

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO TECNOLÓGICO
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL
CURSO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL

André Fazolo

**Análise da influência de uma espuma de poliuretano instalada em um filtro intermitente
de areia biologicamente estabilizado**

Florianópolis

2023

André Fazolo

Análise da influência de uma espuma de poliuretano instalada em um filtro intermitente de areia biologicamente estabilizado

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Sanitária e Ambiental
Orientador: Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coorientador: Ailton Borges Rodrigues, Me.

Florianópolis

2023

Ficha de identificação da obra

Fazolo, André

Análise da influência de uma espuma de poliuretano instalada em um filtro intermitente de areia biologicamente estabilizado / André Fazolo ; orientador, Bruno Segalla Pizzolatti, coorientador, Ailton Borges Rodrigues, 2023.

65 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Tratamento de água. 3. Sistema descentralizado. 4. biosand filter. 5. Espuma de poliuretano. I. Pizzolatti, Bruno Segalla. II. Rodrigues, Ailton Borges. III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

André Fazolo

Análise da influência de uma espuma de poliuretano instalada em um filtro intermitente de areia biologicamente estabilizado

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Engenheiro Sanitarista e Ambiental” e aprovado em sua forma final pelo Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental.

Florianópolis, 07 de agosto de 2023.

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Orientador
Universidade Federal de Santa Catarina

Mirella Klausen da Silveira, Enga.
Avaliadora
Universidade Federal de Santa Catarina

Samuel Lunardi, Me.
Avaliador
Universidade Federal de Santa Catarina

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi realizado graças à colaboração direta e indireta de diversas pessoas. Expresso aqui minha gratidão a todos que, de alguma forma, contribuíram para que este objetivo fosse alcançado. Em especial, agradeço:

À minha família, por todo o apoio e incentivo, principalmente aos meus pais, Altair e Joice, por terem sido o alicerce fundamental de toda essa jornada.

Ao meu irmão, Tiago, por todo seu suporte e fraternidade ao longo de nosso convívio, bem como pela idealização indireta desta pesquisa.

Ao meu companheirinho canino e fiel escudeiro, Costelinha, pelas aventuras inesquecíveis compartilhadas comigo nesses seis anos de amizade.

À minha namorada, Karoline, assim como a todos os outros amigos que a vida me apresentou, por tornarem a rotina acadêmica mais leve e divertida, além de suas inúmeras contribuições durante esta etapa.

Ao Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, pela orientação, atenção e compreensão as quais empregou no acompanhamento deste trabalho, assim como por todos os conhecimentos a mim transmitidos.

Ao coorientador, Ailton Borges Rodrigues, pela sua prestatividade e paciência, bem como pelo tempo despendido ao longo desta pesquisa.

Aos membros da banca, Samuel e Mirella, pela disponibilidade de tempo em participar, e pelas contribuições ao aprimoramento deste trabalho.

Ao Laboratório de Potabilização das Águas e ao Laboratório Integrado do Meio Ambiente, pela infraestrutura cedida, bem como aos integrantes destes laboratórios, pelo apoio técnico fornecido.

À Universidade Federal de Santa Catarina, principalmente ao corpo docente e aos técnico-administrativos do Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, por viabilizarem esta realização pessoal em uma instituição de ensino de excelência.

RESUMO

A falta de acesso a fontes seguras de água potável ainda é um grande obstáculo para a universalização do saneamento básico no Brasil, atingindo mais da metade da população rural do país. Sendo assim, alternativas como o filtro lento intermitente (*biosand filter*) têm se tornado relevantes, por se tratarem de soluções descentralizadas para o tratamento de água. O objetivo deste trabalho é analisar a influência de uma espuma de poliuretano sobre a qualidade da água proveniente de filtros lentos intermitentes, e sobre as frequências de limpeza destes filtros. Para esse propósito, foram operados dois filtros lentos intermitentes, com areia em suas camadas filtrantes, por 325 dias. Um dos filtros recebeu, sobre seu leito de filtração, uma espuma de poliuretano de 2 cm de espessura. Esta espuma foi substituída ao longo do experimento, a fim de avaliar a influência da sua troca sobre o sistema. A alimentação dos filtros foi feita de forma intermitente, uma vez ao dia, e o fluxo da água no interior dos filtros ocorreu de forma descendente. A qualidade da água foi monitorada através de análises de turbidez, cor aparente, cor verdadeira, pH, temperatura, oxigênio dissolvido, sólidos totais dissolvidos, condutividade elétrica, coliformes totais e *Escherichia coli*. Também foram aferidas as vazões iniciais dos filtros, para avaliar a duração de suas carreiras de filtração. Ambos os filtros obtiveram índices semelhantes para os parâmetros de qualidade da água, independentemente da espuma utilizada. O filtro com espuma obteve carreiras de filtração consideravelmente superiores em relação ao filtro sem espuma. A substituição da espuma proporcionou, ainda, um aumento na duração das carreiras de filtração. Apesar de não alterar significativamente a qualidade da água, a combinação do *biosand filter* com a espuma de poliuretano mostrou-se uma tecnologia promissora no tratamento descentralizado de água, devido a sua capacidade em reduzir a frequência entre limpezas do sistema.

Palavras-chave: Tratamento de água; sistema descentralizado; *biosand filter*, espuma de poliuretano.

ABSTRACT

The lack of access to safe sources of drinking water is still a major obstacle to the universalization of basic sanitation in Brazil, reaching more than half of the country's rural population. Therefore, alternatives such as the slow intermittent filter (biosand filter) have become relevant, since they are decentralized solutions for water treatment. The objective of this final paper is to analyze the influence of a polyurethane foam on the quality of water coming from slow intermittent filters, and on the cleaning frequencies of these filters. For this purpose, two intermittent slow filters were operated, with sand in their filtering layer, for 325 days. One of the filters received a 2 cm thick polyurethane foam over its filtration bed. This foam was replaced over the experiment in order to evaluate the influence of its replacement on the system. The filters were fed intermittently, once a day, and the water flow inside the filters occurred downwards. Water quality was monitored through analysis of turbidity, apparent color, true color, pH, temperature, dissolved oxygen, total dissolved solids, electrical conductivity, total coliforms and *Escherichia coli*. The initial outflows of the filters were also measured to assess the duration of their filtration runs. Both filters obtained similar water quality parameters, regardless of the foam used. The filter with foam obtained significant larger filtration runs than the filter without foam. The replacement of the foam also provided an increase in the duration of the filtration runs. Despite not significantly altering water quality, the combination of the biosand filter with the polyurethane foam has shown to be a promising technology in decentralized water treatment, due to its ability to reduce the frequency between system cleanings.

Keywords: Water treatment; decentralized system; biosand filter, polyurethane foam.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Elementos do BSF.....	22
Figura 2 – Curva granulométrica típica de um material.....	24
Figura 3 – Local de coleta	30
Figura 4 – Mapa de localização.....	32
Figura 5 – Filtros utilizados na pesquisa.....	33
Figura 6 – Turbidez	39
Figura 7 – Cor aparente	41
Figura 8 – Cor verdadeira.....	43
Figura 9 – Potencial de hidrogênio.....	45
Figura 10 – Temperatura	46
Figura 11 – Oxigênio dissolvido	47
Figura 12 – Sólidos totais dissolvidos.....	49
Figura 13 – Condutividade elétrica	50
Figura 14 – Vazão inicial	55

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Elementos e suas funções no <i>biosand filter</i>	22
Quadro 2 – Frequências de análise para cada parâmetro	35
Quadro 3 – Equipamentos utilizados para cada parâmetro	36
Quadro 4 – Coliformes totais e <i>E. coli</i>	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Qualidade da água bruta recomendável para filtração lenta.....	19
Tabela 2 – Taxas de remoção do <i>biosand filter</i>	21
Tabela 3 – Características do leito filtrante de acordo com a NBR 12216/1992	26
Tabela 4 – Resumo dos resultados	37
Tabela 5 – Carreiras de filtração	53
Tabela 6 – Retenção de turbidez pela espuma	54

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ABNT	Associação Brasileira de Normas Técnicas
APHA	<i>American Public Health Association</i>
BSF	<i>Biosand Filter</i>
CASAN	Companhia Catarinense de Águas e Saneamento
CAWST	<i>Centre of Affordable Water and Sanitation Technology</i>
CETESB	Companhia Ambiental do Estado de São Paulo
cm	Centímetro
CU	Coefficiente de Uniformidade
d ₁₀	Diâmetro Efetivo
d ₆₀	Diâmetro que permite a passagem de 60% dos grãos
FUNASA	Fundação Nacional de Saúde
GM/MS	Gabinete do Ministro – Ministério da Saúde
GPS	<i>Global Positioning System</i>
kg	Quilograma
LAPOÁ	Laboratório de Potabilização das Águas
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente
m ²	Metro quadrado
m ³	Metro cúbico
mg/L	Miligrama por litro
mL	Mililitro
mL/min	Mililitro por minuto
mm	Milímetro
NBR	Norma Brasileira Regulamentadora
NTU	<i>Nephelometric Turbidity Unit</i>
OD	Oxigênio Dissolvido
ONU	Organização das Nações Unidas
pH	Potencial de Hidrogênio
PVC	Policloreto de Vinila
SAA	Sistema de Abastecimento de Água
SABESP	Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo
SNIS	Sistema Nacional de Informações sobre o Saneamento

STD	Sólidos Totais Dissolvidos
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
uH	Unidade Hazen
UNESCO	<i>United Nations Educational, Scientific and Cultural Organization</i>
UPA/mL	Unidade Padrão de Área por Mililitro
VMP	Valor Máximo Permitido
μS/cm	Microsiemens por centímetro
°C	Graus Celsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	15
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	17
3.1	O ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL	17
3.2	SOLUÇÕES PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA DESCENTRALIZADO	18
3.3	FILTRAÇÃO	18
3.3.1	Filtração lenta	18
3.3.1.1	<i>Princípios da filtração lenta</i>	20
3.3.1.2	<i>Biosand Filter (BSF)</i>	20
3.3.1.3	<i>Leito de filtração</i>	24
3.3.1.3.1	Areia	25
3.3.1.3.2	Espuma de poliuretano	27
3.3.1.4	<i>Limpeza do filtro lento</i>	28
4	METODOLOGIA	29
4.1	LOCALIZAÇÃO	29
4.2	ÁGUA DE ESTUDO	29
4.2.1	Local de coleta	29
4.2.2	Produção da água de estudo	30
4.3	LOCAL DA PESQUISA	31
4.4	DESCRIÇÃO DOS FILTROS	32
4.5	REGIME DE ABASTECIMENTO E MANUTENÇÃO DOS FILTROS	34
4.6	PARÂMETROS ANALISADOS	35
4.7	ENSAIOS	36
5	RESULTADOS E DISCUSSÃO	37

5.1	EFICIÊNCIA SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA	37
5.1.1	Turbidez	38
5.1.2	Cor aparente.....	41
5.1.3	Cor verdadeira	42
5.1.4	Potencial de Hidrogênio	44
5.1.5	Temperatura	46
5.1.6	Oxigênio Dissolvido	47
5.1.7	Sólidos totais dissolvidos	48
5.1.8	Condutividade elétrica	50
5.1.9	Coliformes totais e <i>Escherichia coli</i>	51
5.2	LIMPEZA DOS FILTROS.....	53
6	CONCLUSÃO.....	56
	REFERÊNCIAS	58
	APÊNDICE A – RESULTADOS PARA A ESPUMA 1	64
	APÊNDICE B – RESULTADOS PARA A ESPUMA 2.....	65

1 INTRODUÇÃO

Segundo a Organização das Nações Unidas (ONU, 2010), o acesso assegurado à água potável é um direito humano essencial. Dessa maneira, em 2015, foram apresentados pela ONU os 17 Objetivos de Desenvolvimento Sustentável, a qual tem como objetivo nº 6 a garantia da disponibilidade e da gestão da água potável para todos. Este objetivo estipula como meta o acesso universal e equitativo à água potável a todos até o ano de 2030 (ONU, 2015).

De acordo com o Instituto Trata Brasil (2022), a falta de acesso à água potável atinge aproximadamente 35 milhões de pessoas no Brasil, ou 17% da população nacional. Considerando apenas o meio rural, essa cota é ainda maior, onde 59,5% da população rural é atingida pela ausência ou precariedade no abastecimento de água. Isto se deve ao fato de que a ligação das redes de abastecimento de água para essas localidades torna-se inviável por se tratarem de comunidades ou residências isoladas geograficamente (FUNASA, 2019).

Frente a este obstáculo, tecnologias para o tratamento de água de forma descentralizada vêm sendo desenvolvidas. Como exemplo dessa tecnologia, pode-se citar a filtração lenta domiciliar, que demanda baixos custos para implantação e operação, além de não requerer mão de obra especializada para sua implantação, manutenção e operação. Os filtros lentos descentralizados demandam atenção, geralmente, no que diz respeito ao controle das vazões, e à limpeza de seus leitos filtrantes (PIZZOLATTI, 2010).

A filtração lenta se dá pela passagem da água bruta por um meio poroso, geralmente areia, de maneira que seja favorecida a formação de uma camada biológica na parte superior do leito filtrante. Essa camada biológica é chamada de *schmutzdecke*, e é nela onde são removidos os principais poluentes presentes na água, através de processos biológicos, segundo Libânio (2010).

Esta pesquisa visou aplicar a filtração lenta em pequena escala como alternativa ao tratamento de água. Para isso foram utilizados dois filtros lentos, com fluxo descendente e alimentação intermitente, já estabilizados biologicamente. Os filtros possuíam areia como camada filtrante e britas como camada suporte. Ainda, um dos filtros possuía uma espuma de poliuretano sobre a sua camada filtrante. O objetivo deste trabalho foi analisar a influência desta espuma tanto nos parâmetros de qualidade da água, quanto na frequência de lavagem dos filtros. O experimento foi realizado no Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ), na Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), *campus* Florianópolis.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliação dos efeitos da utilização de uma espuma de poliuretano sobre a camada filtrante de um filtro lento intermitente biologicamente maduro.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Comparação de parâmetros físico-químicos e biológicos das águas resultantes dos filtros, com e sem espuma de poliuretano;
- Avaliação dos aspectos operacionais relacionados à frequência da necessidade de limpezas dos filtros.

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 O ABASTECIMENTO DE ÁGUA NO BRASIL

O acesso a água potável é um direito fundamental reconhecido mundialmente pela Organização das Nações Unidas (2010). Apesar disso, cerca de 26% da população mundial (2 bilhões de pessoas) ainda não possuem acesso a fontes seguras de abastecimento de água potável, de acordo com a Organização das Nações Unidas para a Educação, a Ciência e a Cultura (UNESCO, 2023). Ainda segundo a UNESCO (2023), a falta de água afeta de 2 a 3 bilhões de pessoas por, pelo menos, um mês ao ano.

No âmbito brasileiro, o artigo 23 da Constituição Federal de 1988 estabelece que a promoção de programas de melhorias no saneamento básico é de competência comum entre os entes da União, dos Estados e dos Municípios (BRASIL, 1988).

A Lei Federal nº 14.026/2020, que atualiza o marco legal do saneamento básico, cita o abastecimento de água potável como um dos quatro ramos fundamentais do saneamento básico no Brasil, juntamente com o esgotamento sanitário, a drenagem de águas pluviais, e o manejo de resíduos sólidos. Essa Lei também tem, como princípio fundamental, a universalização do acesso e a efetiva prestação dos serviços relacionados aos quatro pilares do saneamento básico, para que toda a população tenha acesso a eles. Ela estipula como meta que 99% da população seja abastecida com água potável até 31 de dezembro de 2033 (BRASIL, 2020). Além disso, ela também cita em seu Art. 3º:

O abastecimento de água potável é constituído pelas atividades e pela disponibilização e manutenção de infraestruturas e instalações operacionais necessárias ao abastecimento público de água potável, desde a captação até as ligações prediais e seus instrumentos de medição.

No Brasil, as redes públicas de abastecimento de água chegam a 84,2% da população total, alcançando 93,5% da população exclusivamente urbana (SNIS, 2022). No entanto, a situação é completamente diferente no meio rural. Segundo a FUNASA (2019), apenas 40,5% da população rural brasileira é atendida adequadamente com água tratada, 33,5% possui atendimento precário, e 26% desta população sequer é atendida pelos sistemas públicos de abastecimento de água. Em termos absolutos, quase 30 milhões de pessoas que vivem em regiões isoladas não estão sendo adequadamente abastecidas com água potável.

3.2 SOLUÇÕES PARA O TRATAMENTO DE ÁGUA DESCENTRALIZADO

O tratamento de água consiste basicamente em processos físicos, químicos e/ou biológicos, onde são removidas da água partículas suspensas e coloidais, matéria orgânica e microrganismos patogênicos, segundo Libânio (2010).

Considerando a ausência de acesso à água potável em grande parte das populações isoladas, e a dificuldade em abastecê-las devido ao seu distanciamento geográfico, tornam-se interessantes as tecnologias para tratamento de água de uso no local de consumo. Tais tecnologias agem de forma individual e descentralizada, e podem surgir como soluções ao fornecimento seguro de água potável às populações rurais (MACIEL, 2018).

3.3 FILTRAÇÃO

Segundo Lima (2019), a filtração se dá pela passagem da água em um meio poroso, geralmente areia. Nessa passagem ocorrem fenômenos físicos, químicos e biológicos que propiciam a remoção de partículas e microrganismos presentes na água. A filtração pode ser caracterizada quanto à direção do escoamento da água no interior dos filtros, sendo ascendente ou descendente.

Conforme Huisman e Wood (1974), a filtração também pode ser caracterizada pela sua taxa de filtração, como lenta ou rápida. A taxa de filtração lenta pode variar de 20 a 50 vezes menor que a taxa de filtração rápida.

De acordo com Di Bernardo, Brandão e Heller (1999), a taxa de filtração para os filtros rápidos varia entre 150 e 600 m³/m².dia, enquanto filtros lentos possuem taxa de filtração menor que 6 m³/m².dia. Já Huisman e Wood (1974) mencionam taxas de filtração entre 2 e 14 m³/m².dia para os filtros lentos.

3.3.1 Filtração lenta

A filtração lenta começou a ser usada na primeira metade do século XIX, na Europa. No ano de 1829 James Simpson construiu filtros lentos para abastecer uma parcela da população de Londres, na Inglaterra (BARRET; BRYCK; JANONIS, 1991).

No ano de 1892 os filtros lentos demonstraram-se potencialmente eficientes na remoção de microrganismos patógenos. Naquele ano houve uma epidemia de cólera que

culminou na contaminação do rio Elbe, na Alemanha. Este rio era o principal manancial que abastecia as cidades de Hamburgo e Altona. Devido a essa epidemia, mais de 7500 pessoas vieram a óbito no município de Hamburgo, que possuía um sistema de sedimentação como tratamento da água. Já em Altona, que tratava suas águas através de um sistema de filtração lenta, ocorreram aproximadamente 300 óbitos provocados pela cólera no mesmo período (HUISMAN, 1982).

Como o próprio nome ressalta, a filtração lenta trabalha com baixas taxas de filtração. Isso faz com que a água permaneça por mais tempo no leito filtrante, o que facilita a formação de uma camada biológica que age decompondo a matéria orgânica e outras impurezas presentes na água (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

A baixa taxa de filtração dos filtros lentos favorece, também, o desenvolvimento de longos intervalos entre sucessivas limpezas. Tais períodos são conhecidos como carreiras de filtração, e podem atingir até 60 dias sem que haja o comprometimento da qualidade da água proveniente dos filtros lentos (MEDINA, 2000).

Águas contendo altos índices de sólidos em suspensão e turbidez podem gerar adversidades ao desempenho do filtro. Elevadas concentrações de material suspenso podem comprometer a camada biológica estabelecida no leito filtrante, além de acelerar o processo de colmatação dos filtros (DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999).

A Tabela 1 apresenta os valores máximos recomendados para alguns parâmetros da água a ser filtrada, de acordo com Di Bernardo, Brandão e Heller (1999).

Tabela 1 – Qualidade da água bruta recomendável para filtração lenta

VALORES MÁXIMOS RECOMENDADOS		
Características da água	Di Bernardo (1993)	Cleasby (1991)
Turbidez (NTU)	10	5
Cor verdadeira (uH)	5	-
Ferro (mgFe/L)	1	0,3
Manganês (mg Mn/L)	0,2	0,05
Algas	250 UPA/mL	5 µg clorofila-a/L
Coli. Totais (NMP/100mL)	1000	-

Fonte: Di Bernardo, Brandão e Heller (1999).

3.3.1.1 Princípios da filtração lenta

De acordo com Costa (1980), durante o processo de filtração lenta, as partículas do meio filtrante retêm as impurezas presentes na água após o contato entre as suas superfícies. Essa retenção se dá por meio de mecanismos de filtração, que podem ser por transporte, aderência e purificação através da atividade de microrganismos (HUISMAN e WOOD, 1974).

Nos mecanismos de filtração por transporte as partículas chocam-se com o material filtrante, e nele ficam retidas. Os mecanismos de filtração por aderência e de purificação ocorrem através da ação de uma camada biológica chamada *schmutzdecke*. A palavra *schmutzdecke* tem origem germânica e significa “camada ou película suja”. Essa camada está localizada na área de interação entre a água e o leito responsável pela filtração (BARRET; BRYCK; JANONIS, 1991).

Grande parte da matéria orgânica presente na água bruta é interceptada na interface água-meio filtrante, o que favorece o crescimento de microrganismos predadores que consomem esta matéria orgânica acumulada, além de consumirem também microrganismos patogênicos, em processos metabólicos de assimilação e desassimilação (PIZZOLATTI, 2010). Segundo Libânio (2010), o *schmutzdecke* pode ser composto por matéria orgânica, partículas inertes, bactérias, algas e protozoários, e desenvolve-se na parte superior do filtro, numa espessura de 2 a 5 centímetros.

Segundo Manz (2007), a formação desse biofilme acontece naturalmente pela própria ação dos microrganismos já presentes na água, levando até 30 dias para seu completo desenvolvimento.

3.3.1.2 Biosand Filter (BSF)

A tecnologia *biosand filter* é muito semelhante ao sistema convencional de filtração lenta, porém, no BSF a alimentação dos filtros ocorre em regime intermitente (ROMERO, 2020). O *biosand filter* teve origem na década de 1990, através de um piloto doméstico construído pelo Dr. David Manz, da Universidade Canadense de Calgary. Estima-se que até o ano de 2023 foram instalados mais de 1,7 milhões de filtros com a tecnologia BSF em mais de 60 países, atendendo cerca de oito milhões de pessoas ao redor do mundo (CAWST, 2023).

A Tabela 2 apresenta dados de remoção de impurezas para um BSF ideal:

Tabela 2 – Taxas de remoção do *biosand filter*

Parâmetro a ser removido	Eficiência de remoção
Helmintos e protozoários	até 100%
Bactérias	até 98,5%
Vírus	de 70 a 99%
Turbidez	até 95%

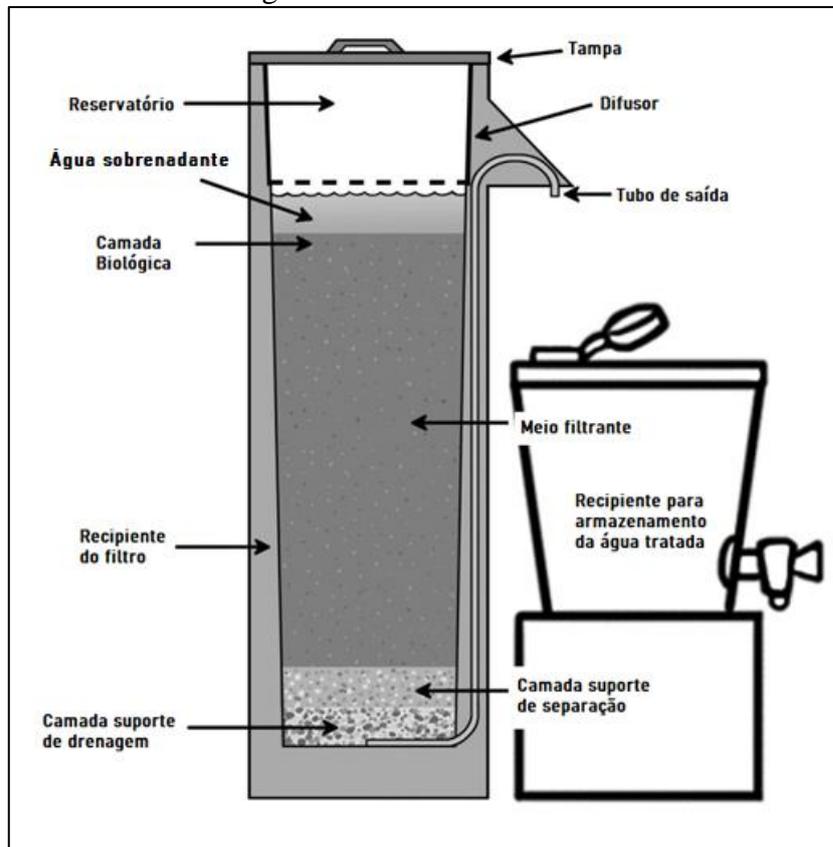
Fonte: adaptado de CAWST (2023)

A água filtrada pode ser consumida mesmo enquanto a camada biológica não atingir sua fase de maturação, desde que sejam aplicadas técnicas para garantir sua desinfecção. Para garantir um bom funcionamento do BSF, o *schmutzdecke* deve permanecer úmido, pois, caso esse biofilme seque, os microrganismos podem morrer por desidratação, o que prejudicaria o desempenho do filtro. Para tanto, é necessário que haja uma coluna d'água encobrindo o *schmutzdecke*. Também há de se ter uma atenção especial em dias quentes devido às altas taxas de evaporação, que podem reduzir a altura dessa coluna d'água que protege o biofilme (CAWST, 2012).

A taxa de filtração ótima indicada para o *biosand filter* é de 400 mL/min, para a décima versão dos filtros desenvolvidos pela CAWST (2012). Taxas de filtração acima de 450 mL/min podem empurrar os microrganismos patogênicos através da camada filtrante, comprometendo o processo de remoção. Quando a taxa de filtração for inferior a 300 mL/min, o filtro estará com uma boa remoção de impurezas, uma vez que o tempo de contato entre a água bruta e o leito de filtração serão maiores, no entanto, o processo todo pode se tornar muito demorado, fazendo com que os usuários deixem de usar o filtro (CAWST, 2012)

A Figura 1 representa esquematicamente os elementos presentes no *biosand filter* desenvolvido pela CAWST (2012):

Figura 1 – Elementos do BSF



Fonte: adaptado de CAWST (2012).

O Quadro 1 apresenta os elementos presentes no filtro desenvolvido pela CAWST (2012) e suas respectivas funções no sistema.

Quadro 1 – Elementos e suas funções no *biosand filter*

Elemento	Função
Reservatório	Receber e armazenar a água a ser filtrada durante o processo
Tampa	Prevenir a contaminação da água presente no reservatório por fatores externos
Difusor	Regulagem de fluxo e redução do distúrbio na camada biológica causado pela alimentação dos filtros
Água sobrenadante	Proteção da camada biológica contra o gotejamento proveniente do difusor, e manutenção da umidade na camada biológica
Recipiente do filtro	Sustentação dos componentes do filtro

Meio filtrante	Remoção de impurezas e patógenos da água que está sendo tratada
Camada Biológica	
Camada suporte de separação	Impedir que a areia seja carregada pelo fluxo de água, protegendo o tubo de saída de possíveis obstruções
Camada suporte de drenagem	Impedir que a areia e as rochas menores da camada de separação obstruam o tubo de saída

Fonte: adaptado de CAWST (2012)

A água a ser tratada é depositada no reservatório, na parte superior do sistema. A pressão hidráulica desse líquido o deslocará para baixo, criando um fluxo descendente através do leito filtrante. Conforme o tempo passa, a altura da coluna d'água irá diminuir, resultando em uma redução na sua pressão hidráulica e conseqüente redução da vazão no filtro, até o momento em que o nível da água no reservatório irá se igualar ao nível da água do tubo de saída, cessando o fluxo no filtro (CAWST, 2012).

O período em que não há fluxo no interior do BSF pode ser chamado de período de pausa, e é nele onde os microrganismos do biofilme consomem os patógenos e os nutrientes presentes na água. Os patógenos que forem retidos abaixo da camada biológica podem morrer pela falta de oxigênio e de nutrientes durante o período de pausa (CAWST, 2012).

De acordo com CAWST (2012), a duração dos períodos de pausa, também conhecida como intermitência, deve ser de 1 a 48 horas, pois, dessa maneira, os microrganismos existentes no *schmutzdecke* conseguem consumir a matéria orgânica e os patógenos presentes na água. Quando o tempo entre as alimentações do filtro for maior que 48 horas, os microrganismos do *schmutzdecke* podem acabar consumindo todos os nutrientes da água e, conseqüentemente, morrerem por inanição. Ainda segundo CAWST (2012), é recomendado que a alimentação dos filtros seja feita entre 1 e 4 vezes por dia.

Segundo CAWST (2009), uma limitação da tecnologia BSF é o fato de que o *biosand filter* é muito suscetível a uma rápida colmatção, caso venha a ser alimentado com água de turbidez elevada. Para CAWST (2012), é aceitável uma turbidez de até 50 NTU, ao passo que Manz (2007) adota 20 NTU como valor máximo para a turbidez da água a ser filtrada.

Como outras desvantagens do sistema BSF, podem-se citar o longo tempo para o amadurecimento do filtro, a taxa de filtração relativamente baixa, a necessidade de manutenção

regular, baixa remoção de vírus e o fato da eficiência da desinfecção do sistema ser afetada pela turbidez da água bruta (LOO *et al.*, 2012).

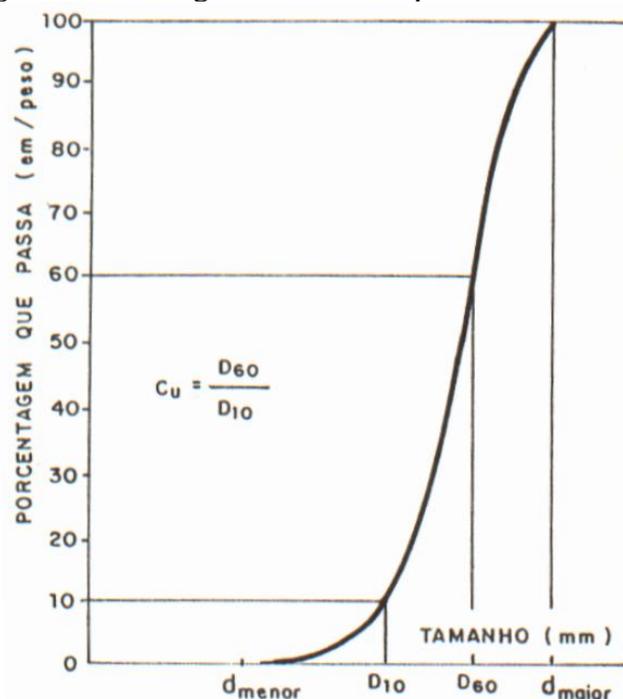
Loo *et al.* (2012) também apresenta os benefícios do *biosand filter*, como a praticidade de instalação, utilização e manutenção; e o baixo custo na sua construção, por utilizar materiais baratos e de fácil acesso. Outras vantagens são a redução de patógenos como protozoários e bactérias, e a dispensabilidade do uso de produtos químicos no tratamento.

3.3.1.3 Leito de filtração

Segundo Brinck (2009), a eficiência do tratamento na camada filtrante depende diretamente das seguintes propriedades do material utilizado: tamanho, geometria, densidade, dureza e porosidade.

O tamanho indica o diâmetro dos grãos, e é definido através de testes de ensaio presentes na NBR 7181/2016 (ABNT, 2016), onde a areia a ser utilizada no leito filtrante passa por diversas peneiras, com o objetivo de quantificá-la em diversas faixas de diâmetro. Através dessa classificação pode-se desenhar graficamente a curva granulométrica do material em estudo (Figura 2), e, através dela, definir os valores para o diâmetro efetivo (d_{10}) e o d_{60} (BRINCK, 2009).

Figura 2 – Curva granulométrica típica de um material



Fonte: Di Bernardo (1991 *apud* Brinck, 2009).

O diâmetro efetivo é o diâmetro da peneira que permite a passagem de apenas 10% da amostra, ou seja, o diâmetro em que 10% das partículas são inferiores a ele. O d_{10} é um indicativo da permeabilidade do material, onde a permeabilidade é diretamente proporcional ao valor de d_{10} . Da mesma forma, o d_{60} indica o diâmetro da peneira em que 60% da amostra possui diâmetro inferior a ele. Através do diâmetro efetivo e do d_{60} , é possível calcular o coeficiente de uniformidade (CU), que é a relação entre eles (PINTO, 2006).

Segundo Brinck (2009), os filtros são beneficiados quando o coeficiente de uniformidade do meio filtrante for baixo, pois isso aponta que o material utilizado é uniforme, o que favorece a eficiência de remoção e de manutenção do sistema.

A geometria do material influencia o desempenho da filtração. De acordo com Kawamura (1999), a eficiência de remoção do filtro aumenta quanto maior for a irregularidade geométrica dos grãos. Segundo Brinck (2009), a massa específica do grão “é um parâmetro muito importante para o cálculo da perda de carga, fluidificação e expansão do meio filtrante”. Ela é definida como sendo a relação entre a massa total dos grãos e seu volume.

A dureza do material utilizado determina a vida útil da camada de filtração do sistema, uma vez que, com o passar do tempo, pode haver a fragmentação dos grãos em grãos menores, alterando a curva granulométrica do leito filtrante, e conseqüentemente seu desempenho na remoção de impurezas (BRINCK, 2009). Ainda de acordo com Brinck (2009), a relevância da porosidade se dá “pois afeta a velocidade da água de lavagem, a perda de carga e a capacidade de reter sólidos no meio”. Ela é calculada como sendo a divisão do volume de vazios pelo volume total do leito de filtração.

3.3.1.3.1 Areia

O emprego da areia no processo de filtração vem sendo estudado pelo menos desde o início do século XVIII. A primeira concepção dessa ideia que se tem registro veio através de Phillippe La Hire, cientista francês natural de Paris, que, em 1703, apresentou um plano de fornecer, para todas as residências, filtros domésticos com areia para o tratamento individual de água (HALL; DIETRICH, 2000). Ainda de acordo com Hall e Dietrich (2000), em 1746 houve a primeira patente de um projeto de filtro de água, garantida ao também francês Joseph Amy. O filtro desenvolvido por Joseph Amy consistia num leito filtrante composto por areia e esponja, em diferentes configurações.

Filtros de areia foram usados pela primeira vez na Escócia, no ano de 1804, construídos por Jonh Gibbs. Em 1806, foi inaugurada uma estação de tratamento de água por filtração em Paris. A camada de filtração consistia em areia grossa proveniente de leitos de rios e carvão esmagado (HALL; DIETRICH, 2000).

Manz (2007) recomenda que a areia da camada filtrante tenha valores de diâmetros efetivos de 0,15 mm para o *biosand filter*, e de 0,35 mm para o filtro lento tradicional. No Brasil, a NBR 12216/1992 (ABNT, 1992) “fixa as condições exigíveis na elaboração de projeto de estação de tratamento de água”, e preconiza as seguintes características para a areia a ser usada em filtros lentos e rápidos (Tabela 3):

Tabela 3 – Características do leito filtrante de acordo com a NBR 12216/1992

Parâmetro	Filtro lento	Filtro rápido
Espessura mínima da camada filtrante	90 cm	25 cm
Diâmetro efetivo dos grãos (d_{10})	0,25 a 0,35 mm	0,40 a 0,45 mm
Coefficiente de uniformidade (CU)	Menor que 3	1,4 a 1,6

Fonte: adaptado de ABNT (1992)

Estudos feitos por Bellamy, Hendricks e Logsdon (1985) relataram eficiência de remoção de coliformes de 95% para uma camada filtrante de 48 cm de espessura, enquanto que, para filtros com 97 cm de altura na camada filtrante, a eficiência de remoção de coliformes subiu apenas dois pontos percentuais, chegando a 97%.

Murtha e Heller (2003) realizaram pesquisas que indicaram que as remoções mais significativas de coliformes totais aconteceram nos primeiros 30 cm da camada filtrante, onde há uma maior atividade biológica. Alterações pouco relevantes aconteceram abaixo dessa região.

CAWST (2012) recomenda que a camada filtrante composta por areia do *biosand filter* seja de aproximadamente 55 cm de espessura, e que as camadas suporte, de separação e drenagem, sejam de 5 cm cada.

3.3.1.3.2 Espuma de poliuretano

A estrutura dos poliuretanos é composta basicamente de uma cadeia principal de polímeros contendo um grupo uretano. Essa tecnologia foi desenvolvida na Alemanha, em 1937, pelo químico alemão Otto Bayer (VILAR, 1998).

Segundo Isolani (2000), a espuma de poliuretano consiste em “um meio poroso não granular”. Isso se deve ao fato de que ocorrem reações químicas que liberam gás durante seu processo de produção. A liberação desse gás gera bolhas e faz com que o material resultante possua um aspecto esponjoso. Além da liberação de gás, a reação química causa a polimerização, onde moléculas menores combinam-se formando estruturas maiores, também conhecidas como macromoléculas.

A utilização de materiais sintéticos, como mantas e esponjas, é sugerida com o objetivo de deixar a manutenção do filtro mais prática, onde o processo de limpeza não necessitaria de raspagem do leito filtrante. Neste caso, a manta seria removida, lavada e reposicionada sobre a camada de filtração (RACHWAL; BAUER; WEST, 1999; FERRAZ; PATERNIANI, 2000 *apud* PIZZOLATTI, 2014).

Estudos com poliuretano vêm sendo realizados pelo menos desde o fim do século XX. No ano de 1990 o poliuretano foi analisado em associação com o carvão ativado, para o tratamento de ar, em um estudo apresentado por Le Cloirec e Baudu. No ano seguinte, um estudo apresentado por Sens, Azou e Martin utilizou uma espuma de poliuretano em um filtro de água, a fim de torná-la potável. Ambos os estudos não apresentaram resultados satisfatórios. Em 1992 houve o desenvolvimento de uma estação de tratamento de água portátil, para propósitos militares, por Sens, Martin e a *Bectra International S.A.*. Essa estação continha, em seu processo de filtração, uma espuma de poliuretano saturada com carvão ativado (ISOLANI, 2000).

Filtros lentos com manta sintética podem ter as espessuras dos seus leitos de filtração reduzidas, podendo chegar a aproximadamente 40 cm. Ainda, o período entre lavagens do filtro pode ser até cinco vezes maior, se comparadas às carreiras de filtração de filtros de areia da mesma espessura, que não utilizam manta sintética (DI BERNARDO; SABOGAL PAZ, 2008).

3.3.1.4 Limpeza do filtro lento

A retenção de impurezas presentes na água filtrada acarreta na colmatação do leito filtrante, que se dá de forma gradativa. Sendo assim, o filtro deve ser limpo quando o meio filtrante gerar uma perda de carga que venha a dificultar a filtração, fazendo com que esse processo se torne muito demorado (CAWST, 2012).

Segundo Pizzolatti (2014), a limpeza dos filtros lentos acontece através da raspagem de 1 a 5 centímetros da parte superior do meio filtrante, onde o material é removido, lavado e recolocado no leito de filtração. O fato da limpeza se dar apenas no topo do filtro faz com que a manutenção da unidade ocorra de forma mais prática (MACIEL, 2018).

Conforme Vargas (1998), parte do biofilme com intensa atividade biológica é removida durante a limpeza do filtro, e, para que essa camada se desenvolva novamente, é necessário um tempo de amadurecimento.

Em filtros com areia nova o tempo de maturação pós limpeza tende a ser maior, pelo fato do *schmutzdecke* ainda não ter se estabelecido. Após múltiplas carreiras de filtração e limpezas, o tempo de maturação tende a encurtar, pois a própria população de microrganismos já consolidados na extensão do filtro faz a reposição do biofilme (CRITTENDEN *et al.*, 2005).

Para a limpeza do *biosand filter* é recomendado o método *Swirl and Dump*, onde o usuário deve derramar água sobre a camada filtrante até o nível do difusor, removê-lo, e mergulhar a palma da mão até tocá-la na areia. Então, a mão deve fazer movimentos circulares à medida que o topo da camada filtrante é raspado, e o líquido resultante da agitação deve ser removido com o auxílio de um copo. Após isso, precisará ser feito o nivelamento da areia no topo do leito de filtração. O difusor deve ser lavado e recolocado sobre o leito filtrante. O processo de filtração pode, então, ser reiniciado. Caso a vazão continue muito baixa, o processo *Swirl and Dump* deverá ser realizado novamente até que ela aumente (CAWST, 2012).

4 METODOLOGIA

4.1 LOCALIZAÇÃO

As coletas, ensaios e análises ocorreram em sua totalidade dentro do campus Trindade da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC).

4.2 ÁGUA DE ESTUDO

A água utilizada na pesquisa foi fabricada através da mistura da água da rede de abastecimento com a água do lago da UFSC, que está localizado próximo ao Restaurante Universitário, Centro de Eventos e Centro de Convivência do *campus*.

4.2.1 Local de coleta

O lago da UFSC (Figura 3-A) possui em média 1,15 metros de profundidade (UFSC, 2010), e uma área aproximada de 854,81 m², aferida pelo *software Google Earth*. Seu volume hídrico resultante é de 983,03 m³. As coordenadas geográficas do ponto de coleta (Figura 3-B) foram obtidas através de um aplicativo GPS, e são 27°36'08,2"S; 48°31'14,8"O.

Este corpo hídrico possui finalidade paisagística, não sendo utilizado para consumo humano. Além do objetivo estético, o lago funcionava como *habitat* para diversos peixes e aves (Figura 3-C). Em todo o seu perímetro há uma cerca para evitar possíveis quedas acidentais.

Figura 3 – Local de coleta

Figura 3-A: Lago da UFSC; Figura 3-B: Ponto de Coleta; Figura 3-C: Lago como *habitat*

Fonte: Elaboração própria (2023)

4.2.2 Produção da água de estudo

A água coletada era misturada e diluída com água da rede pública de abastecimento, na proporção de 20% de água do lago para 80% de água da rede. Em termos absolutos, eram misturados 1,3 litros de água coletada com 5,2 litros de água da rede, totalizando 6,5 litros de água da mistura a ser filtrada. A partir deste volume, cada filtro era abastecido diariamente com

3 litros, com uma sobra de 500 ml para o caso de haver alguma perda acidental de líquido durante o processo de diluição.

A diluição tinha como objetivo tornar a água de estudo com uma turbidez entre 4 e 10 NTU, sendo 10 NTU o valor máximo recomendado por Di Bernardo (1993, *apud* DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999) para a água a ser filtrada.

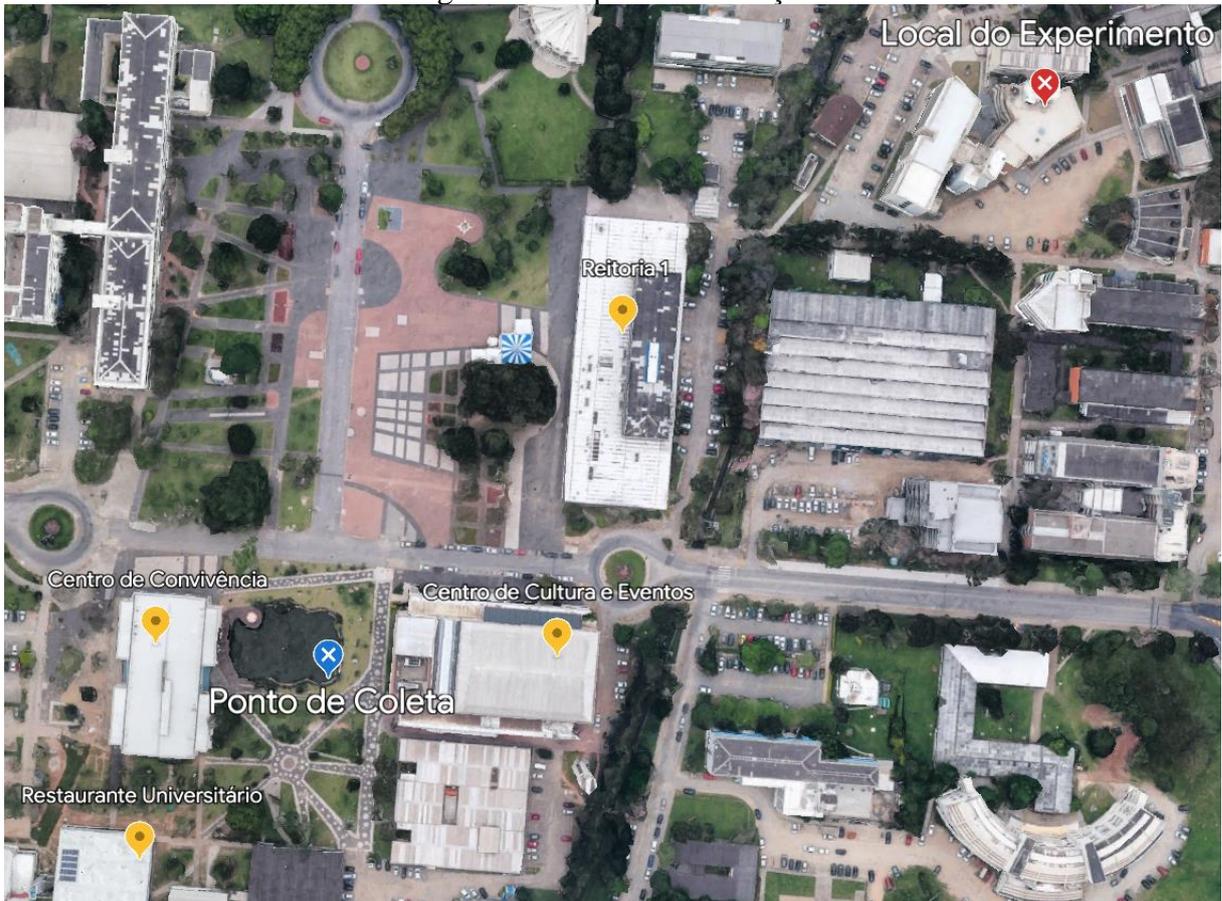
A água da rede provinha do sistema de abastecimento municipal, operado pela Companhia Catarinense de Águas e Saneamento (CASAN). Por se tratar de uma água proveniente de um sistema de abastecimento de água (SAA), ela permanecia reservada em galões, por, no mínimo, 24 horas antes de cada diluição, para que houvesse a evaporação do cloro residual presente nela. CAWST (2012) menciona que a camada biológica presente no leito filtrante não deve entrar em contato com o cloro, pois a sua capacidade desinfetante poderá eliminar o biofilme responsável pela eficiência na remoção de impurezas do sistema.

4.3 LOCAL DA PESQUISA

O experimento foi realizado na sala de pilotos do Laboratório de Potabilização das Águas (LAPOÁ), no departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental da UFSC. Os filtros foram instalados próximos à janela do laboratório, para que pudessem ser alimentados pela janela durante feriados e finais de semana, uma vez que o LAPOÁ não se encontrava aberto durante esses dias.

A distância entre o local de coleta e o local onde os ensaios eram feitos é de aproximadamente 390 metros, sendo percorrida em poucos minutos a pé. Os ensaios e análises eram feitos imediatamente após cada coleta, em sua grande maioria no período matutino.

Figura 4 – Mapa de localização



Fonte: Elaboração própria (2023)

4.4 DESCRIÇÃO DOS FILTROS

Os filtros utilizados no estudo são filtros lentos, de fluxo descendente e de regime intermitente. Eles foram dimensionados e confeccionados em estudo realizado por Fazolo (2023), que os operou no período de 04 de junho de 2021 a 27 de dezembro de 2021, alcançando a estabilização biológica em ambos os filtros.

O presente trabalho deu continuidade aos estudos de Fazolo (2023), utilizando os mesmos filtros empregados em sua pesquisa, com a espuma de poliuretano previamente aclimatada por ele, assim como os leitos filtrantes também já estabilizados biologicamente. O período de operação dos filtros deste trabalho teve início em 28 de dezembro de 2021, e término no dia 18 de novembro de 2022, totalizando 325 dias corridos.

Os filtros (Figura 5) possuem 1,0 m de altura, e foram construídos em tubos de policloreto de vinila, comumente conhecido como PVC, com diâmetro nominal de 100 mm. De acordo com Fazolo (2023), cada filtro consiste em:

- Camada filtrante de areia, com 40 cm de altura;
- Camada suporte formada por três camadas de pedregulhos, totalizando 10 cm de altura.

As três camadas possuíam granulometrias e espessuras, respectivamente, de:

- 2,00 mm a 3,18 mm, com 3 cm de espessura;
- 3,18 mm a 6,65 mm, com 3 cm de espessura; e
- 6,65 mm a 12,7 mm, com 4 cm de espessura.

Figura 5 – Filtros utilizados na pesquisa



À esquerda (1), filtro sem espuma; à direita (2), filtro com espuma

Fonte: Elaboração própria (2023)

A areia usada na camada filtrante possui coeficiente de uniformidade igual a 1,6, e diâmetro efetivo (d_{10}) de 0,30 mm. Sobre a camada filtrante de um dos filtros foi colocado o objeto de estudo deste trabalho, uma espuma de poliuretano de 2 cm de espessura, com

densidade igual à 15 kg/m^3 , recortada em formato circular para o devido encaixe na tubulação (FAZOLO, 2023).

Acima dos leitos filtrantes de cada filtro foi projetada uma lâmina d'água de 7 cm de altura, onde, no filtro sem espuma esses 7 cm são de apenas água, enquanto que no filtro com espuma tratam-se de 2 cm de espuma submersa e 5 cm de água. A função dessa lâmina d'água é manter a umidade na região, protegendo assim a camada biológica que viesse a se formar. Sobre a espuma foi colocada uma pedra para impedir que ela flutuasse devido à sua baixa densidade em relação à água (FAZOLO, 2023).

Também foi instalado um difusor de PVC acima dessa lâmina d'água, para que fosse reduzida a interferência da água ao ser despejada sobre o *schmutzdecke*. Além disso, o difusor também garante que a água escoe de forma mais homogênea sobre toda a superfície da camada biológica/filtrante.

4.5 REGIME DE ABASTECIMENTO E MANUTENÇÃO DOS FILTROS

Os filtros foram alimentados uma vez ao dia, com intermitência de 24 horas. A limpeza de cada filtro aconteceria quando a vazão atingisse um valor de vazão mínima. CAWST (2012) cita que vazões inferiores a 300 mL/min podem tornar o processo de filtração muito demorado, então, adotou-se como vazão mínima o valor de $36,48 \text{ mL/min}$, seguindo a proporção de áreas entre o filtro desenvolvido por CAWST (2012) e os filtros do estudo (FAZOLO, 2023).

Para o filtro sem espuma, a limpeza consistia na raspagem do *schmutzdecke*, onde essa camada biológica era raspada com uma espátula. A lâmina d'água concentrada com sobrenadante era succionada via sifonamento até outro recipiente. Caso houvesse a sucção acidental de alguma porção de areia, ela era então lavada com água destilada, e devolvida ao meio filtrante. Após isso era feito um nivelamento cauteloso, para que a camada filtrante não fosse compactada.

A mesma prática para o filtro com espuma era realizada, com a diferença de que a espuma também passava por um processo de lavagem. Ela era removida do filtro e mergulhada sucessivamente em cinco béqueres, com 500 mL de água de estudo cada. Durante sua imersão em cada béquer era feito um movimento de compressão e descompressão com as mãos, para que ela soltasse o líquido concentrado contido em seu interior. Após isso, era analisada a turbidez em cada béquer, a fim de observar o índice de retenção de impurezas das espumas.

4.6 PARÂMETROS ANALISADOS

Foram analisados os seguintes parâmetros, com suas respectivas frequências de análises (Quadro 2):

Quadro 2 – Frequências de análise para cada parâmetro

Parâmetro	Unidade	Frequência de análise
Condutividade Elétrica	μS/cm	Diariamente (segunda à sexta-feira)
OD	mg/L	
Sólidos Totais Dissolvidos	mg/L	
Temperatura	°C	
Turbidez	NTU	
pH	-	De terça à sexta-feira
Cor Aparente	uH	Duas vezes por semana
Cor Verdadeira	uH	
Coliformes totais	Presença ou ausência/100 mL	Semanalmente (a partir do mês de agosto)
<i>Escherichia coli</i>		

Fonte: Elaboração própria (2023)

Para os parâmetros coliformes totais e *Escherichia coli* foram verificadas apenas a presença ou ausência em 100 mL, uma vez que, durante o período da pesquisa, o laboratório não dispunha de insumos para a quantificação desses microrganismos. Os ensaios de coliformes totais e *E. coli* aconteceram semanalmente, entre o dia 03 de agosto de 2022 e o fim do experimento.

As análises foram realizadas de acordo com as metodologias descritas no *Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater* (APHA, 2017). Além dos parâmetros citados anteriormente, também foi avaliado um parâmetro para indicar a operacionalidade do sistema, que se tratava da vazão inicial de cada filtro. Tais vazões foram mensuradas através de um béquer e de um relógio com cronômetro.

Quadro 3 – Equipamentos utilizados para cada parâmetro

Parâmetro	Marca do equipamento/produto	Modelo/produto utilizado
OD	HACH	Turbidímetro 2100 N
Temperatura		Sonda portátil HQ40d
Turbidez		
Condutividade Elétrica	AZ	Sonda portátil 8306 AZ
Sólidos Totais Dissolvidos		
pH	KASVI	pHmetro K39-0014PA
	AKSO	pHmetro AK90
Cor Aparente	HACH	Espectofotômetro DR 3900
Cor Verdadeira		
Coliformes totais	IDEXX	Colilert (e luz ultravioleta, para <i>E. coli</i>)
<i>Escherichia coli</i>		

Fonte: Elaboração própria (2023)

4.7 ENSAIOS

O aferimento da vazão inicial era feito com os primeiros 100 mL a saírem de cada filtro. As análises de temperatura e oxigênio dissolvido eram realizadas *in loco*, no próprio filtro. Análises de condutividade elétrica, sólidos totais dissolvidos e turbidez eram feitas no laboratório de análises do LAPOÁ.

Já as análises de cor aparente, cor verdadeira, pH, coliformes totais e *E. coli*, eram feitas no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), no departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental. Portanto, as análises realizadas neste espaço estavam sujeitas à disponibilidade de dias e horários deste laboratório, uma vez que o mesmo costumava receber aulas práticas ocasionalmente, o que impossibilitava a utilização de seus equipamentos durante o horário dessas aulas.

No dia 13/05/2022 a espuma que vinha sendo utilizada (espuma 1) foi substituída por uma espuma nova e limpa (espuma 2), para que pudesse ser analisada a influência da troca de espuma sobre aquele filtro.

5 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão expostos os resultados decorrentes das análises diárias realizadas no experimento, bem como a comparação destes resultados com os valores apresentados pela literatura acadêmica e pela Portaria de Consolidação nº 5/2017, Anexo XX, alterada pela Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021), que estabelece o padrão de potabilidade da água para consumo humano em todo território nacional. Também serão apresentados e comparados os resultados referentes à limpeza de ambos os filtros. O cálculo dos valores médios e a criação dos gráficos para cada parâmetro foram realizados através do *software Microsoft Excel*.

5.1 EFICIÊNCIA SOBRE A QUALIDADE DA ÁGUA

Esta seção irá abordar as características de cada filtro para os parâmetros adotados inicialmente. Alguns dos parâmetros monitorados nesta pesquisa possuem padrões estabelecidos pela legislação brasileira e serão comparados com a Portaria nº 888/2021. Também foram monitorados os demais parâmetros que não constam na Portaria, com o objetivo de verificar a influência e o comportamento dos filtros sobre eles.

Os resultados das análises deste trabalho estão apresentados na Tabela 4. Nos Apêndices A e B estão expostos os resultados das análises para cada período do experimento, sendo o período 1 (Apêndice A) referente à primeira espuma utilizada, e o período 2 referente à segunda espuma (Apêndice B).

Tabela 4 – Resumo dos resultados

	Água de Estudo	Filtro sem espuma	Filtro com espuma	Valores de referência (Portaria nº 888/2021)
Condutividade e Elétrica ($\mu S/cm$) ($n = 188$)	80,98 ^a ± 3,20 ^b (75,0 – 88,4) ^c	82,43 ± 3,58 (75,6 – 90,5)	82,07 ± 3,75 (75,2 – 90,4)	-
Cor Aparente (uH) ($n = 144$)	83,09 ± 17,00 (45 - 132)	16,65 ± 5,40 (8 – 43)	16,60 ± 5,79 (8 - 37)	15

Cor				
Verdadeira (uH) (n = 81)	28,77 ± 5,38 (15 - 42)	11,30 ± 3,55 (5 - 25)	11,23 ± 4,24 (5 - 27)	-
Oxigênio				
Dissolvido (mg/L) (n = 188)	8,43 ± 0,62 (7,01 - 9,64)	0,36 ± 0,29 (0,14 - 3,66)	0,33 ± 0,19 (0,15 - 1,32)	-
Potencial de Hidrogênio (n = 148)	7,44 ± 0,58 (6,5 - 11,3)	7,24 ± 0,53 (6,4 - 10,6)	7,23 ± 0,56 (6,0 - 10,7)	6,0 a 9,0
Sólidos				
Totais Dissolvidos (mg/L) (n = 188)	40,49 ± 1,60 (37,5 - 44,2)	41,22 ± 1,80 (37,8 - 45,3)	41,03 ± 1,87 (37,6 - 45,2)	500
Temperatura (°C) (n = 188)	22,12 ± 3,55 (15,4 - 30,1)	22,19 ± 3,55 (15,6 - 31,2)	22,07 ± 3,58 (14,9 - 29,7)	-
Turbidez (NTU) (n = 190)	6,66 ± 1,17 (3,90 - 10,50)	0,97 ± 0,39 (0,42 - 2,92)	1,00 ± 0,41 (0,41 - 2,58)	95% das amostras < 1,0 NTU, e o restante < 2,0 NTU

Fonte: Elaboração própria (2023)

onde: a: valor médio
b: desvio padrão
c: intervalo de dados (valor mínimo – valor máximo)
n: número de amostras realizadas

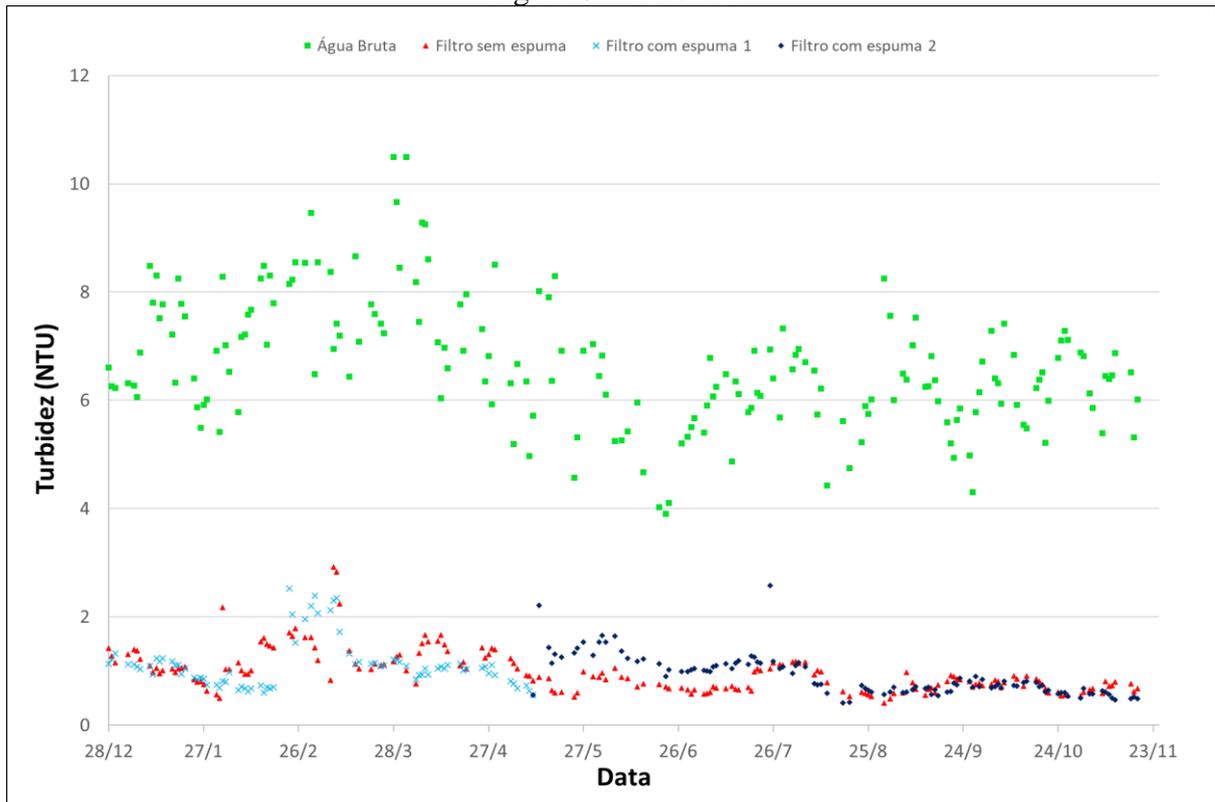
5.1.1 Turbidez

Segundo Tomazoni *et al.* (2005), a turbidez está relacionada à falta de transparência dos líquidos, causada pela presença de material em suspensão que obstrui a passagem de luz. Quanto maior a turbidez, menor será a transparência da água, o que conseqüentemente indica uma maior presença de material suspenso na solução. Fay e Silva (2006) mencionam que entre as principais fontes de turbidez podem ser citadas as areias, argilas, matéria orgânica e mineral, bem como plânctons e detritos suspensos no meio líquido.

De acordo com a SABESP (2023), a turbidez, bem como as cores aparente e verdadeira, são os principais parâmetros que caracterizam o aspecto estético da água. Tal aspecto é responsável pela aceitação ou rejeição do líquido pelo consumidor.

Os resultados das análises de turbidez estão demonstrados na Figura 6.

Figura 6 – Turbidez



Fonte: Elaboração própria (2023)

A água bruta teve turbidez média de 6,66 NTU, com valores variando entre 3,90 e 10,50 NTU. A turbidez média do filtro sem espuma foi igual a 0,97 NTU, variando entre 0,42 e 2,92 NTU, enquanto que o filtro com espuma apresentou turbidez média de 1,00 NTU, mínima de 0,41 NTU, e máxima igual a 2,58 NTU.

Para uma melhor eficiência do sistema, deve-se caracterizar a água bruta de acordo com a tecnologia do tratamento em estudo, para que seja verificada se a tecnologia é adequada àquele corpo hídrico. Como citado anteriormente neste trabalho, a água bruta a ser tratada por um filtro lento não deve exceder 10 NTU (DI BERNARDO, 1993 *apud* DI BERNARDO; BRANDÃO; HELLER, 1999). Tratando-se especificamente do *biosand filter*, CAWST (2012) menciona que a turbidez não deve ultrapassar 50 NTU, enquanto Manz (2007) propõe como valor máximo 20 NTU. A água bruta utilizada no estudo atendeu às recomendações.

A eficiência média de remoção para o filtro sem espuma foi de 85,4%, ao passo que o filtro com espuma de poliuretano reduziu, em média, 85,0% da turbidez ao longo de todo o experimento. Baseando-se apenas no filtro com espuma, não houve grandes alterações na eficiência de remoção após a substituição da espuma, indicando que o meio filtrante está

estabilizado, mantendo a mesma qualidade da água filtrada após a troca. A espuma 1 reduziu, em média, 84,7% da turbidez, enquanto que a espuma 2 desempenhou uma remoção média de 85,2%.

Ambos os filtros não atenderam à Portaria nº 888/2021, a qual estabelece que, para a filtração lenta, 95% das amostras devem possuir turbidez menor ou igual à 1,0 NTU; além de que o restante das amostras mensais não pode ser superior a 2,0 NTU (BRASIL, 2021). Neste sentido, o filtro sem espuma apresentou apenas 59,4% das amostras com turbidez igual ou inferior a 1,0 NTU, e 2,1% maiores que 2,0 NTU. Para o filtro com espuma, 54,2% das amostras tiveram turbidez igual ou inferior a 1,0 NTU, enquanto que 5,3% ultrapassaram o limite de 2,0 NTU.

Pela Figura 6 é possível perceber uma alta nos valores de turbidez em ambos os filtros, nos meses de janeiro a julho de 2022, bem como a presença de alguns picos de turbidez nos meses de janeiro, fevereiro, maio e julho. Tais elevações possivelmente decorrem de choques mecânicos ocasionados por agentes externos, como colisões acidentais contra as paredes dos filtros, que podem desprender as impurezas capturadas no meio filtrante, possibilitando que sejam carreadas até a saída do sistema. Também nota-se que, em ambos os filtros, há um incremento na turbidez da água tratada nos dias seguintes às limpezas do *schmutzdecke*. Isso ocorre devido à agitação dos primeiros centímetros da camada filtrante causada pela raspagem da areia, o que causa uma perturbação física no filtro, soltando impurezas contidas no biofilme. Apesar disso, a qualidade da água filtrada logo era restabelecida, indicando uma maturação adequada do meio filtrante.

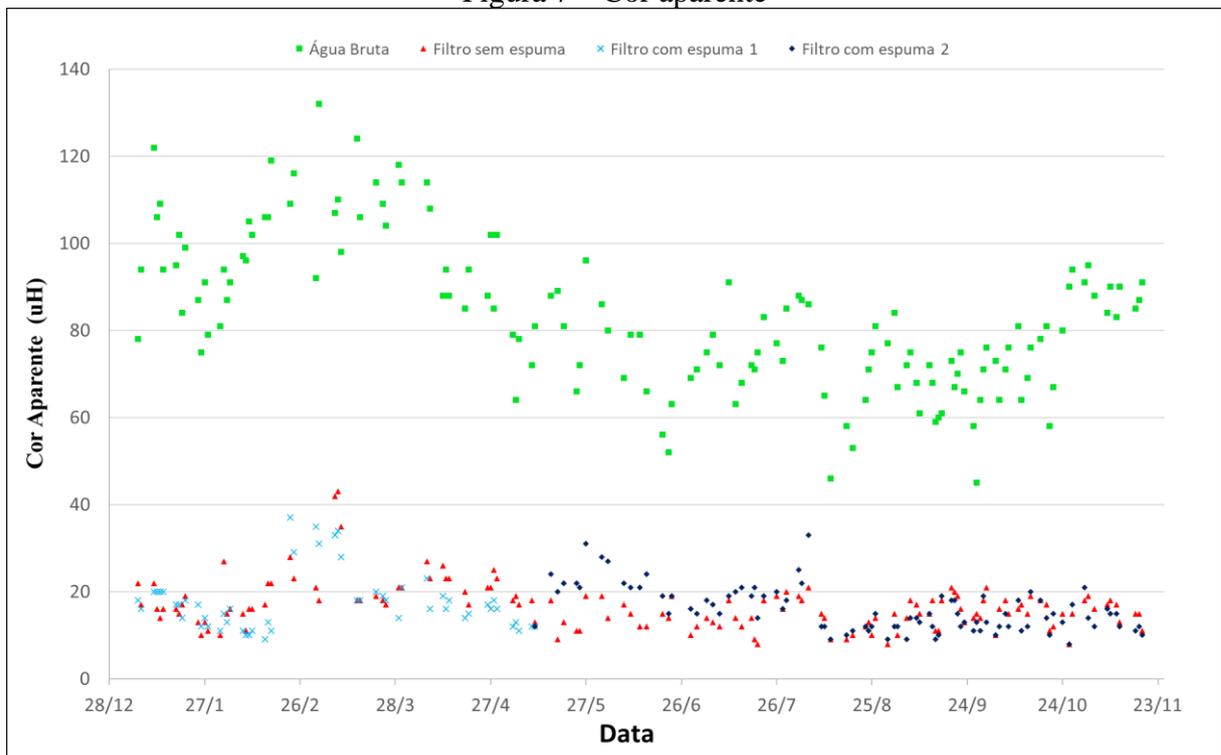
É notável que, a partir do mês de agosto, houve uma estabilização nos resultados de ambos os filtros, com valores relativamente baixos para a turbidez, se comparados ao restante do experimento. Se aplicarmos a Portaria nº 888/2021 para os resultados de agosto a novembro, temos que 92,4% das amostras do filtro sem espuma atenderam à Portaria, valor muito próximo dos 95% que ela estabelece. Por fim, o filtro com espuma atendeu à Portaria no período entre agosto e o fim do experimento, pois 95,4% das suas amostras apresentaram turbidez inferior a 1,0 NTU. Neste período, os valores de turbidez para ambos os filtros permaneceram abaixo de 2,0 NTU.

5.1.2 Cor aparente

Estevam, Silva e Silva (2019) citam que a cor da água é causada pela presença de solos, metais, matéria orgânica, plantas e animais microscópicos, e outras substâncias suspensas. A cor aparente está intrinsicamente relacionada à turbidez, visto que ela é aferida em amostras com turbidez e material suspenso e/ou coloidal. É possível constatar essa relação ao comparar o comportamento dos gráficos de turbidez (Figura 6) e cor aparente (Figura 7).

Azevedo Netto (1987) menciona que filtros lentos possuem eficiência de remoção de cor aparente entre 50 e 60%, enquanto Rocha *et al.* (2000) e Murtha e Heller (2003) apontaram, respectivamente, eficiências de 50% e 41%.

Figura 7 – Cor aparente



Fonte: Elaboração própria (2023)

A água bruta apresentou cor aparente média igual a 83,09 uH, variando entre 45 e 132 uH. Por sua vez, a água do filtro sem espuma teve valores de cor aparente entre 8 e 43 uH, com valor médio de 16,65 uH, enquanto a água oriunda do filtro com espuma teve cor aparente média de 16,60 uH, variando de 8 a 37 uH.

Nos filtros em estudo, as remoções foram de 79,9% para o filtro sem espuma, e 80,0% para o filtro com espuma, eficiências de remoção superiores às mencionadas anteriormente, encontradas na literatura.

Tomando por base apenas o filtro com espuma, pode-se perceber que sua eficiência de remoção não sofreu grandes alterações após a troca de espuma. No período relativo à primeira espuma a eficiência de remoção foi de 82%, caindo para 78,4% após a troca.

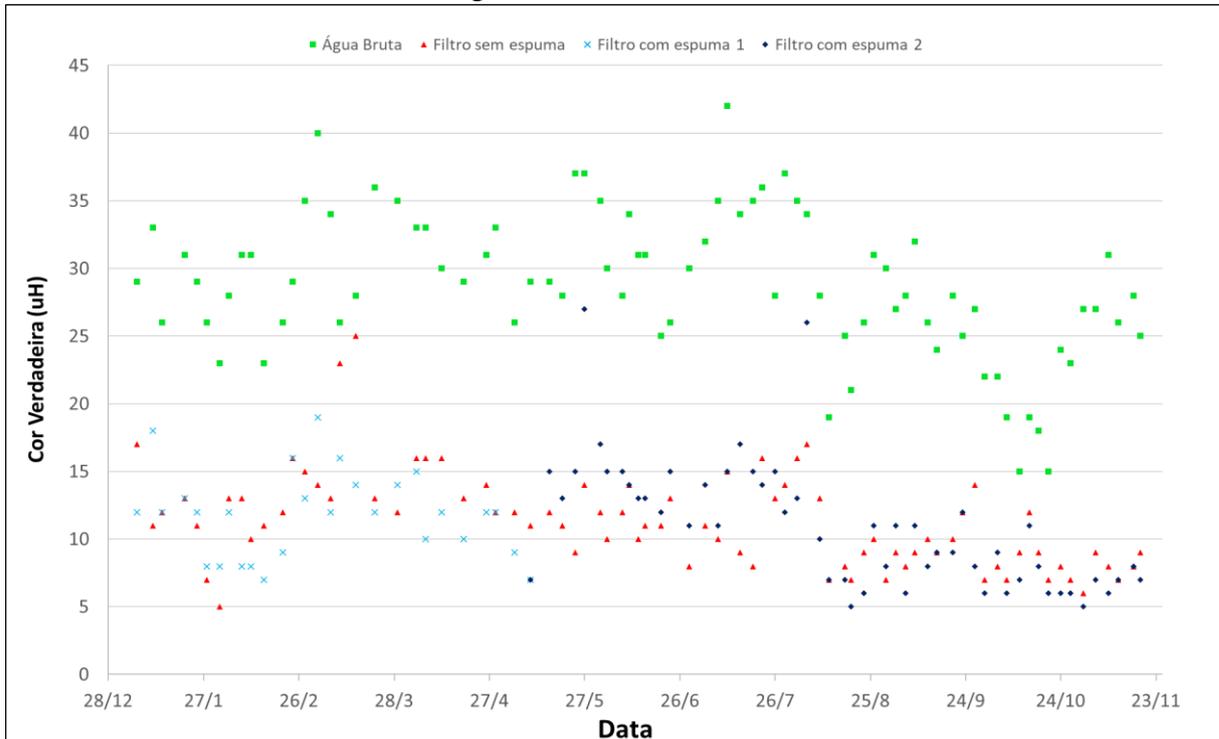
O valor máximo para a cor aparente de uma água potável é de 15 uH, segundo a Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021). A água proveniente do filtro sem espuma apresentou 33,3% das amostras dentro deste padrão de potabilidade, enquanto que o filtro com espuma obteve resultados um pouco melhores, com 42,3 % das amostras atendendo à Portaria nº 888/2021.

5.1.3 Cor verdadeira

De acordo com Estevam, Silva e Silva (2019), a diferença entre a cor verdadeira e a cor aparente é que na cor verdadeira a análise é realizada após a remoção da turbidez da amostra, através de processos de filtração ou centrifugação.

A Portaria nº 888/2021 não estabelece valores de referência para a cor verdadeira da água destinada ao consumo humano. A Figura 8 apresenta os resultados para este parâmetro ao longo do experimento.

Figura 8 – Cor verdadeira



Fonte: Elaboração própria (2023)

A cor verdadeira da água bruta variou entre 15 e 42 uH, com média de 28,77 uH, ao passo que, para a água oriunda do filtro sem espuma o valor médio para a cor verdadeira foi de 11,3 uH, variando de 5 a 25 uH. O filtro com espuma obteve cor verdadeira média de 11,23 uH, mínima de 5 uH, e máxima igual a 27 uH.

Ambos os filtros apresentaram eficiências de remoção muito próximas. O filtro sem espuma teve eficiência média de remoção de 60,7%, enquanto que, no filtro com espuma, o valor foi de 60,9%. Considerando apenas o filtro com espuma, não houve alterações significativas sobre a eficiência de remoção após a troca da esponja. A espuma 1 obteve eficiência de remoção de 60,8%, ao passo que a espuma 2 removeu 61% da cor verdadeira.

Estes resultados vão ao encontro de Di Bernardo, Brandão e Heller (1999), que mencionam uma deficiência do processo de filtração com relação à remoção de cor verdadeira. Isto se deve ao fato de que este parâmetro está relacionado à presença de substâncias dissolvidas na água, o que dificulta a sua remoção via processos físicos. Para uma remoção eficiente da cor verdadeira são recomendadas etapas de coagulação química.

Segundo Libânio (2010), a análise da cor verdadeira deve, preferencialmente, acontecer de maneira conjunta com as análises de pH, uma vez que a intensidade da cor

verdadeira aumenta à medida que o pH diminui. Esta relação pode ser observada pela comparação entre as Figuras 8 e 9.

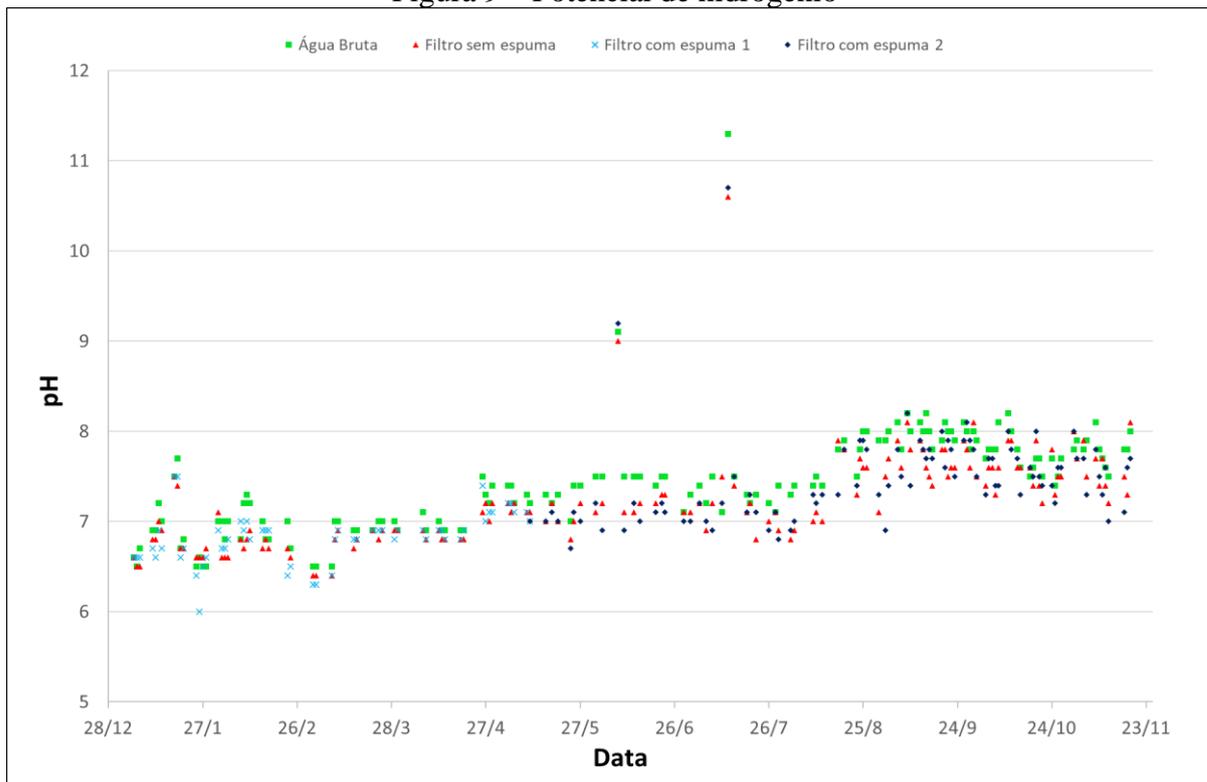
5.1.4 Potencial de Hidrogênio

O pH é uma escala logarítmica que define a acidez, a alcalinidade e a neutralidade das soluções. A escala aponta a concentração de cátions hidrônio ($\text{H}_3\text{O}^+_{(\text{aq})}$) livres por determinada unidade de volume. Os valores de pH podem variar de 0 a 14, e quanto maior seu valor, mais alcalina e menos ácida será a solução. A solução é considerada neutra quando o pH dela for igual a 7 (MACUGLIA; LOCATELLI, 2018).

Segundo Stenersen (2004), o pH de uma solução influencia diretamente a velocidade de degradação das substâncias nela presentes. Valores mais altos, de uma maneira geral, favorecem o consumo desses compostos. De acordo com Oliveira *et al.* (2010), a formação da camada biológica no leito filtrante está suscetível ao pH do sistema, sendo recomendados valores entre 6,5 e 9,5 para o desenvolvimento desses microrganismos. A Portaria nº 888/2021 (BRASIL, 2021) estabelece o pH entre 6,0 e 9,0 para que a desinfecção da água ocorra adequadamente.

Na Figura 9 estão apresentados os resultados analisados para o pH neste experimento.

Figura 9 – Potencial de hidrogênio



Fonte: Elaboração própria (2023)

Foram realizadas 148 análises de pH para cada filtro e para a água bruta. O pH médio da água bruta foi 7,44, o mínimo 6,5 e o máximo 11,3. Para a água oriunda do filtro sem espuma o pH médio foi de 7,24, com valores variando entre 6,4 e 10,6. A água proveniente do filtro com espuma teve valores de pH variando entre 6,0 e 10,7, e pH médio de 7,23.

Quase todas as amostras atenderam ao parâmetro estabelecido pela Portaria nº 888/2021, com exceção de dois dias, visíveis nos picos entre os meses de maio e julho do gráfico (Figura 9). Tal diferença pode ser atribuída ao fato de ter sido utilizado um pHmetro diferente do habitual nos dias em questão. Em ambos os filtros 99,3% das análises ficaram em conformidade com a legislação.

O filtro sem espuma apresentou 94,6% das amostras com pH favorável ao desenvolvimento de microrganismos, de acordo com a literatura citada anteriormente, ao passo que o valor foi de 93,9% no filtro com espuma.

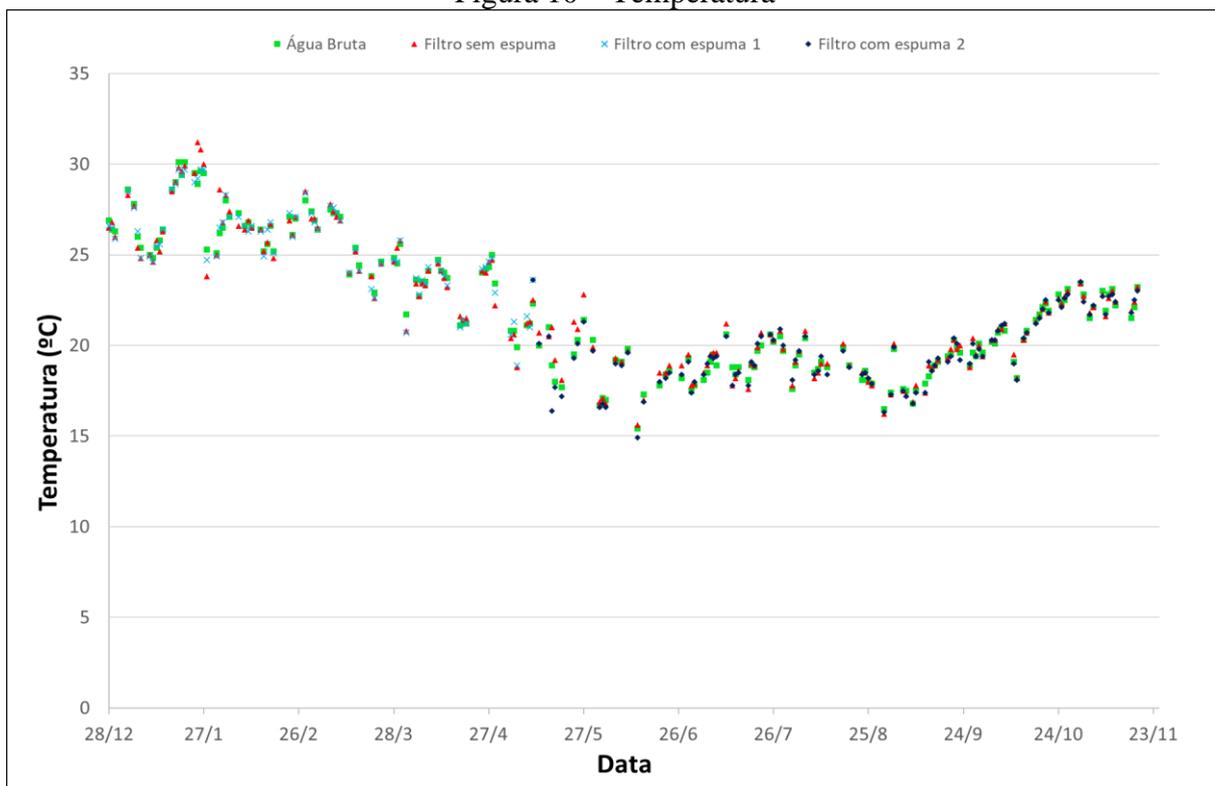
5.1.5 Temperatura

De acordo com Silva (2004), a temperatura está relacionada à energia cinética das moléculas de um determinado material. A temperatura influencia diretamente a viscosidade dinâmica dos líquidos, onde a viscosidade aumenta com a redução da temperatura, aumentando assim a sua resistência ao escoamento (MURTHA, 1998). Bühler (2016) cita que a velocidade das reações químicas em um sistema é diretamente proporcional à sua temperatura.

Entretanto, uma das principais funções da temperatura é favorecer o desenvolvimento dos microrganismos no biofilme. Temperaturas entre 10 e 40 °C beneficiam a ação biológica (SANT'ANNA JUNIOR, 2010). Stenersen (2004), por sua vez, diz que a taxa de degradação biológica cresce à medida que a temperatura sobe, indicando aumento na massa biológica.

Os resultados das análises de temperatura estão na Figura 10:

Figura 10 – Temperatura



Fonte: Elaboração própria (2023)

A temperatura da água bruta variou de 15,4 a 30,1 °C, e sua média foi de 22,1 °C. A água proveniente do filtro sem espuma teve uma temperatura entre 15,6 e 31,2 °C, enquanto sua média foi de 22,2 °C. A água oriunda do filtro com espuma teve temperatura mínima de

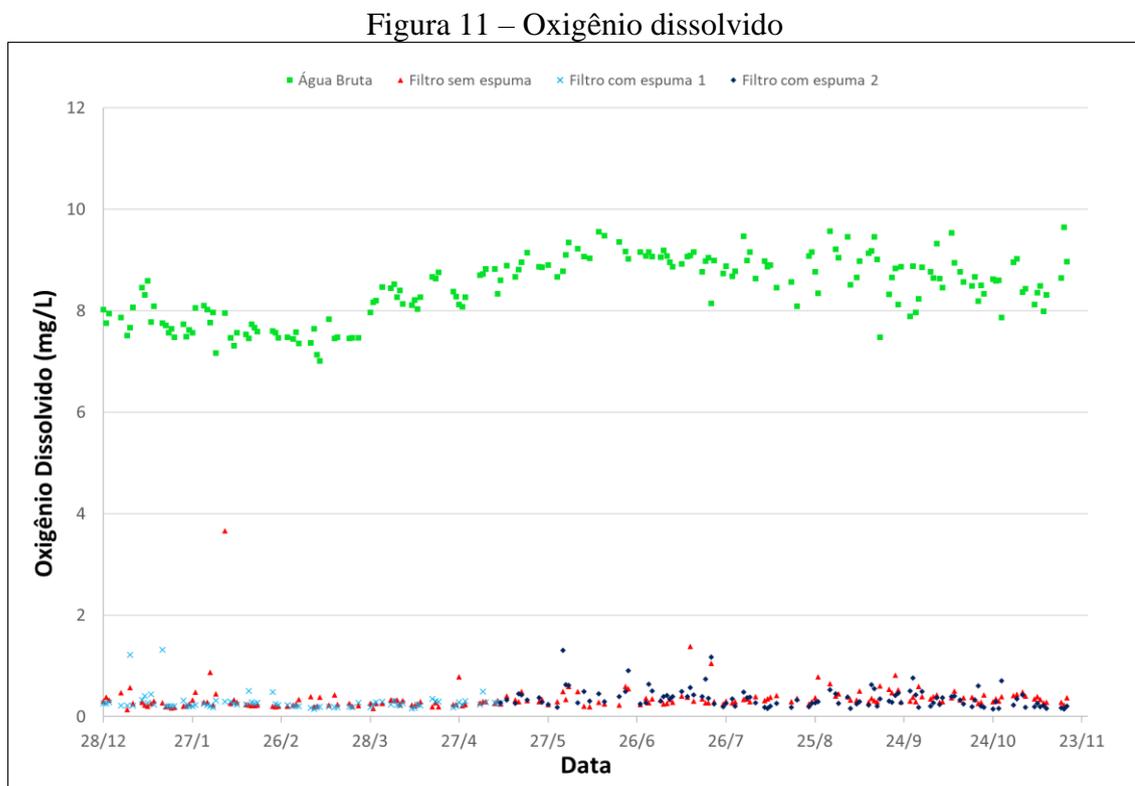
14,9 °C, máxima de 29,7 °C, e média de 22,1 °C. Para este estudo, a temperatura não foi um fator limitante à atividade da camada biológica, uma vez que 100% das amostras permaneceram dentro do intervalo citado anteriormente pela literatura, para um desenvolvimento apropriado dos microrganismos no meio filtrante.

É possível notar a variação sazonal das temperaturas, seguindo a tendência das estações do ano e das circunstâncias climáticas, como a incidência solar durante a coleta de amostras. Não houve alterações significativas exercidas pelos filtros sobre a temperatura das águas filtradas.

5.1.6 Oxigênio Dissolvido

Segundo Manz (2007), o metabolismo dos microrganismos presentes na água depende da disponibilidade de oxigênio dissolvido. Valores baixos de OD na água bruta podem dificultar a remoção de parasitas, vírus e bactérias. O oxigênio dissolvido é consumido devido à ação biológica, e há um maior consumo de OD na camada presente no topo e nos centímetros iniciais da camada filtrante (PIZZOLATTI, 2014).

A Figura 11 apresenta os resultados para as análises de OD.



Fonte: Elaboração própria (2023)

O oxigênio dissolvido na água bruta teve um valor médio de 8,43 mg/L, mínimo de 6,14 mg/L, e máximo de 9,64 mg/L. A água proveniente do filtro sem espuma teve OD médio igual a 0,36 mg/L, e seus valores variaram de 0,14 a 3,66 mg/L. Já a água filtrada pelo filtro com espuma teve OD variando de 0,15 a 1,32 mg/L, enquanto seu OD médio foi de 0,33 mg/L. A redução na concentração de OD para o filtro sem espuma foi de 95,7%, enquanto que no filtro com espuma foi de 96,1%.

As reduções dos índices de OD demonstram que houve consumo do oxigênio presente na água bruta, indicando uma possível atividade biológica no interior dos filtros. Mesmo no período pós-limpezas, onde há grande distúrbio na camada filtrante devido à raspagem, não houve grandes variações no consumo de oxigênio dissolvido, o que caracteriza uma adequada estabilização biológica do filtro.

Através da Figura 11 é possível notar uma tendência de aumento nos valores de OD para a água bruta a partir do mês de março. Isso se deve ao fato de que águas com temperaturas mais baixas possuem maior retenção de oxigênio dissolvido, em comparação a águas mais quentes (CETESB, 2023). Em temperaturas mais altas há uma maior agitação a nível molecular, o que facilita o desprendimento do OD presente no líquido (FONTENELLE; ALMEIDA, 2014).

5.1.7 Sólidos totais dissolvidos

Segundo Jaques (2005), os sólidos dissolvidos presentes em águas naturais são compostos basicamente de “carbonatos, bicarbonatos, cloretos, sulfatos, fosfatos e possivelmente nitratos de cálcio, magnésio, potássio e pequenas quantidades de ferro e outras substâncias”.

A ingestão de água contendo altas concentrações de sólidos totais dissolvidos (STD) pode, a longo prazo, resultar em um quadro de urolitíase, também conhecida como cálculo nos rins. Os STD também alteram o sabor da água e podem ocasionar o desgaste de tubulações (SANTOS; MOHR, 2013).

A Figura 12 apresenta os resultados para as análises de sólidos totais dissolvidos ao longo do experimento.

Figura 12 – Sólidos totais dissolvidos



Fonte: Elaboração própria (2023)

A água bruta teve um STD médio de 40,49 mg/L, mínimo de 37,5 mg/L e máximo de 44,2 mg/L. A água oriunda do filtro sem espuma apresentou valor médio de STD igual a 41,22 mg/L, mínimo de 37,8 mg/L e máximo de 45,3 mg/L. Já a água filtrada no sistema com espuma de poliuretano obteve valor médio de STD igual a 41,03 mg/L, mínimo de 37,6 mg/L e máximo de 45,2 mg/L.

Notou-se um aumento nas concentrações de STD após ambas as filtrações, que possivelmente foi ocasionado por ação antropogênica, como, por exemplo, choques mecânicos contra as paredes externas dos filtros. Tais interferências fazem com que seja desprendida parte dos sólidos que estão aderidos à areia da camada filtrante, aumentando assim os teores de STD na saída do filtro.

Apesar deste aumento, os teores de sólidos totais dissolvidos da água bruta e das águas filtradas mantiveram-se dentro do valor aceitável estabelecido pela Portaria nº 888/2021 do Ministério da Saúde, que estipula o valor máximo permitido de 500 mg/L.

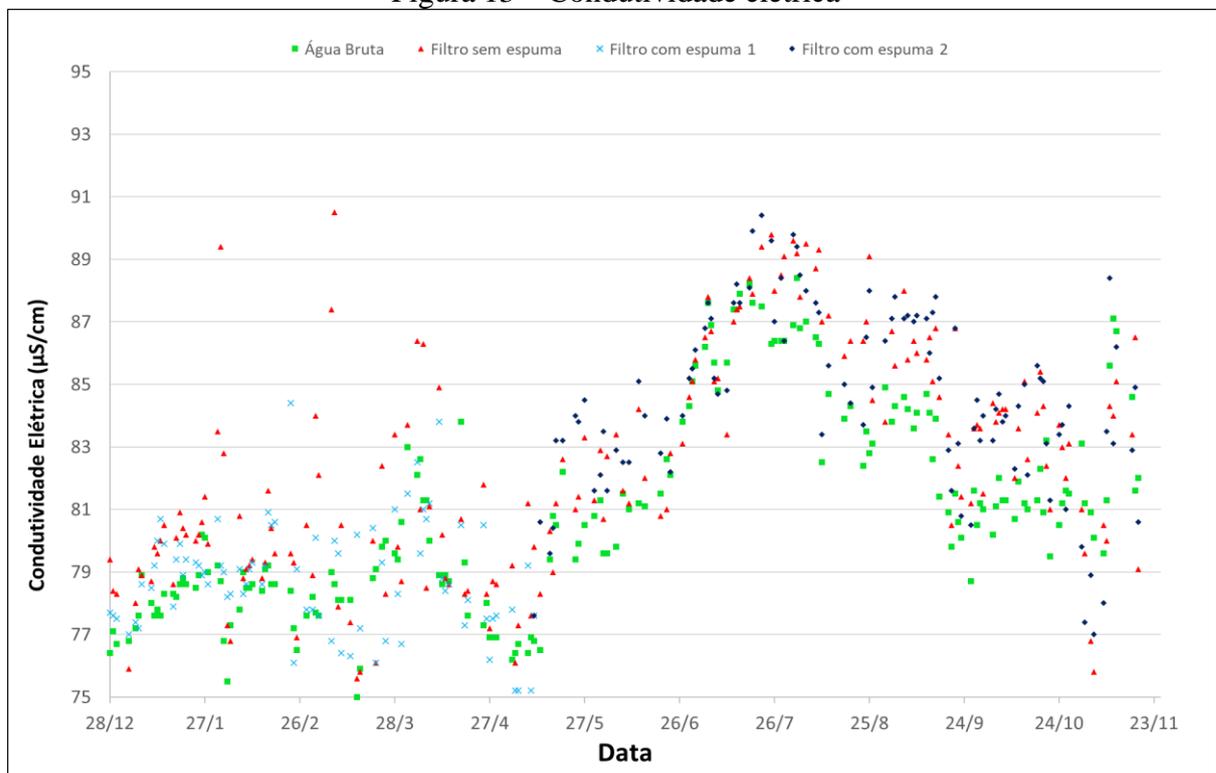
5.1.8 Condutividade elétrica

Segundo Libânio (2016), a condutividade elétrica de um líquido aponta a facilidade deste líquido em transmitir correntes elétricas. Essa característica se dá pela presença de íons no líquido, principalmente ferro e manganês. Também está relacionada à salinidade e aos sólidos totais dissolvidos na água, pois, quanto maior for a quantidade de sólidos, maior será a condutividade elétrica (SAMPAIO *et. al*, 2007). Tal relação fica evidente através da comparação entre os gráficos das análises de sólidos totais dissolvidos (Figura 12) e condutividade elétrica (Figura 13).

A Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021) não traz valores máximos de referência para a condutividade elétrica na água potável, no entanto, von Sperling (2007) cita que águas naturais possuem condutividades entre 10 e 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, e corpos hídricos contaminados com efluentes domésticos ou industriais manifestam condutividades maiores que 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$, podendo chegar a 1000 $\mu\text{S}/\text{cm}$.

A Figura 13 apresenta graficamente as análises de condutividade ao longo do experimento.

Figura 13 – Condutividade elétrica



Fonte: Elaboração própria (2023)

A água bruta teve uma condutividade elétrica média de 80,98 $\mu\text{S}/\text{cm}$, mínima de 75,0 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e máxima de 88,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Para a água filtrada sem espuma os valores foram, respectivamente, de 82,43 $\mu\text{S}/\text{cm}$, 75,6 $\mu\text{S}/\text{cm}$ e 90,5 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Por fim, o filtro com espuma apresentou condutividade média de 82,07 $\mu\text{S}/\text{cm}$, com valores variando de 75,2 a 90,4 $\mu\text{S}/\text{cm}$. Os filtros apresentaram variações positivas nos índices médios de condutividade em relação à água bruta. No filtro sem espuma o aumento foi de 1,8%, enquanto que no filtro com espuma foi de 1,4%.

Analisando apenas o filtro com espuma, é possível inferir que a troca de espuma não acarretou em alterações significativas sobre a eficiência do sistema, visto que, com a espuma 1 a condutividade ficou em média 0,5% maior que a da água bruta, enquanto que, com a espuma 2, o aumento na condutividade foi de 1,9%.

Considerando os valores citados anteriormente por von Sperling (2007), as condutividades das águas, tanto filtradas quanto bruta, encontram-se dentro da faixa relativa às águas naturais (10 a 100 $\mu\text{S}/\text{cm}$), mesmo considerando os valores máximos aferidos no experimento.

5.1.9 Coliformes totais e *Escherichia coli*

As bactérias do gênero *Enterobacteriaceae* (coliformes) estão normalmente presentes nos corpos hídricos. Tais bactérias podem ocasionar várias doenças, especialmente infecções no trato digestivo (MURRAY, 2000).

De acordo com Conte *et al.* (2004), os coliformes totais são bacilos que realizam respiração aeróbia ou anaeróbia facultativa, e estão presentes nos humanos e em alguns animais, como parte da microbiota existente no estômago e no intestino. Apesar disso, a presença dos coliformes totais na água não necessariamente indica a contaminação do corpo hídrico por fezes, uma vez que este grupo também engloba bactérias não entéricas. Por sua vez, o *Escherichia coli* é o principal indicador de contaminação fecal de um corpo hídrico, uma vez que este microrganismo naturalmente habita os intestinos de diversos mamíferos.

CAWST (2012) menciona que uma camada biológica ideal nos filtros lentos pode remover até 99% dos patógenos presentes na água. Michelin (2010) cita que filtros lentos podem remover até 83% dos coliformes totais, enquanto que, segundo Visscher (1990), os mesmos filtros podem remover de 95% a 100% dos coliformes termotolerantes.

Como já mencionado anteriormente, não foi efetuada a quantificação dos patógenos coliformes totais e *E. coli* no presente trabalho, em razão da carência de alguns insumos necessários para as análises. No entanto, realizou-se o aferimento da presença ou ausência desses microrganismos entre o mês de agosto e o fim da pesquisa.

O quadro 4 apresenta os resultados das análises de coliformes totais e *Escherichia coli* ao longo do experimento.

Quadro 4 – Coliformes totais e *E. coli*

		03/ago	10/ago	18/ago	24/ago	02/set	06/set	14/set	21/set	29/set	05/out	11/out	19/out	27/out	01/nov	09/nov	17/nov
Água Bruta	Coliformes Totais	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
	<i>E. coli</i>	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Filtro sem espuma	Coliformes Totais	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
	<i>E. coli</i>	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
Filtro com espuma	Coliformes Totais	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P
	<i>E. coli</i>	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P	P

P Presença em 100 mL

A Ausência em 100 mL

Fonte: Elaboração própria (2023)

Percebe-se que 100% das análises apontaram a presença de coliformes totais e de *Escherichia coli* em 100 mL de amostra. Como a quantificação não foi realizada, não fica possível concluir que houve redução no número destes microrganismos. No entanto, espera-se que tenha ocorrido remoção de patógenos, uma vez que os filtros em estudo tratam-se dos mesmos utilizados por Fazolo (2023), que obteve eficiência de remoção de aproximadamente 95% para os coliformes totais e *E. coli*, para ambos os filtros.

A Portaria GM/MS nº 888/2021 (BRASIL, 2021) cita, como padrão bacteriológico de uma água potável para consumo humano, a ausência de coliformes totais e de *E. coli* em 100 mL de água, ou seja, tanto a água bruta quanto as águas provenientes de ambos os filtros estão em desconformidade com a Portaria nº 888/2021. Cabe salientar, no entanto, que esta Portaria exige a etapa de desinfecção para toda e qualquer água destinada ao consumo humano.

5.2 LIMPEZA DOS FILTROS

Por se tratarem de tecnologias direcionadas ao abastecimento de pequenas unidades rurais em localizações remotas, um dos principais fatores a ser levado em consideração é o intervalo entre cada limpeza, também conhecido como carreira de filtração, pois é ela que define a frequência de limpeza para cada filtro. Filtros com carreiras de filtração muito curtas podem ser inconvenientes aos usuários devido à constante necessidade de limpeza (CAWST, 2012).

Outro ponto afetado pela duração das carreiras de filtração é a eficiência de remoção do sistema. É desejável que as carreiras de filtração sejam longas, pois após a limpeza dos filtros há uma redução natural na eficiência de remoção dos mesmos. Maiores carreiras de filtração estão relacionadas à melhores índices de remoção de patógenos. (CHAN *et al.*, 2015, ELLIOT *et al.*, 2008; KENNEDY *et al.*, 2013; SINGER *et al.*, 2017 *apud* MACIEL, 2018).

Os principais fatores que interferem sobre a frequência de limpeza dos filtros são as taxas de filtração, as propriedades do material filtrante e a qualidade da água bruta. O prolongamento das carreiras de filtração pode ser favorecido pela aplicação de menores taxas de filtração, e pela utilização de materiais filtrantes com maiores coeficientes de uniformidade (DI BERNARDO; RIVERA, 1996).

De acordo com Sánchez, Latorre e Galvis (1999), existe uma relação entre as colônias de microrganismos presentes no meio filtrante e a frequência de limpeza dos filtros. O equilíbrio ecossistêmico entre essas populações tende a aumentar à medida que a duração das carreiras de filtrações aumenta.

Para os filtros em estudo no presente trabalho, adotou-se, seguindo o que é proposto por CAWST (2012), a vazão inicial mínima de 36,48 mL/min para estipular a necessidade de limpeza de cada camada filtrante.

A Tabela 5 apresenta a duração das carreiras de filtrações.

Tabela 5 – Carreiras de filtração

Duração das carreiras de filtração (dias)		
Carreira nº	Filtro sem espuma	Filtro com espuma
1	36	57
2	35	79
3	28	102
4	56	87

5	49
6	48
7	73

Fonte: Elaboração própria (2023)

Pela Tabela 5 e pela Figura 14 nota-se que o filtro sem espuma necessitou de limpeza em sete momentos durante o período do experimento, enquanto o filtro com espuma precisou ser limpo apenas quatro vezes. O filtro sem espuma obteve carreira de filtração média de 46,4 dias, ao passo que o valor foi de 81,2 dias para o filtro com espuma, ou seja, o filtro com espuma levou, em média, 75% mais tempo para colmatar.

Pode-se dizer que o filtro com espuma atingiu melhores resultados devido à espuma de poliuretano posicionada sobre seu leito filtrante, que atuou como uma pré-filtração atuando na mesma unidade do filtro, retendo parte do material suspenso na água, conforme apresentado na Tabela 6. Tal retenção reduziu a carga de impurezas que chegava à camada filtrante, possibilitando uma menor velocidade de colmatação, e maiores intervalos entre limpezas.

A Tabela 6 apresenta os valores de turbidez da água utilizada nas limpezas das espumas, após a realização das lavagens.

Tabela 6 – Retenção de turbidez pela espuma

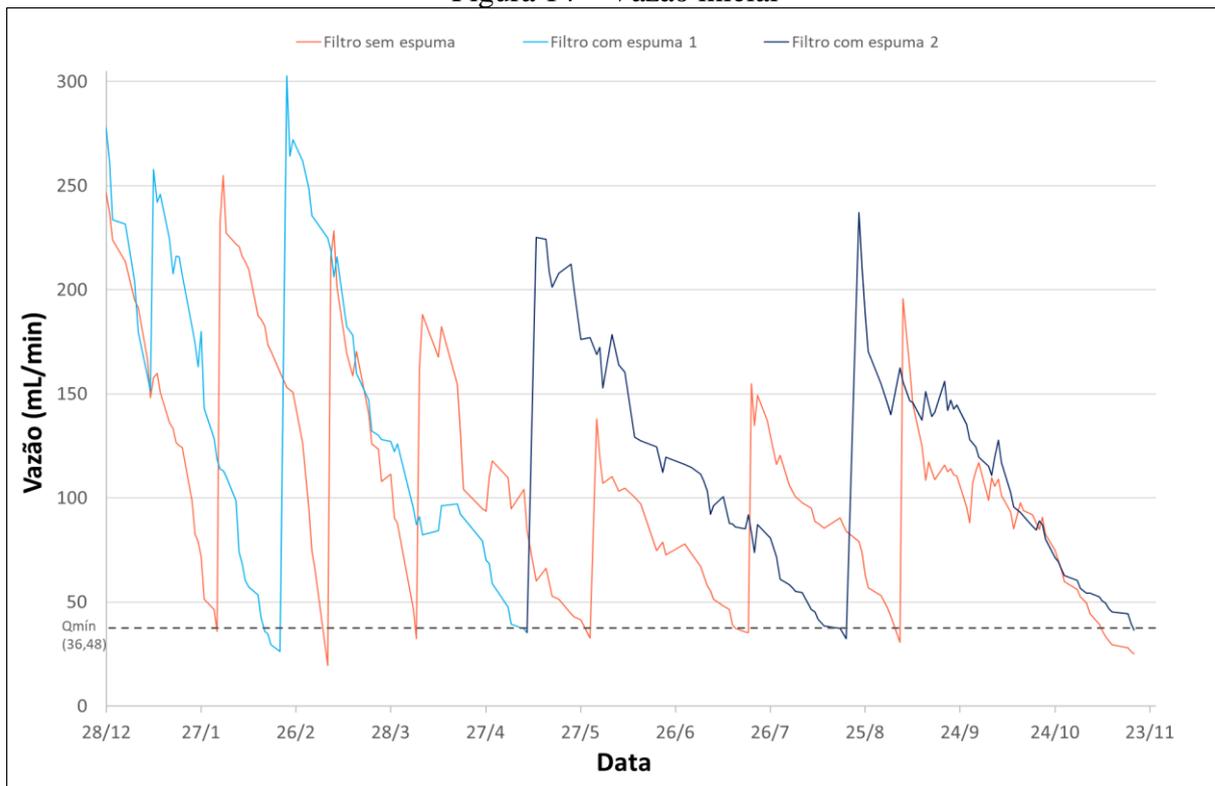
Turbidez retida na espuma em 500 mL de água bruta (NTU)				
Béquer	23/02/2022	13/05/2022	23/08/2022	18/11/2022
1	496	548	124	157
2	176	86,9	39,9	45,8
3	82,1	30,4	21,3	30,1
4	33,9	19,8	14,3	15,9
5	24,9	16,2	11,1	12,4

Fonte: Elaboração própria (2023)

Tomando por análise apenas o filtro com espuma, é possível perceber diferença entre as espumas 1 e 2 com relação às frequências de limpeza. A espuma 1 apresentou carreira de filtração média de 68 dias, enquanto a espuma 2 atingiu 94,5 dias, um aumento de 39% após a substituição.

A Figura 14 apresenta a variação das vazões iniciais dos filtros ao longo do experimento.

Figura 14 – Vazão inicial



Fonte: Elaboração própria (2023)

Os pontos de mínimo da Figura 14 são os momentos em que os filtros atingiram a colmatação, definida pela reta horizontal tracejada, que indica a vazão mínima de operação ($Q_{mín}$). Os picos apontam a vazão dos filtros logo após a realização das limpezas.

Nota-se que o filtro sem espuma teve a sua capacidade de recuperação de vazão reduzida ao longo do experimento, especialmente a partir do mês de abril. Isso possivelmente ocorreu devido a uma infiltração mais profunda das impurezas no seu leito filtrante, em relação ao filtro com esponja, pois grande parte dos sólidos suspensos mais grosseiros ficaram retidos na espuma de poliuretano. Como as camadas filtrantes de ambos os filtros eram limpas com a mesma metodologia, possivelmente a raspagem do leito filtrante sem espuma não foi suficiente para a desobstrução do sistema, sendo necessária uma raspagem mais profunda para a recuperação da vazão daquele filtro.

6 CONCLUSÃO

Tomando por base o que foi apresentado neste trabalho, é possível fazer as seguintes considerações:

- A água bruta utilizada estava dentro dos padrões recomendados pela literatura;
- Ambos os filtros não obtiveram resultados de turbidez em conformidade com a Portaria nº 888/2021, contudo, apresentaram bons índices de remoção, chegando a valores muito próximos dos estabelecidos pela Portaria nos últimos meses de pesquisa;
- As remoções de cor aparente em ambos os filtros foram superiores às encontradas na literatura, no entanto não atenderam à Portaria nº 888/2021;
- O filtro sem espuma obteve maior número de amostras dentro dos padrões de potabilidade para a turbidez, enquanto o filtro com espuma atendeu melhor à Portaria, baseando-se nas análises de cor aparente;
- Houve remoção de cor verdadeira em ambos os filtros, porém não muito significativa, indo ao encontro do que dizem diversos autores;
- Com algumas exceções pontuais, as amostras de pH estavam em conformidade com os padrões de potabilidade;
- Tanto o pH quanto a temperatura não sofreram grandes alterações após ambas as filtrações. Tais parâmetros mostraram-se favoráveis ao desenvolvimento de microrganismos no interior dos filtros, o que pode ser evidenciado pela redução na concentração de oxigênio dissolvido, indicativo de atividade biológica;
- Houve aumento nos índices de condutividade e sólidos totais dissolvidos após as filtrações, diferente do que era esperado, possivelmente causado por ação antropogênica acidental;
- Todas as análises de coliformes totais e *E. coli*, apresentaram desconformidade em relação à Portaria nº 888/2021, contudo, não é possível concluir que não houve remoção, pois não foi realizada a quantificação destes microrganismos. Em todo caso, é recomendável que seja realizada desinfecção após a filtração, para garantir a remoção de patógenos;
- De modo geral, ambos os filtros alcançaram eficiências de remoção muito próximas;
- Houve retenção de material suspenso nas espumas de poliuretano, fazendo com que as carreiras de filtração do filtro com espuma durassem consideravelmente mais, exigindo menor frequência de limpezas para este filtro;

- Para o filtro com espuma, não houve alterações significativas sobre a qualidade da água após a troca da mesma, no entanto, as carreiras de filtração aumentaram após a substituição da peça;

Baseando-se nestas observações, pode-se afirmar que a espuma de poliuretano não exerceu grande influência sobre a qualidade da água filtrada. Apesar disso, evidenciou-se sua capacidade em reter material suspenso na água, o que reduziu significativamente a frequência de colmatação do meio filtrante onde ela foi utilizada, e, por conseguinte, a realização de limpezas no filtro.

A utilização das espumas torna-se ainda mais vantajosa levando-se em conta que se trata de um material de fácil acesso e baixo investimento financeiro para a população em geral, além de não necessitar de capacitação avançada para a sua confecção, instalação e manutenção.

Como recomendações para trabalhos futuros sobre este tema, pode-se citar:

- Construção dos pilotos em escalas maiores, para facilitar o processo de limpeza;
- Utilização de espumas ou mantas de diferentes materiais, espessuras e densidades de poros, em configurações variadas, a fim de prolongar as carreiras de filtração;
- Avaliação da capacidade de recuperação das vazões após as limpezas do leito filtrante, com relação à profundidade de raspagem do *schmutzdecke*;
- Verificação da formação de subprodutos potencialmente cancerígenos, caso seja implementada etapa de desinfecção por cloro;
- Aplicação de etapa de coagulação para a aumentar a remoção da cor verdadeira;
- Construção de barreiras físicas que impeçam choques mecânicos contra as paredes dos filtros, a fim de evitar o desprendimento de sólidos da camada filtrante.

REFERÊNCIAS

- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7181**: Solo – Análise granulométrica. Rio de Janeiro, 2016, 12 p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 10520**: informação e documentação: citações em documentos: apresentação. Rio de Janeiro, 2002, 7p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 12216/92**: Projeto Estação de Tratamento de Água para abastecimento público. Rio de Janeiro, 1992, 18p.
- ABNT – ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 14724**: informação e documentação: trabalhos acadêmicos: apresentação. Rio de Janeiro, 2011.
- APHA; AWWA; WEF. **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater**. 23. ed. Washington DC: American Public Health Association. 2017. 1504 p.
- AZEVEDO NETTO, J. M. A. **Técnica de Abastecimento e Tratamento de Água**, vol 2. 3ª ed. São Paulo, CETESB, 1987.
- BARRET, J. M.; BRYCK, J. ; JANONIS, B. A. **Manual of design for slow sand filtration**. AWWA Research Foundation and American Water Works Association, 1991.
- BELLAMY, W. D.; HENDRICKS, D. W.; LOGSDON, G. S. Slow Sand Filtration: Influences of Selected Process Variables. **Journal of American Water Works Association**, v. 20, n. 12, 1985.
- BRASIL. Constituição. **Constituição da República Federativa do Brasil**. Brasília, DF: Senado Federal: Centro Gráfico, 1988.
- BRASIL. Lei Federal nº 14.026, de 15 de julho de 2020. Atualiza o marco legal do saneamento básico e dá outras providências. **Diário Oficial da União**; 15 jul. 2020.
- BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria nº 888, de 4 de maio de 2021 - Altera o Anexo XX da Portaria de Consolidação GM/MS nº 5, de 28 de setembro de 2017, para dispor sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade**. Diário Oficial da União. Brasília-DF, 2021.
- BRINCK, N. C. P.. **Avaliação do tipo de material filtrante no comportamento hidráulico de filtros rápidos de camada profunda no tratamento de águas de abastecimento**. 2009. 393 p. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2009.
- BÜHLER, B. F. **A influência da geologia e do uso e ocupação da terra na qualidade da água e composição sedimentar do córrego Jacobina, município de Cáceres – MT**. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Instituto de Ciências Naturais e Tecnológicas, Universidade do Estado de Mato Grosso – UNEMAT. Cáceres, 2016.

CAWST – CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY. **Biosand filter manual design, construction, installation, operation and maintenance.** Calgary, 2009. 129p.

CAWST – CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY. **Biosand Filter Construction Manual.** Calgary, 2012. 190p.

CAWST – CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY. **What is a Biosand Filter?**. 2023. Disponível em: <<https://www.cawst.org/services/expertise/biosand-filter/more-information>>. Acesso em 14 de abril de 2023.

CETESB – Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. **Oxigênio dissolvido.** Disponível em: <<https://cetesb.sp.gov.br/mortandade-peixes/alteracoes-fisicas-e-quimicas/oxigenio-dissolvido/>>. Acesso em 23 de abril de 2023.

CONTE, V. D. *et al.* **Qualidade microbiológica de águas tratadas e não tratadas na região nordeste do rio grande do sul.** Infarma, v. 16, n. 11-12, p. 83-84, 2004.

COSTA, R. H. R. **Estudos comparativos da eficiência de filtros lentos de areia convencionais e de fluxo ascendente.** Dissertação (Mestrado) - Universidade de São Paulo. São Carlos, 1980.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. **Water Treatment: Principles and Design.** 1. ed. New Jersey: Wiley, 2005.

DI BERNARDO, L.; BRANDÃO, C. C. S.; HELLER, L. **Tratamento de águas de abastecimento por filtração em múltiplas etapas.** Rio de Janeiro: ABES, 1999.

DI BERNARDO, L.; RIVERA, A. E. Influence of sand uniformity coefficient on slow sand filtration performance. **Advances in slow sand and alternative biological filtration.** 1. ed. Chichester: Wiley, 1996.

DI BERNARDO, L.; SABOGAL PAZ, L. P. **Seleção de tecnologias de tratamento de água.** vol 1 ed. São Carlos: LBiBe, 2008. p. 878

ESTEVAM, M.; SILVA, A. W. da; SILVA, F. F. da. 2019. **Physical analysis of entry water in the agro-industry system of tannery in the city of Maringá- Paraná.** Ciência E Natura, 41, e16.

FAY, E. F.; SILVA, C. M. M. S. **Índice de uso sustentável da água (ISA – Água) na região do sub - médio São Francisco.** 1. ed. Embrapa Meio Ambiente, 2006..

FAZOLO, T.. **Influência de uma esponja de poliuretano instalada no meio filtrante de um filtro lento intermitente, com destaque para aclimação do sistema.** 2023. 59p. TCC (Graduação) – Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2023.

FONTENELLE, M.; ALMEIDA, J. C. M.. Estudo da viabilidade técnica de uso do Venturi no processo de geração de microbolhas no sistema FAD. **Unoesc & Ciência** - ACET, Joaçaba, v. 5, n. 2, p. 159-168, jul./dez. 2014.

FUNASA – Fundação Nacional de Saúde. **Programa Nacional de Saneamento Rural**. Brasília: Funasa, 2019. 260p.

HALL, Ellen L.; DIETRICH, Andrea M. **A brief history of drinking water**. American water works association. 2000. 49p.

HUISMAN, L. **Research and demonstration project on slow sand filtration**. Reprinted for the AIDIS Congress Health in Panama, 1982

HUISMAN, L.; WOOD, W. E. **Slow Sand Filtration**. World Health Organization, Geneva: 1974.

INSTITUTO TRATA BRASIL/GO ASSOCIADOS. **Ranking do saneamento**. 2022. São Paulo, 139 p.

ISOLANI, D. **Filtração de águas de abastecimento com esponjas de poliuretano**. 2000. 156 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2000.

JAQUES, R. C.. **Qualidade da água de chuva no município de Florianópolis e sua potencialidade para aproveitamento em edificações**. 2005. 102 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2005.

KAWAMURA, S. Design and operation of high-rate filters. **Journal American Water Works Association**. [S.I.], v 91 n 12, 1999.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3ª edição, Campinas, SP: Átomo, 2010. 496p.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 4ª ed. Campinas, SP. Editora Átomo, 2016. 640p.

LIMA, A. de J.. **Análise comparativa da eficiência de filtros lentos com meios filtrantes convencional e não convencionais**. 2020. 134 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal de Sergipe, São Cristóvão, 2019.

LOO, S et al. Emergency water supply: a review of potential technologies and selection criteria. **Water research**, v. 46, 2012.

MACIEL, P. M. F. **Filtração lenta domiciliar como alternativa de tratamento de água em comunidades isoladas: eficiências com e sem controle de nível da água e aceleração do amadurecimento**. 2018. Tese (Doutorado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2018.

MACUGLIA, U.; LOCATELLI, A.. **Funções inorgânicas: vamos digerir?**. UPF – Universidade de Passo Fundo. Programa de Pós-Graduação em Ensino de Ciências e Matemática. Instituto de Ciências Exatas e Geociências – ICEG. 2017.

MANZ, David H; ENG, P. BioSand water filter technology household concrete design. **Retrieved October**, v. 22, 2007.

MEDINA, L. R. Uso de filtros lentos para el tratamiento de agua a nível domiciliar, **Ingeniería Hidráulica y Ambiental**, Nova York, 2000.

MICHELAN, D. C. G. S... **Filtração em Margem de Rio Procedendo a Filtração Lenta, para remoção de Carbofurano em Tratamento de Água para Consumo Humano**. Tese doutorado (Engenharia ambiental) – Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2010.

MURRAY, P. R. **Microbiologia médica**. 3. Ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2000. 73p.

MURTHA, N. A.; HELLER, L. **Avaliação da influência de parâmetros de projeto e das características da água bruta no comportamento de filtros lentos de areia**. Engenharia Sanitária e Ambiental, v. 8, 2003.

MURTHA, N. A.. **Avaliação da influência de variáveis hidráulicas, parâmetros de projeto e das características da água bruta na eficiência de filtros lentos de areia**. 1998. 227 p. Dissertação (Mestrado) - Curso de Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 1998.

OLIVEIRA, A. N.; FLOR, N. S.; OLIVEIRA, L. A. de. Influência do pH e temperatura sobre a atividade amilolítica de rizóbios isolados de solos da Amazônia. **Acta Amazonia**, vol. 40, 2010.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Resolução A/RES/64/292 – o direito humano à água e ao saneamento**, aprovada pela Assembleia Geral da ONU. Nova York, 03 de agosto de 2010. 3p.

ONU – Organização das Nações Unidas. **Resolution A/RES/70/1 – Transforming our world: the 2030 Agenda for Sustainable Development**. The General Assembly of United Nations, Seventieth session. October 21, 2015. 35p.

PINTO, C. S. **Curso básico de mecânica dos solos**. 3ª ed. São Paulo. Editora: Oficina de textos, 2006.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudo de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem**. 120 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental), Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, SC, 2010.

PIZZOLATTI, B. S. **Influência da técnica de limpeza de filtros lentos e diâmetro dos grãos sobre a qualidade da água produzida, com destaque para remoção de carbamatos e oocistos de *Cryptosporidium* (simulados por microesferas)**. 225p. Tese (Doutorado em

Engenharia Ambiental) – Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

ROCHA, N. A.; *et al.* **Avaliação da influência do sentido de escoamento na filtração lenta na remoção de cor em águas de abastecimento.** IX Simpósio Luso-brasileiro de Eng. Sanitária e Ambienta. ABES, 2000.

ROMERO, D. A. D. *et al.* Biosand filter as a point-of-use water treatment technology: influence of turbidity on microorganism removal efficiency. **Water**, v. 12, n. 2, ago. 2020.

SABESP – Companhia de Saneamento Básico do Estado de São Paulo. **Qualidade da água tratada.** 2023, Disponível em: <<https://www.sabesp.com.br/site/interna/Default.aspx?secaoId=40>>. Acesso em 02 de março de 2023.

SAMPAIO, S. C. *et al.* **Relação entre série de sólidos e condutividade elétrica em diferentes águas residuárias.** Irriga, Botucatu, v. 12, n. 4, p. 569-574, out./dez. 2007.

SÁNCHEZ, L. D.; LATORRE, J.; GALVIS, G. **Comportamiento de la poblacion de algas y protozoos despues de la limpieza de la biomembrana en un filtro lento en arena.** XX Congresso Brasileiro De Engenharia Sanitária E Ambiental, 1999, Rio de Janeiro: ABES,

SANT’ANNA JUNIOT, G. L.. **Tratamento biológico de efluentes: fundamentos e aplicações.** Interciência. Rio de Janeiro, 2010.

SANTOS, R. S.; MOHR, T. Saúde e qualidade da água: Análises microbiológicas e físico-químicas em águas subterrâneas. **Revista Contexto e Saúde**, v. 13. Editora Unijuí. Ijuí-RS, 2013.

SILVA, R. T. **Notas de Aula de Física Geral I.** Universidade Federal da Paraíba – UFPB, 2004.

SNIS – Sistema Nacional de Informações sobre Saneamento. Ministério do Desenvolvimento Regional. Secretaria Nacional de Saneamento. **Diagnóstico Temático Serviços de Água e Esgotos: Visão Geral, ano de referência 2021.** 2022. Brasília: SNS/MDR, 2022.

SORGATO, A. C.. **Desempenho de filtro lento intermitente utilizando diferentes meios filtrantes e granulometrias.** 2019. 121 p TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2019.

STENERSEN, J. **Chemical pesticides: mode of action and toxicology.** Florida: CRC Press, 2004. p. 274

TOMAZONI, J. C. *et al.* **Utilização de medidas de turbidez na quantificação da movimentação de sólidos por veiculação hídrica nas bacias dos rios Anta Gorda, Brinco, Coxilha Rica e Jirau – sudoeste do estado do Paraná.** Boletim Paranaense de Geociências, n. 57. Editora UFPR, 2005.

UNESCO – UNITED NATIONS EDUCATIONAL, SCIENTIFIC AND CULTURAL ORGANIZATION. **Imminent risk of a global water crisis, warns the UN World Water Development Report 2023**. Disponível em: <<https://www.unesco.org/en/articles/imminent-risk-global-water-crisis-warns-un-world-water-development-report-2023>>. Acesso em: 15 de abril de 2023.

UFSC – UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA. Agência de Comunicação da UFSC. **Escultura do boitatá ajuda a revitalizar campus da UFSC**. Disponível em: <<https://noticias.ufsc.br/2010/03/escultura-do-boitata-ajuda-a-revitalizar-campus-da-ufsc/>>. Acesso em: 21 de abril de 2023.

VARGAS, L. C. **Filtración lenta como proceso de desinfección**. (CEPIS/OPS, Ed.) Simposio regional sobre calidad del agua: desinfección efectiva. Lima: CEPIS. 1998.

VILAR, W. D.. **Química e Tecnologia dos Poliuretanos**. Editora Vilar Consultoria, 1998. 2ª ed.

VISSCHER, J. T.. Slow sand filtration: Design, operation, and maintenance. **Journal-American Water Works Association**, v. 82, 1990.

VON SPERLING, M. **Estudos de modelagem da qualidade da água de rios**. Belo Horizonte, MG. Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG, 2007. Vol. 7. 452 p.

APÊNDICE A – RESULTADOS PARA A ESPUMA 1

Resumo dos resultados para a primeira espuma (28/12/2021 a 13/05/2022):

	Água de Estudo	Filtro sem espuma	Filtro com espuma 1
<i>Condutividade Elétrica</i> ($\mu\text{S/cm}$) ($n = 82$)	78,39 ^a \pm 1,60 ^b (75,0 – 83,8) ^c	80,04 \pm 2,80 (75,6 – 90,5)	78,79 \pm 1,76 (75,2 – 84,4)
<i>Cor Aparente (uH)</i> ($n = 55$)	97,71 \pm 14,40 (64 – 132)	19,71 \pm 6,55 (10 – 43)	17,60 \pm 6,65 (9 – 37)
<i>Cor Verdadeira (uH)</i> ($n = 28$)	30,11 \pm 4,00 (23 – 40)	13,43 \pm 3,98 (5 – 25)	11,79 \pm 3,19 (7 – 19)
<i>Oxigênio Dissolvido</i> (mg/L) ($n = 80$)	7,91 \pm 0,45 (7,01 – 8,82)	0,32 \pm 0,40 (0,14 – 3,66)	0,28 \pm 0,18 (0,15 – 1,32)
<i>Potencial de Hidrogênio</i> ($n = 56$)	6,96 \pm 0,29 (6,5 – 7,7)	6,83 \pm 0,24 (6,4 – 7,5)	6,82 \pm 0,28 (6,0 – 7,5)
<i>Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)</i> ($n = 82$)	39,19 \pm 0,80 (37,5 – 41,9)	40,02 \pm 1,41 (37,8 – 45,3)	39,40 \pm 0,88 (37,6 – 42,2)
<i>Temperatura (°C)</i> ($n = 80$)	25,48 \pm 2,41 (19,9 – 30,1)	25,45 \pm 2,61 (18,8 – 31,2)	25,43 \pm 2,45 (18,9 – 29,7)
<i>Turbidez (NTU)</i> ($n = 82$)	7,34 \pm 1,16 (4,97 – 10,50)	1,26 \pm 0,41 (0,506 – 2,92)	1,12 \pm 0,45 (0,560 – 2,52)

Fonte: Elaboração própria (2023)

onde:

a: valor médio

b: desvio padrão

c: intervalo de dados (valor mínimo – valor máximo)

n: número de amostras realizadas

APÊNDICE B – RESULTADOS PARA A ESPUMA 2

Resumo dos resultados para a segunda espuma (13/05/2022 a 18/11/2022):

	Água de Estudo	Filtro sem espuma	Filtro com espuma 2
<i>Condutividade Elétrica ($\mu S/cm$)</i> (n = 106)	82,98 ^a ± 2,65 ^b (76,5 – 88,4) ^c	84,28 ± 2,99 (75,8 – 89,8)	84,60 ± 2,79 (77,0 – 90,4)
<i>Cor Aparente (uH)</i> (n = 89)	74,06 ± 11,25 (45 – 96)	14,75 ± 3,41 (8 – 21)	15,98 ± 5,14 (8 – 33)
<i>Cor Verdadeira (uH)</i> (n = 53)	28,06 ± 5,89 (15 – 42)	10,17 ± 2,74 (6 – 17)	10,94 ± 4,71 (5 – 27)
<i>Oxigênio Dissolvido (mg/L)</i> (n = 108)	8,82 ± 0,41 (7,48 – 9,64)	0,38 ± 0,16 (0,14 – 1,38)	0,36 ± 0,19 (0,15 – 1,31)
<i>Potencial de Hidrogênio</i> (n = 92)	7,73 ± 0,50 (7,0 – 11,3)	7,49 ± 0,49 (6,8 – 10,6)	7,48 ± 0,52 (6,7 – 10,7)
<i>Sólidos Totais Dissolvidos (mg/L)</i> (n = 106)	41,49 ± 1,32 (38,3 – 44,2)	42,14 ± 1,50 (37,9 – 44,9)	42,29 ± 1,40 (38,5 – 45,2)
<i>Temperatura (°C)</i> (n = 108)	19,63 ± 1,74 (15,4 – 23,4)	19,77 ± 1,77 (15,6 – 23,4)	19,57 ± 1,80 (14,9 – 23,5)
<i>Turbidez (NTU)</i> (n = 108)	6,13 ± 0,87 (3,90 – 8,29)	0,76 ± 0,17 (0,416 – 1,18)	0,91 ± 0,36 (0,411 – 2,58)

Fonte: Elaboração própria (2023)

onde:

a: valor médio

b: desvio padrão

c: intervalo de dados (valor mínimo – valor máximo)

n: número de amostras realizadas