva para dessedentação animal**. [Dissertação]. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2009.

SOUZA, F.H. **Tratamento de água para abastecimento por meio de filtros lentos de fluxo ascendente com limpeza por retrolavagem e descarga de fundo**. [Dissertação]. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2015.

TUDINSI, J.G; TUDINSI, T.M: **Limnologia**. Oficina de Textos. São Paulo, 2008.

VON SPERLING, M.V. **Introdução à Qualidade das Águas e Tratamento de Esgotos**. 3. ed. Belo Horizonte: Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental; Universidade Federal de Minas Gerais; 2005.

VEIGA, B.V. **Fatores Intervenientes na dinâmica do fósforo em ambientes lênticos- Investigação sobre o reservatório de Alagados no Estado do Paraná** [Tese]. São Paulo, 2010.

WANG, J. Riverbank Filtration case study at Louisville, Kentucky.: **Riverbank Filtration: Improving source-water quality**. Alemanha, v.43, cap.7, p.117-146, 2002.

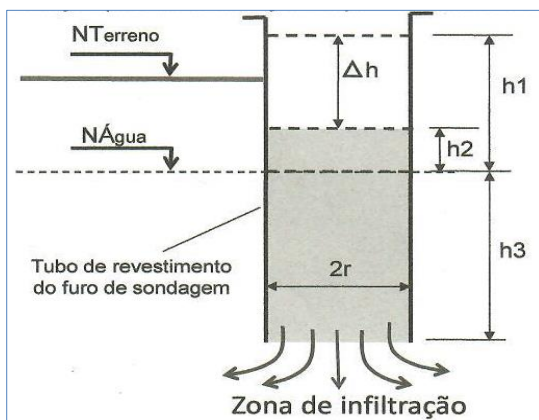
WENGER, S. **A Review of the Scientific Literature on Riparian Buffer Width, Extent and Vegetation**. Institute of Ecology. University of Georgia, 1999.

WORCH, E.; GRISCHEK, T.; BORNICK, H.; EPPINGER, P. **Laboratory tests for simulating attenuation processes of aromatic amines in riverbank filtration**. **Journal of hydrology**. German (Dresden). 259-268 p. 2002.

APÊNDICE A – Medições do rebaixamento do lençol freático durante o ensaio e os cálculos para determinar o coeficiente de condutividade hidráulica

Tempo	Leitura (cm)	Diferença (cm)	Somatório (cm)
			Δh
5 (s)	24,5	24,5	24,5
15(s)	26,5	2,0	26,5
30(s)	28,5	2,0	28,5
1(min)	39	10,5	39,0
2(min)	46,5	7,5	46,5
3(min)	52,5	6,0	52,5
4(min)	57	4,5	56,5
5(min)	61	4,0	60,5
10(min)	72	11,0	71,5
15(min)	77	5,0	76,5
20(min)	81	4,0	80,5
25(min)	85	4,0	84,5 20% =21,4
30(min)= 1800(s)	89	4,0	88,5

Fonte. Autor (2018)



Fonte: (CAPUTO, 1997)

Cálculos para determinar o coeficiente de condutividade hidráulica:

NA.(h1) = (107,0m);

Condição 30min = 88,5cm ou 20% (0,2.107)= 21,4cm

Deu 20% então

$\Delta h = 107 - 21,4 = 85,6$

Δt = interpolar tempo entre 25 e 30 minutos. T= 25,32 Para $\Delta h = 85,6$

$\Delta t = 1800s - 28s = 1772s$

r1=raio interno do piezômetro(cm/s) = 5,7cm

h1= altura da coluna d'água sobre NA. =107,0cm

h2=diferença de h1 e Δh dentro= 107,0cm – 85,6=21,4cm

Para o piezômetro P4

$$k = \frac{r1}{4.h} \cdot \frac{\Delta h}{\Delta t} \quad K = \frac{7,5}{4.107} \cdot \frac{85,6}{1772}$$

$$K = 6,43 \cdot 10^{-4} \text{ cm/s}$$

APÊNDICE B – Cálculos dos parâmetros de projeto do sistema em colunas filtrantes- piloto

C1= 1,6m de solo natural

C2= 2,0 m de solo natural

C3= 2,0 m de solo natural

C4= 1,8 m de solo natural

$Q_{saída} = 260 \text{ ml/d}$

$D_{interno} = 145 \text{ mm} \Rightarrow 0,145\text{m}$

Porosidade efetiva= 38%

$$TD = \frac{V \times \text{Porosidade Efetiva}}{Q}$$

Onde:

TD = tempo de detenção (d)

V = Volume (m^3)

Q = Vazão (m^3/d)

$$TD_{c1} = \frac{0,026 \times 0,38}{2,6 \times 10^{-4}} = 38,61 \text{ d}$$

$$TD_{c2,3} = \frac{0,033 \times 0,38}{2,6 \times 10^{-4}} = 48,27 \text{ d}$$

$$TD_{c4} = \frac{0,030 \times 0,38}{2,6 \times 10^{-4}} = 43,44 \text{ d}$$

$$TD_{total} = TD_1 + TD_{2,3} + TD_4 = 178 \text{ dias}$$

$$Tf = \frac{Q}{A}$$

Onde:

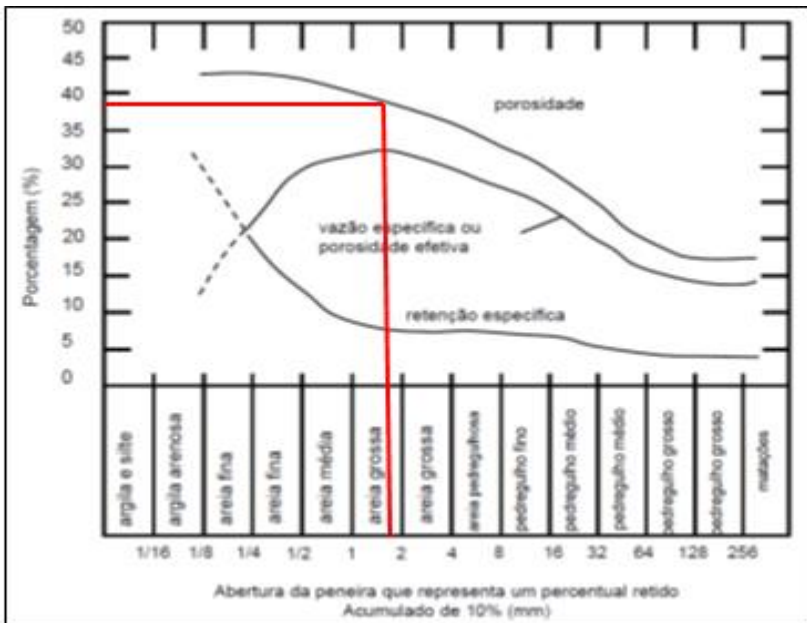
Tf = taxa de filtração (m/d)

Q = Vazão (m³/d)

A = Área (m²).

$$Tf = \frac{2,6 \times 10^{-4}}{0,0165} = 0,016 \text{ m/d}$$

ANEXO A – Ábaco da variação da porosidade e a vazão específica em relação a granulometria



Fonte: (Santos,1997)

ANEXO B – Tabela dos limites de classe dos parâmetros monitorados segundo a Resolução CONAMA 357/05

Parâmetro	Águas doces		Águas salinas		Águas salobras		
	Classe 1 ≤10 % V _o	Classe 2 ≤50 % V _o	Classe 3 ≤100 % V _o	Classe 4	Classe 1 ≤20 % V _o	Classe 2 ≤30 % V _o	Classe 3 ≤50 % V _o
Saúde	-	-	-	-	-	-	-
Efeito tóxico crônico	Não verificado	Não verificado	Não verificado	-	Não verificado	Não verificado	Não verificado
Efeito crônico agudo	efeito crônico	efeito crônico	efeito agudo	efeito crônico	efeito agudo	efeito agudo	efeito agudo
Zinco a	≤10	≤30	≤60	-	-	-	-
Densidade de Cloacibactérias	≤20 000	≤50 000	≤100 000	-	-	-	-
pH	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6 a 9	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5	6,5 a 8,5
CO ₂	≤8	≤8	≤8	≤2	≤8	≤8	≤8
DBO	≤3	≤5	≤10	-	-	-	-
Nitrogênio amoniacal total	3,7 µg/l-7,5 2,0 µg-µg/l ≤0,0 1,0 µg-0-µg/l ≤0,5 0,5 µg/l-0,5	3,7 µg/l-7,5 5,0 µg-7,5 µg/l ≤0,0 2,2 µg-0-µg/l ≤0,5 1,0 µg/l-0,5	13,3 µg/l-7,5 5,0 µg-7,5 µg/l ≤0,0 2,2 µg-0-µg/l ≤0,5 1,0 µg/l-0,5	-	≤0,40mg/l	≤0,70mg/l	≤0,70mg/l
Flúoreto total	Método 02 intermediário e titulário de Método 02N Método e titulário de intermediário; 0,1	Método 03 intermediário e titulário de Método 03M Método e titulário de intermediário; 0,1	Método 05 intermediário e titulário de Método 07S Método e titulário de intermediário; 0,15	-	≤0,062mg/l	≤0,063mg/l	≤0,186mg/l
Culiforme fermentante	≤200 em 80% de 6 amostração	≤1 000 em 80% de amostração	≤2 500 contos secundário ≤1 000 amostração contos amostração	-	≤1 000 em 80% de 6 amostração	≤2 500 em 80% de 6 amostração	≤4 000 em 80% de 6 amostração
Sólidos totais	≤500	≤600	≤600	-	-	-	-
Sor	-	≤75	≤75	-	-	-	-
Turbidez	≤40	≤100	≤100	-	-	-	-
Nitrito	≤10	≤10	≤10	-	≤0,40mg/l	≤0,70mg/l	≤0,70mg/l
Nitro	≤10	≤10	≤10	-	≤0,07mg/l	≤0,20mg/l	≤0,20mg/l
Chumbo total	≤0,3	≤0,3	≤0,3	-	≤0,3mg/l	≤0,3mg/l	≤0,3mg/l
Cádmio total	≤0,001	≤0,001	≤0,01	-	≤0,005	≤0,04	≤0,04
Chumbo total	≤0,01	≤0,01	≤0,033	-	≤0,01	≤0,21	≤0,21
Cobre dissolvido	≤0,006	≤0,006	≤0,013	-	≤0,005	≤7 µg/l	≤7 µg/l
Zinco total	≤0,05	≤0,05	≤0,05	-	≤0,05	≤1,1mg/l	≤1,1mg/l
Manganês total	≤0,1	≤0,1	≤0,5	-	≤0,1	≤0,1	≤0,1
Zinco total	≤0,18	≤0,18	≤5	-	≤0,09	≤0,12	≤0,12
Niquel total	≤0,025	≤0,025	≤0,025	-	≤0,025mg/l	≤7 µg/l	≤7 µg/l

Fonte: (CONAMA 357/05)