



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

Maria Andreza França Lima

**Análise da atividade microbiológica através do ensaio enzimático e identificação de
microrganismos em filtros lentos intermitentes**

Florianópolis

2024

Maria Andreza França Lima

Análise da atividade microbiológica através do ensaio enzimático e identificação de microrganismos em filtros lentos intermitentes

Trabalho de Conclusão de Curso submetido ao curso de Engenharia Sanitária e Ambiental do Centro Tecnológico da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito parcial para a obtenção do título de Bacharela em Engenharia Sanitária e Ambiental.

Orientadora: Mirella Klausen da Silveira, MSc.
Coorientadora: Beatriz Silvestre Puchalski, MSc.

Florianópolis

2024

Ficha de identificação da obra.

Lima, Maria Andreza França

Análise da atividade microbiológica através do ensaio enzimático e identificação de microrganismos em filtros lentos intermitentes / Maria Andreza França Lima ; orientador, Mirella Klausen da Silveira, coorientador, Beatriz Silvestre Puchalski, 2024.

72 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade Federal de Santa Catarina, Centro Tecnológico, Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental, Florianópolis, 2024.

Inclui referências.

1. Engenharia Sanitária e Ambiental. 2. Filtro lento intermitente. 3. Comunidade microbiana. 4. Atividade enzimática. 5. Esponja de poliuretano. I. Silveira, Mirella Klausen da . II. Puchalski, Beatriz Silvestre . III. Universidade Federal de Santa Catarina. Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. IV. Título.

Maria Andreza França Lima

Análise da atividade microbiológica através do ensaio enzimático e identificação de microrganismos em filtros lentos intermitentes

Este Trabalho de Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do título de Bacharela e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental

Florianópolis, 11 de dezembro de 2024.

Insira neste espaço
a assinatura

Prof. Bruno Segalla Pizzolatti, Dr.
Coordenador do Curso

Banca examinadora

Insira neste espaço
a assinatura

Mirella Klausen da Silveira, MSc.
Orientadora

Marcelle Martins, MSc.

Avaliadora

Universidade Federal de Santa Catarina

Prof. Nelson Libardi Junior, Dr.

Avaliador

Universidade Federal de Santa Catarina

Florianópolis, 2024.

AGRADECIMENTOS

Aos meus pais, pelo apoio à educação ao longo de toda minha vida e por serem meus maiores incentivadores. Em especial à minha mãe, meu pilar de amor e força, agradeço profundamente por acreditar nos meus sonhos e me apoiar incondicionalmente. Mãe, não existem palavras suficientes para expressar o amor e a admiração que sinto por você, obrigada por tudo.

Ao meu irmão, minha cunhada e ao amigo de quatro patas Théo, por serem motivos de alegria em minha vida. O apoio de vocês foi fundamental durante este processo.

Ao Luiz Gustavo, meu companheiro de vida, por estar presente em todos os momentos, celebrando as conquistas, oferecendo conforto nos desafios e acreditando em mim até quando eu mesma não acreditava. Sua presença foi essencial para que eu pudesse concluir esta etapa da minha vida.

À minha orientadora Mirella, pela oportunidade de desenvolver esta pesquisa e, sobretudo, por me orientar com paciência e dedicação. Agradeço, ainda, pela valiosa contribuição em todas as etapas práticas deste trabalho, que foram fundamentais para sua realização. À minha coorientadora Beatriz, por todo suporte e pelo incentivo constante ao longo deste processo. Sou imensamente grata a vocês.

Aos meus amigos Maria, Carlos, Fernanda, Ana Paula, Josiane, Ana Alice, Iolly e Aline, minha profunda gratidão pelo apoio, companheirismo e pela amizade que tornaram meus anos de graduação mais leves. Às minhas amigas que conheci neste ano de estágio, Mariane e Isabela, obrigada pelas risadas, conversas e conselhos.

Ao professor Nelson e à Marcelle Martins, pela gentileza e disponibilidade em aceitarem o convite para participar da banca examinadora.

Aos bolsistas de iniciação científica do LAPOÁ por todo o suporte durante a realização da parte prática deste trabalho. Ao LIMA, especialmente aos profissionais Aline e Jorge, pela disponibilidade dos laboratórios e equipamentos e pelo auxílio durante esta pesquisa. As técnicas do LAMEB, Maísa e Elis, por todo o suporte no uso dos equipamentos. À técnica Mariana, do LCME, pela assistência no uso do laboratório. À bióloga Cândice e ao professor Leonardo, do LAFIC, por toda orientação e apoio na identificação dos microrganismos.

RESUMO

O acesso à água potável de qualidade ainda é um desafio em comunidades isoladas, demandando soluções acessíveis e eficazes para tratamento de água. A filtração lenta pode ser aplicada como uma solução de uso domiciliar, destacando-se por sua simplicidade, segurança e baixo custo. Essa tecnologia permite melhorar a qualidade da água diretamente na residência do consumidor e pode ser combinada com pré-tratamentos, como soluções baseadas na natureza (coagulante natural com sementes de *Moringa oleifera*) ou o uso de materiais sintéticos (esponja de poliuretano) aplicados sobre o meio filtrante, sendo uma alternativa para comunidades sem acesso à água própria para consumo humano. No filtro lento, a qualidade da água filtrada depende das interações entre as comunidades microbianas e processos físico-químicos de separação. Quando operados de forma intermitente, os filtros enfrentam pausas na alimentação, o que pode impactar a atividade biológica no meio filtrante. Além disso, fatores como a qualidade da água de entrada influenciam diretamente a eficiência do tratamento. Este trabalho avaliou a atividade microbiológica e a eficiência de filtros lentos intermitentes em escala domiciliar, utilizando diferentes configurações: filtro lento sem pré-tratamento (FLI), filtro lento com esponja de poliuretano (FLIE), filtro lento com água decantada (FLICD) e filtro lento com esponja e água decantada (FLIECD). Ao fim das operações das quatro unidades de filtração, a atividade microbiológica ao longo do meio filtrante, composto por areia, foi analisada pelo método de Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA), em conjunto com a avaliação do teor de matéria orgânica, enquanto a microestrutura das esponjas de poliuretano foi observada por microscopia eletrônica de varredura (MEV). Os resultados indicaram que as camadas superficiais do meio filtrante apresentam maior atividade microbiológica, podendo estar associada à presença de matéria orgânica. Além de promover o prolongamento da carreira de filtração das unidades, conforme relatado na literatura, a esponja de poliuretano mostrou-se eficaz na retenção de partículas e no suporte ao desenvolvimento do *schmutzdecke*. Essa eficácia foi comprovada por fotomicrografias que revelaram uma comunidade microbiana mais diversa no material em comparação à camada biológica observada no meio filtrante dos filtros alimentados pela mesma água. O pré-tratamento com sementes de *Moringa oleifera* influenciou no teor de matéria orgânica, impactando no desenvolvimento da diversidade microbiana no *schmutzdecke*. Este estudo contribuiu para o desenvolvimento de sistemas de tratamento de água acessíveis e sustentáveis, com potencial aplicação em comunidades de infraestrutura limitada, além de investigar sobre a atividade microbiológica das configurações propostas.

Palavras-chave: Filtro lento intermitente; Comunidade microbiana; Atividade enzimática; Hidrólise do diacetato de fluoresceína; Esponja de poliuretano.

ABSTRACT

Access to quality potable water remains a challenge in isolated communities, demanding accessible and effective water treatment solutions. Slow sand filtration can be applied as a household solution, standing out for its simplicity, safety, and low cost. This technology improves water quality directly at the consumer's residence and can be combined with pretreatment methods, such as nature-based solutions (natural coagulant *Moringa oleifera* seeds) or synthetic materials (polyurethane sponge) applied to the filter medium, offering an alternative for communities without access to safe drinking water. In slow filters, the quality of the treated water depends on interactions between microbial communities and physicochemical separation processes. When operated intermittently, the filters face feed interruptions, which may impact biological activity within the filter medium. Additionally, factors such as the quality of the influent water directly influence treatment efficiency. This study evaluated the microbiological activity and efficiency of intermittent household slow sand filters using different configurations: a slow sand filter without pretreatment (ISSF), a slow sand filter with polyurethane sponge (ISSF-S), a slow sand filter with decanted water (ISSF-D), and a slow sand filter with both sponge and decanted water (ISSF-SD). At the end of operations of the four filtration units, microbiological activity along the sand-based filter medium was analyzed using the Fluorescein Diacetate (FDA) hydrolysis method, alongside the assessment of organic matter content. Additionally, the microstructure of the polyurethane sponges was observed using scanning electron microscopy (SEM). The results indicated that the upper layers of the filter medium exhibited higher microbiological activity, potentially linked to the presence of organic matter. In addition to extending the filtration run length of the units, as reported in the literature, the polyurethane sponge proved effective in particle retention and in supporting the development of the schmutzdecke. This effectiveness was confirmed through photomicrographs that revealed a more diverse microbial community in the material compared to the biological layer observed in the filter medium of filters fed with the same water. Pretreatment with *Moringa oleifera* seeds influenced the organic matter content, impacting the development of microbial diversity within the schmutzdecke. This study contributes to the development of accessible and sustainable water treatment systems with potential applications in infrastructure-limited communities and provides insights into the microbiological activity of the proposed configurations.

Keywords: Intermittent slow filter; Microbial community; Enzymatic activity; Fluorescein diacetate hydrolysis; Polyurethane sponge.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Representação da Equação de Poliuretano.....	20
Figura 2 – Acácia branca (<i>Moringa oleifera</i>) e sementes.	21
Figura 3 – Partes constituintes de um filtro lento de areia domiciliar.	23
Figura 4 – Zonas dos filtros lentos de areia em escala domiciliar.....	24
Figura 5 – Mecanismos de transporte.....	27
Figura 6 – <i>Schmutzdecke</i> formado em um filtro lento.....	29
Figura 7 – Reação de hidrólise e desidratação do Diacetato de Fluoresceína.	31
Figura 8 – Local de estudo.	33
Figura 9 – Lago de estudo.	34
Figura 10 – Distribuição do material filtrante e da camada suporte dos filtros.....	35
Figura 11 – Desenho esquemático dos filtros.....	36
Figura 12 – Procedimento de preparo do coagulante natural em pó.	38
Figura 13 – Preparo das amostras de <i>schmutzdecke</i> para análise.	40
Figura 14 – Etapas de preparação das amostras para observação em MEV.....	41
Figura 15 – Preparação das amostras coletadas no meio filtrante.	42
Figura 16 – Etapas do ensaio de hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA).....	43
Figura 17 – Preparação das amostras para avaliação do teor de matéria orgânica.....	44
Figura 18 – Análise visual das amostras após os ensaios de FDA.	46
Figura 19 – Valores médios de atividade enzimática conforme profundidade da camada.	48
Figura 20 – Valores médios de atividade enzimática conforme profundidade (em escala logarítmica).....	48
Figura 21 – Teor de matéria orgânica em porcentagem para cada configuração de filtro.	52
Figura 22 – Microrganismos identificados no <i>schmutzdecke</i> das quatro configurações de FLI.	54
Figura 23 – Algas identificadas no <i>schmutzdecke</i>	57
Figura 24 – Rotífero identificados no <i>schmutzdecke</i>	58
Figura 25 – Protozoários identificados no <i>schmutzdecke</i>	58
Figura 26 – Microestrutura da esponja de poliuretano após utilização no FLIE e FLIECD.	59
Figura 27 – Microestrutura da esponja controle (antes da utilização).....	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 – Zonas e funções dos filtros lentos de areia.	25
Quadro 2 – Mecanismos atuantes e respectivas funções.	28

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Valores da concentração de fluoresceína em cada amostra analisada.	47
Tabela 2 – Teor de matéria orgânica nas configurações de filtro lento conforme profundidade.	52

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

CAWST	Centre for Affordable Water and Sanitation Technology
CC	Coeficiente de curvatura
cm	centímetros
CU	Coeficiente de uniformidade
DI	Diâmetro interno
DN	Diâmetro nominal
d_{10}	diâmetro efetivo
ETA	Estação de Tratamento de Água
FDA	Diacetato de Fluoresceína
FLI	Filtro Lento de Regime Intermitente
FLICD	FLI + Adição da água decantada pelo coagulante
FLIE	Filtro Lento Intermitente com Esponja
FLIECD	FLIE + Adição da água decantada pelo coagulante
HMDS	Hexametildissilazano
LAFIC	Laboratório de Ficologia
LAMEB	Laboratório Multiusuário de Estudos Biológicos
LAPOÁ	Laboratório de Potabilização das Águas
LCME	Laboratório Central de Microscopia Eletrônica
LIMA	Laboratório Integrado de Meio Ambiente
log	logaritmo na base 10
MEV	Microscopia Eletrônica de Varredura
ml	mililitro
mM	milimolar
nm	nanômetro
RFU	Relative Fluorescence Units (Unidades de Fluorescência Relativa)
rpm	rotações por minuto
UFSC	Universidade Federal de Santa Catarina
uT	unidades de turbidez
$\mu\text{g/ml}$	microgramas por mililitro
μm	micrômetro
v/v	volume por volume
$^{\circ}\text{C}$	graus célsius

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	14
2	OBJETIVOS	16
2.1	OBJETIVO GERAL	16
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	16
3	REFERENCIAL TEÓRICO	17
3.1	ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM COMUNIDADES ISOLADAS.....	17
3.2	TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO ALTERNATIVAS	17
3.3	PRESENÇA DO PRÉ-TRATAMENTO NA FILTRAÇÃO LENTA	18
3.3.1	Esponja de Poliuretano	19
3.4	COAGULANTES NATURAIS.....	20
3.4.1	<i>Moringa oleifera</i>.....	21
3.5	FILTRAÇÃO LENTA EM ESCALA DOMICILIAR	22
3.5.1	Componentes do filtro lento domiciliar	22
3.5.2	Regime de operação intermitente.....	24
3.5.3	Características da água afluente	25
3.5.4	Principais mecanismos de transporte em filtros lentos.....	27
3.6	O <i>SCHMUTZDECKE</i>	28
3.6.1	Diversidade microbiana no <i>Schmutzdecke</i>	29
3.6.2	Atividade biológica no meio filtrante	30
3.7	ANÁLISE ENZIMÁTICA COMO INDICADOR DE ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA.....	30
3.7.1	Avaliação da atividade microbiológica pelo método da Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA).....	31
4	MATERIAIS E MÉTODOS	33
4.1	DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	33
4.2	DESCRIÇÃO DOS FILTROS LENTOS INTERMITENTES	34
4.3	OPERAÇÃO DOS FILTROS LENTOS INTERMITENTES	36
4.3.1	Pré-tratamento com <i>Moringa oleifera</i>	37
4.3.2	Procedimento de limpeza dos filtros.....	39
4.4	PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA DE CAMPO CLARO	39

4.5	OBSERVAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS ESPONJAS DE POLIURETANO.....	40
4.6	ANÁLISE ENZIMÁTICA DO MEIO FILTRANTE.....	41
4.7	AVALIAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA	43
5	RESULTADOS E DISCUSSÕES	45
5.1	AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA POR MEIO DA ANÁLISE ENZIMÁTICA COM DIACETATO DE FLUORESCEÍNA (FDA)	45
5.2	AVALIAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA	51
5.3	ANÁLISE DA DIVERSIDADE MICROBIANA IDENTIFICADA NO <i>SCHMUTZDECKE</i>	53
5.4	AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA ESPONJA DE POLIURETANO .	59
5.4.1	Comparação da microestrutura em esponjas de poliuretano utilizadas e sem utilização	60
6	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	61
7	RECOMENDAÇÕES	63
	REFERÊNCIAS.....	65

1 INTRODUÇÃO

A água é um recurso natural limitado e um bem público fundamental para a vida e a saúde. O direito humano à água é indispensável para uma vida humana com dignidade, sendo um pré-requisito para a realização de outros direitos humanos (ONU, 2010). No entanto, a desigualdade no acesso a esse recurso continua a ser um desafio global significativo. De acordo com o relatório da Organização Mundial da Saúde (OMS) de 2023, ainda há uma disparidade preocupante no acesso a água potável e saneamento, afetando bilhões de pessoas em todo o mundo, tanto em países desenvolvidos quanto em desenvolvimento (WHO, 2023).

Apesar dos avanços na proteção de mananciais e no tratamento de água, a situação ainda é preocupante. Em 2022, aproximadamente 771 milhões de pessoas continuavam sem acesso à água potável segura e 2 bilhões viviam sem saneamento básico adequado (WHO, 2023). Esses dados destacam a necessidade urgente de investimentos contínuos e inovações em tecnologias de tratamento de água para atender à demanda global e garantir acesso universal.

Nesse contexto, a filtração lenta é uma tecnologia de tratamento de água que tem sido amplamente utilizada desde o século XIX, especialmente em áreas rurais e comunidades isoladas (Nakamoto; Graham; Gimbel, 2014). A sua importância é reforçada pelos dados recentes, que mostram que, enquanto 91% da população mundial tinha acesso a água potável em 2015, a necessidade de soluções de tratamento eficazes como filtros lentos continua a ser uma prioridade para alcançar os objetivos globais de acesso universal (WHO, 2023). No Brasil, embora a cobertura de água e esgoto em áreas urbanas seja de cerca de 95%, ainda há desafios significativos nas áreas rurais e em comunidades isoladas (Painel Saneamento Brasil, 2022).

Filtros domiciliares adaptados do filtro lento de areia convencional são menores e projetados para uso intermitente, oferecendo uma solução prática e de baixo custo para a remoção de microrganismos e impurezas (CAWST, 2012). Contudo, a tecnologia apresenta limitações, como variações na qualidade da água tratada e a necessidade de manutenção regular para garantir a eficácia do sistema.

O pré-tratamento da água é uma possibilidade para melhorar a eficiência dos sistemas de filtração lenta. O uso de coagulantes naturais, como a *Moringa oleifera*, tem demonstrado eficácia em aglutinar e remover partículas suspensas, o que pode aumentar a capacidade do filtro em reter contaminantes (Arantes et al., 2014).

Além disso, a aplicação de materiais como esponjas de poliuretano no topo do meio filtrante ajuda a reter partículas maiores e a promover o desenvolvimento da camada biológica, ou *schmutzdecke*, que é essencial para a eficiência da filtração. Esses métodos de pré-tratamento

não só melhoram a qualidade da água tratada, mas também podem prolongar a vida útil do filtro e reduzir a necessidade de manutenção (Pizzolatti, 2010; Medeiros et al., 2020).

A eficiência dos filtros lentos está ligada à formação da camada biológica, conhecida como *schmutzdecke*, que se desenvolve nos primeiros centímetros do meio filtrante. Esta camada é essencial para o processo de filtração, pois abriga uma comunidade de microrganismos que desempenham um papel vital na degradação da matéria orgânica presente na água. Esses microrganismos utilizam a matéria orgânica como fonte de energia, contribuindo para a purificação da água e para a manutenção de sua qualidade ao longo do tempo (Libânio, 2010; Pizzolatti, 2010).

A análise enzimática, utilizando o método da Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA), emerge como uma abordagem inovadora para avaliar a atividade microbiológica. Embora menos comum que os testes microbiológicos e físico-químicos tradicionais, o método FDA oferece vantagens em termos de rapidez, sensibilidade e especificidade. Este método é utilizado para avaliar a atividade enzimática e a viabilidade microbiana em sistemas de filtração e outros processos biológicos.

O presente trabalho tem como objetivo avaliar os principais microrganismos atuantes no *schmutzdecke*, avaliar a microestrutura da esponja de poliuretano como alternativa de pré-tratamento e analisar a atividade microbiológica ao longo do meio filtrante através do método da Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA) em quatro configurações de filtros lentos intermitentes domiciliares, sendo estes: FLI - filtro lento de regime intermitente, FLIE - filtro lento intermitente com esponja de poliuretano, FLICD - filtro lento intermitente sem esponja de poliuretano e adição da água decantada pelo coagulante (*Moringa oleifera*) e FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante (*Moringa oleifera*).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar e comparar a atividade microbiológica ao longo da profundidade do meio filtrante a partir do método de ensaio enzimático (FDA) e identificar os microrganismos presentes no *schmutzdecke* de quatro configurações distintas de filtros lentos de regime intermitente em escala domiciliar.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Avaliar a atividade microbiológica ao longo da profundidade do meio filtrante de quatro diferentes configurações de filtro lento intermitente;
- Identificar os microrganismos presentes no *schmutzdecke* do meio filtrante e esponja de poliuretano de cada filtro lento intermitente;
- Comparar a microestrutura da esponja de poliuretano de distintas configurações (sem e com pré-tratamento com *Moringa oleifera*) com uma esponja modelo sem utilização.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

3.1 ABASTECIMENTO DE ÁGUA EM COMUNIDADES ISOLADAS

A qualidade de vida da população, a produtividade individual e o desenvolvimento social são princípios fundamentais do saneamento básico, abrangendo o bem-estar físico, psicológico e social, tanto em áreas urbanas quanto rurais (Brasil, 2007). Essas diretrizes envolvem medidas que visam proteger o ambiente e garantir serviços essenciais, como abastecimento de água potável, tratamento de esgoto e gestão de resíduos sólidos, com o objetivo de prevenir doenças e promover a saúde (Trata Brasil, 2021).

Apesar dos avanços na melhoria do acesso à água potável, muitos domicílios rurais ainda enfrentam a realidade de não ter acesso a sistemas de tratamento de água adequados. A realidade do abastecimento de água no Brasil apresenta grandes variações entre as diferentes regiões do país, resultado das disparidades econômicas, sociais e políticas. Segundo o Painel de Saneamento Brasil (2022), as regiões Norte e Nordeste possuíam cerca de 37,6% e 24,4% da população, respectivamente, sem cobertura de abastecimento, dependendo de fontes como poços, cisternas e rios, muitas vezes contaminados.

A Organização Mundial da Saúde (2022) destaca que a ausência de tratamentos apropriados para água em áreas rurais contribui para a persistência de problemas de saúde e a disparidade no acesso à água potável entre áreas urbanas e rurais. Portanto, é de extrema importância investir em tecnologias de tratamento acessíveis e adaptadas às necessidades específicas dessas comunidades para garantir a saúde e o bem-estar de sua população.

Além das preocupações com os riscos à saúde, o acesso inadequado à água potável é uma questão alarmante no Brasil. Em especial nas comunidades isoladas, há desafios específicos na oferta de serviços de saneamento adequados, decorrentes de fatores como a distribuição geográfica, isolamento político, áreas de difícil acesso e limitações financeiras (WHO, 2019b).

3.2 TECNOLOGIAS DE TRATAMENTO ALTERNATIVAS

Heller e Pádua (2006) destacam que as soluções alternativas para o tratamento de água em comunidades isoladas envolvem uma variedade de modalidades de abastecimento coletivo que se diferenciam dos sistemas tradicionais, sem comprometer a qualidade da água potável.

As tecnologias alternativas no tratamento de água oferecem soluções acessíveis e aplicáveis em diferentes escalas, desde o tratamento domiciliar até o coletivo, promovendo a remoção ou inativação de microrganismos patogênicos em condições específicas de operação (Libralato et al., 2012; OMS, 2017).

A nível domiciliar, é essencial ressaltar que, além de garantir a eficiência no fornecimento de água segura em quantidade suficiente para o consumo humano, os tratamentos alternativos também devem cumprir outros requisitos, como simplicidade operacional, custo acessível e manutenção que permitem a autonomia dos usuários e seja facilmente aceito em suas residências (Libralato et al., 2012; Sobsey et al., 2008).

As tecnologias alternativas podem ser aplicadas em diversas etapas do tratamento de água. Na coagulação, por exemplo, podem ser usados coagulantes naturais de diferentes fontes, como a *Moringa oleifera* (sementes de acácia-branca), a quitosana (obtida das carapaças de crustáceos marinhos) e os taninos (como os extraídos da *Acácia mearnsii*) (Silveira, 2024; Spinelli, 2001).

Na filtração, há métodos que utilizam meios não-granulares, como a técnica que usa bambu, onde a água é filtrada ao passar pelos poros das paredes internas dos troncos. Já na desinfecção, destaca-se a técnica SODIS (desinfecção solar da água), que utiliza a energia solar para eliminar ou inativar microrganismos patogênicos (Müller, 2016; Saleem et al., 2019; Carvajal, 2015).

3.3 PRESENÇA DO PRÉ-TRATAMENTO NA FILTRAÇÃO LENTA

A filtração lenta é uma tecnologia amplamente utilizada para o tratamento de água, especialmente em comunidades rurais e áreas com recursos limitados. No entanto, sua eficácia pode ser comprometida pela qualidade da água afluyente, especialmente em relação ao parâmetro de turbidez (CAWST, 2012).

O desempenho desse sistema pode ser significativamente aprimorado com a implementação de pré-tratamentos adequados. O pré-tratamento é uma forma de reduzir a carga de sólidos e contaminantes antes que a água entre em contato com o meio filtrante, o que melhora a eficiência e prolonga a carreira de filtração (Nakamoto et al., 2014).

Uma das abordagens mais comuns no pré-tratamento é a utilização de processos de coagulação e floculação. Esses processos envolvem a adição de coagulantes para aglutinar partículas e formar flocos, auxiliando na remoção de sólidos em suspensão e matéria orgânica antes da filtração lenta (Dalsasso; Sens, 2006). Essa etapa reduz a carga no filtro lento e melhora

a qualidade da água filtrada, resultando em maior eficiência do sistema (Medeiros et al., 2016).

Os coagulantes naturais destacam-se como uma opção eficaz no tratamento de água, oferecendo uma alternativa sustentável e econômica aos coagulantes químicos tradicionais. Esses compostos desempenham um papel fundamental ao promover a aglutinação de partículas e a formação de flocos, facilitando a remoção de sólidos em suspensão e matéria orgânica. Além disso, quando associados a sistemas de filtração lenta, como os filtros lentos de areia intermitentes, proporcionam um tratamento eficiente e acessível. Esses sistemas são de fácil construção e operação, sendo ideais para a remoção de impurezas e microrganismos da água (Nakamoto et al., 2014).

Além dos métodos químicos, a pré-filtração mecânica é outra técnica eficaz. O uso de filtros de areia grossa ou de materiais para remover partículas maiores e sedimentos ajuda a proteger o filtro lento de bloqueios e degradação rápida (Santos et al., 2011). Essas etapas de pré-tratamento são utilizadas para garantir que o meio filtrante do filtro lento permaneça funcional e eficiente por um período mais longo, reduzindo a necessidade de manutenção frequente e melhorando a qualidade da água (Carvalho et al., 2013).

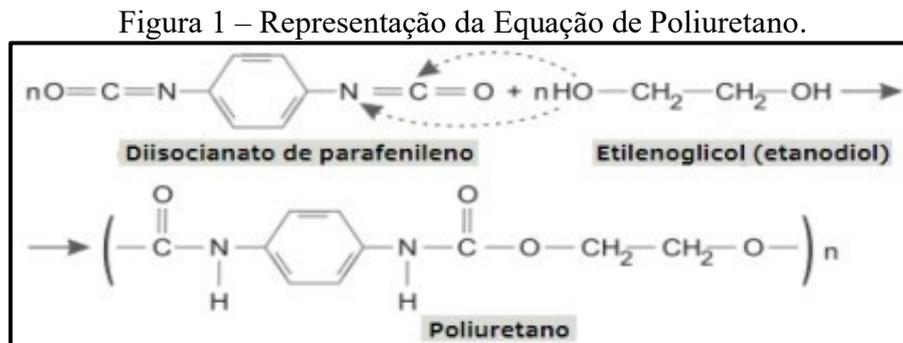
A pré-filtração em pedregulho, além de proporcionar uma melhoria em diversos parâmetros de qualidade da água, contribui diretamente para a ampliação dos limites de aplicabilidade do filtro. Isso ocorre porque reduz a turbidez da água bruta, que é o principal fator limitante do processo.

Além da utilização de filtros de areia grossa, outro material que tem mostrado eficácia no pré-tratamento é a esponja de poliuretano, um recurso versátil e altamente poroso que pode ser inserido no topo do meio filtrante. A filtração em esponjas assemelha-se com o sistema granular, porém pelas suas características no processo de fabricação possibilita um meio poroso não granular. A utilização desse material permite uma construção leve, compacta e com facilidade de limpeza do meio filtrante (Isolani, 2000; Fazolo, 2023).

3.3.1 Esponja de Poliuretano

Em 1990, Le Cloirec e Baudu estudaram uma aplicação de esponjas de poliuretano impregnadas com carvão ativado para o tratamento de ar. Posteriormente, em 1991, Sens, Azou e Martin utilizaram essa esponja em sistemas de filtração de água para fins de potabilização. Em 1992, Sens, Martin e a Bectra International SA desenvolveram um projeto para uma estação transportável de tratamento de água externa para fins militares, empregando esponjas de poliuretano impregnadas com carvão ativado na etapa de filtração (Isolani, 2000; Fazolo, 2023).

De acordo com Isolani (2000), o poliuretano é composto por copolímeros formados a partir da polimerização de diversos poliésteres e poliéteres com o isocianato de parafenileno. Esses copolímeros apresentam uma estrutura tridimensional altamente complexa, conferindo ao material grande versatilidade. No caso estudado, esses materiais são classificados como poliuretanos esponjosos ou espumados. Na Figura 1 é possível visualizar a representação da equação de poliuretano.



O poliuretano é fabricado em condições em que, além da reação de polimerização, ocorre uma reação que libera gás no meio reacional. Esse processo faz com que o poliuretano cresça e apresente bolhas em seu interior, resultando no característico aspecto de espumas. O material formado é amplamente utilizado em produtos como colchões e travesseiros. Embora não ocorra eliminação de moléculas na polimerização que forma o poliuretano, essa reação é classificada como um polímero de condensação (Isolani, 2000).

3.4 COAGULANTES NATURAIS

Coagulantes naturais são substâncias extraídas de fontes vegetais ou minerais que facilitam a remoção de partículas e contaminantes da água. Esses coagulantes são uma alternativa sustentável e de baixo custo em comparação com os produtos químicos sintéticos utilizados tradicionalmente no tratamento de água. A utilização de coagulantes naturais é relevante em contextos onde o acesso a produtos químicos é limitado e em comunidades que buscam soluções ecológicas e econômicas.

Os coagulantes naturais podem ser obtidos de diversas fontes, como de animais, plantas, sementes e algas (Koul et al., 2022). As algas marinhas, por exemplo, têm sido estudadas por sua capacidade de promover a coagulação devido à presença de polissacarídeos que ajudam a aglutinar partículas finas e colóides presentes na água (Almeida et al., 2013). Outro exemplo é

o uso dos cactos *Opuntia ficus*, que têm demonstrado propriedades coagulantes eficazes, oferecendo uma alternativa viável para o tratamento de água em regiões áridas e semiáridas (Verbel et al., 2014).

Entre os coagulantes naturais, a *Moringa oleifera* destaca-se por sua capacidade comprovada de aglutinar partículas e reduzir turbidez da água, oferecendo uma solução valiosa para o tratamento em áreas com recursos limitados (Silva, 2005).

3.4.1 *Moringa oleifera*

A *Moringa oleifera* é uma planta nativa da Índia que tem sido amplamente estudada e utilizada devido às suas propriedades nutricionais e medicinais excepcionais (Anunciação et al., 2021). Seus benefícios vão além da nutrição, incluindo aplicações significativas no tratamento de água, especialmente em áreas com recursos limitados. As sementes de *Moringa oleifera* são particularmente valiosas devido à sua ação coagulante, melhorando a qualidade da água de maneira eficaz e sustentável (Silva, 2005). Na Figura 2, são apresentados: (a) a Acácia branca (*Moringa oleifera*) e (b) as sementes utilizadas como coagulante.

Figura 2 – Acácia branca (*Moringa oleifera*) e sementes.



Fonte: A autora (2024).

O uso das sementes de *Moringa oleifera* para tratamento de água baseia-se em sua capacidade de aglutinar e remover partículas suspensas e coloidais. Os compostos bioativos presentes nas sementes ajudam a formar flocos que podem ser facilmente removidos da água, reduzindo turbidez e contaminantes microbiológicos (McDonald et al., 2001). O estudo conduzido por Elliot et al. (2021) demonstra que a adição de extratos de *Moringa oleifera* pode reduzir consideravelmente a turbidez, cor e DQO da água, tornando-a uma alternativa viável aos coagulantes químicos utilizados convencionalmente em Estações de Tratamento de Águas (ETAs).

Cerca de 40% da massa das sementes da *Moringa oleifera* é composta por óleo comestível e proteínas catiônicas de baixo peso molecular, que, ao serem solubilizadas em água, atuam como coagulantes eficazes no tratamento de águas naturais e residuárias (Amagloh e Benang, 2009; Marques et al., 2010; Franco et al., 2017). As sementes de *Moringa oleifera* contém aminoácidos, ácidos graxos, vitaminas e nutrientes glucosinolatos e fenólicos, que são grupos funcionais capazes de adsorver íons metálicos (Reddy et al., 2011).

3.5 FILTRAÇÃO LENTA EM ESCALA DOMICILIAR

A filtração lenta em escala domiciliar é uma adaptação da tecnologia de filtração lenta tradicional, projetada para fornecer água potável em contextos residenciais, especialmente em áreas com infraestrutura limitada. Este sistema é caracterizado pela sua simplicidade e eficácia, tornando-o uma solução acessível para o tratamento de água em pequenos volumes, típicos de residências (CAWST, 2012).

Os filtros lentos domiciliares consistem de forma geral em uma estrutura composta por camadas de materiais filtrantes, como areia e carvão ativado, dispostos em um arranjo vertical. A água é conduzida através dessas camadas, onde partículas sólidas e microrganismos são removidos antes que a água filtrada seja coletada para uso (Logsdon et al., 2002). Esse tipo de sistema é valorizado por sua facilidade de construção e operação, além de sua capacidade de fornecer água de boa qualidade, com baixo custo e manutenção simplificada (Medina; Duarte, 2011).

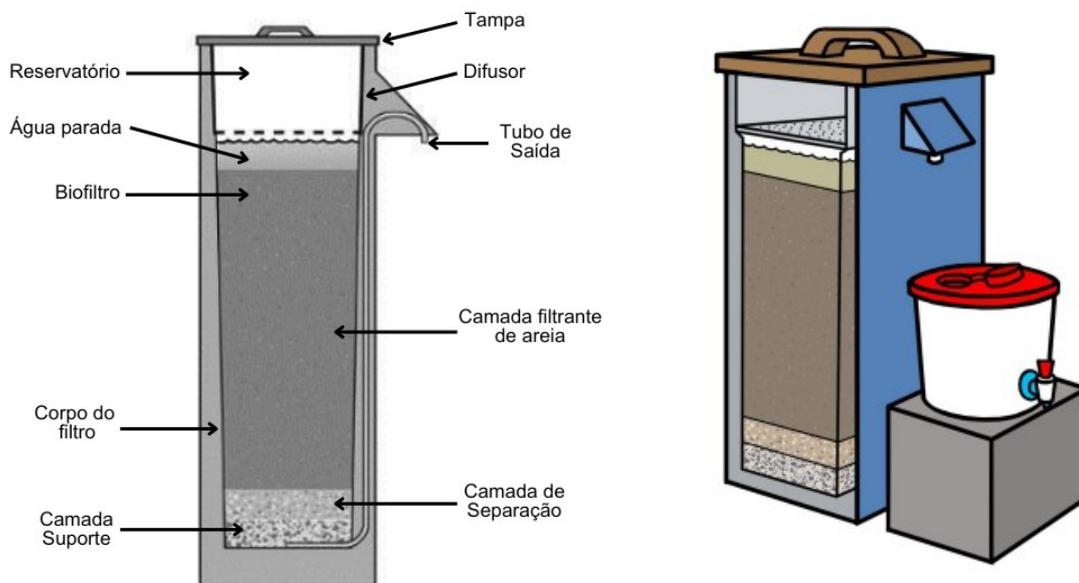
3.5.1 Componentes do filtro lento domiciliar

No filtro lento domiciliar a água passa por um meio filtrante, em baixa velocidade de escoamento, onde a purificação resulta principalmente de mecanismos biológicos e físicos. A

estrutura inclui uma alimentação de água bruta, um meio filtrante granular (geralmente de areia, dada a maior facilidade de obtenção), uma camada sobrenadante que fornece umidade para a camada biológica, uma camada suporte, uma tubulação de saída localizada acima do nível da areia, garantindo uma lâmina de água sobrenadante (Haarhoff e Cleasby, 1991; Moruzzi et al., 2017).

A Figura 3 ilustra o esquema de um modelo de filtro lento domiciliar com seus componentes, disponibilizado no manual do CAWST “*Biosand Filter Manual, Design, Construction, Installation, Operation and Maintenance*” (BSF V10.0, 2012). A estrutura é constituída basicamente pelo corpo do filtro, camadas de suporte e separação, camada filtrante de areia ou meio filtrante, reservatório, difusor, tampa e tubulação de saída.

Figura 3 – Partes constituintes de um filtro lento de areia domiciliar.



Fonte: Adaptado de CAWST (2012).

O corpo do filtro lento domiciliar é responsável por conter o meio filtrante, as camadas de suporte, separação e a água durante o processo de tratamento. Ele pode ser feito de concreto ou plástico, com cada material apresentando vantagens e desvantagens (Terin, 2021; Elliot et al., 2015; Stauber et al., 2012a).

A tubulação de saída, usualmente feita de plástico ou cobre, capta a água do fundo do filtro e a conduz ao ponto de coleta. A altura do filtro é um aspecto relevante, pois define o nível mínimo de água no interior do filtro durante o período de pausa de abastecimento (CAWST, 2009).

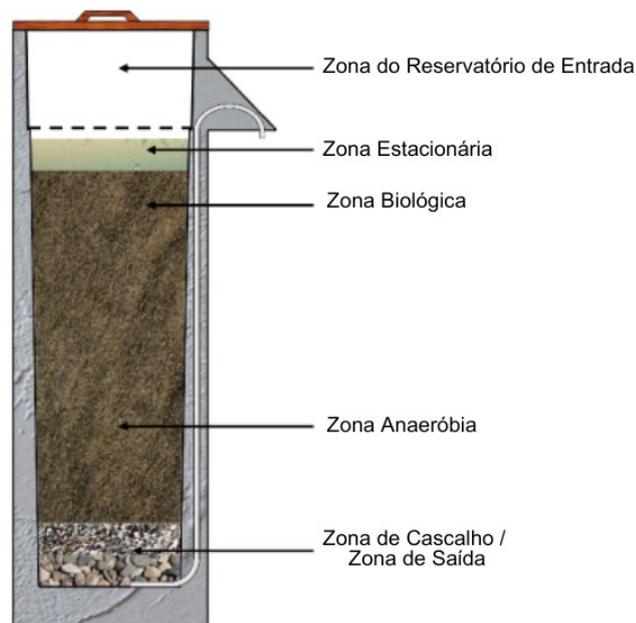
Abaixo do meio filtrante estão as camadas de separação e suporte, compostas por materiais de maior diâmetro que o meio filtrante. A camada de separação usualmente é composta por areia grossa ou pedregulhos pequenos, enquanto a camada de suporte é formada por pedregulhos maiores ou brita. Essas camadas têm a função de sustentar o meio filtrante e de evitar que a areia bloqueie a passagem de saída dos filtros lentos domiciliares (CAWST, 2009).

Na parte superior do filtro, há uma tampa que tem como objetivo proteger o sistema contra contaminações externas, evitando a entrada de sujeiras e insetos provenientes do ambiente. Abaixo da tampa fica o reservatório de água, a água sobrenadante e o difusor, que consiste em uma estrutura simples, que faz com que a água introduzida não cause distúrbio da areia e camada biológica (CAWST, 2009).

3.5.2 Regime de operação intermitente

Segundo CAWST (2010), o filtro lento intermitente é composto por cinco zonas principais: reservatório de entrada, zona estacionária, zona biológica, zona anaeróbia e zona de saída (Figura 4).

Figura 4 – Zonas dos filtros lentos de areia em escala domiciliar.



Fonte: Adaptado CAWST (2010).

No Quadro 1 é possível visualizar a finalidade de cada zona que compõe o filtro lento.

Quadro 1 – Zonas e funções dos filtros lentos de areia.

Zonas	Funções
Zona do reservatório de entrada	Onde a água é introduzida no filtro.
Zona estacionária	Esta água mantém a areia molhada, deixando passar o oxigênio para a camada biológica.
Zona biológica	Desenvolve-se nos primeiros 5-10 cm (2-4") da superfície da areia. A areia de filtração remove os agentes patogênicos, as partículas em suspensão e outros contaminantes.
Zona anaeróbia	Não contém praticamente nenhum microrganismo vivo devido à falta de nutrientes e oxigênio.
Zona de saída	Sustenta a areia e protege o tubo de saída de entupimentos.

Fonte: Adaptado de CAWST (2010).

O filtro lento domiciliar pode ser operado em modo intermitente ou contínuo. No entanto, a zona de saída é posicionada acima da zona estacionária, garantindo que a parte superior da camada filtrante permaneça submersa. Esse ajuste permite que o *schmutzdecke*, camada biológica do filtro, continue a receber oxigênio mesmo quando o fluxo de água está interrompido, garantindo a manutenção da atividade biológica (Bessa, 2020).

Na operação de fluxo intermitente, o filtro lento é abastecido pelo usuário, dependendo do volume de vazios no meio filtrante. A água é distribuída pelo difusor até a camada filtrante, devido a elevada carga hidráulica, e o nível de água diminui à medida que ocorre o escoamento. A água para de fluir quando o nível se iguala ao da saída, iniciando o período de pausa, o qual, conforme CAWST (2010), deve possuir um intervalo de intermitência com duração entre 1 a 48 horas, para não comprometer os processos que ocorrem no filtro.

A filtração lenta de regime intermitente pode ser eficaz na remoção de patógenos e na redução da turbidez da água, oferecendo uma solução prática e econômica para comunidades isoladas que dependem de fontes de água bruta (Murtha; Heller; Libânio, 1997). Este regime é vantajoso em contextos onde a água possui níveis significativos de partículas e contaminantes, pois o período de pausa contribui para a limpeza do meio filtrante e a manutenção da eficiência do sistema (Pizzolatti, 2010).

3.5.3 Características da água afluyente

Embora o filtro lento de areia apresente diversas vantagens, ele possui uma limitação quanto à qualidade da água afluyente. A presença excessiva de material em suspensão na água

pode gerar condições ambientais desfavoráveis para a formação e sobrevivência da camada biológica localizada acima da camada filtrante, o que afeta especialmente os protozoários parasitas de bactérias, comprometendo a qualidade microbiológica da água filtrada (Lloyd, 1996).

A turbidez da água afluyente, considerada uma característica fundamental, pode sobrecarregar o meio filtrante em casos de níveis elevados, levando a uma frequência maior de manutenção e ao risco aumentado de obstrução do filtro (Silva et al., 2021). Além disso, a presença de sólidos em suspensão pode interferir na formação do *schmutzdecke*, essencial para a eficiência do sistema de filtração lenta (Murtha; Heller; Libânio, 1997).

Caso uma fonte alternativa utilizada para abastecimento apresente turbidez superior a 10 uT, o filtro pode não ser capaz de fornecer água potável, o que comprometeria a aplicação da tecnologia em comunidades isoladas. Para evitar esse problema, é necessário realizar um pré-tratamento, a fim de reduzir a turbidez antes de iniciar o processo de filtração (Freitas, 2017).

Outro parâmetro importante na qualidade da água é a clorofila-a, um pigmento essencial para a fotossíntese, presente nas microalgas. Esses organismos microscópicos, pertencentes ao grupo polifilético das algas, juntamente com as macroalgas, são responsáveis por cerca de metade da fotossíntese global, desempenhando um papel importante na produção primária das cadeias alimentares (Andersen, 1992; Silveira, 2024). No entanto, em sistemas aquáticos eutrofizados, como os frequentemente encontrados em águas brutas de rios e lagos, as microalgas podem contribuir para o aumento da turbidez e da matéria orgânica, desafiando a eficiência do processo de filtração lenta.

A carga microbiológica da água afluyente, que inclui patógenos como bactérias e vírus, também é considerada um aspecto crítico. A capacidade do filtro lento para remover esses microrganismos está diretamente relacionada à sua capacidade de promover e manter a camada biológica, que desempenha um papel fundamental na redução da carga microbiológica (Pizzolatti, 2010; Emater, 2012). Água com uma carga microbiológica elevada pode exigir ajustes operacionais no filtro para garantir que a qualidade da água tratada atende aos padrões de potabilidade (Brasil, 2021).

Além da carga microbiológica, a composição química da água afluyente, que pode incluir contaminantes como metais pesados e produtos químicos orgânicos, também influencia o desempenho do filtro lento (Silva et al., 2021). Segundo CAWST (2011) o filtro lento é pouco eficiente na remoção de ferro e ineficiente na remoção de compostos químicos dissolvidos, como metais pesados, produtos químicos orgânicos, compostos clorados, entre outros.

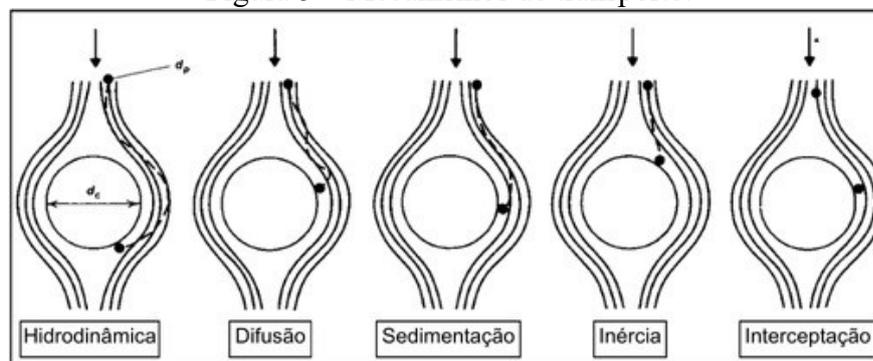
3.5.4 Principais mecanismos de transporte em filtros lentos

No processo de filtração lenta, as impurezas presentes na água são removidas por meio de processos físico-químicos e biológicos. Esses processos são influenciados pelos mecanismos de transporte, que, por sua vez, dependem da temperatura da água e das características do meio filtrante. A filtração ocorre pela interação das partículas de contaminação com o meio filtrante, onde os mecanismos de aderência garantem que essas partículas permaneçam presas ao meio, evitando seu desprendimento (Alves et al., 2019).

O mecanismo de transporte mais comum no processo de filtração é a ação física de coar, que ocorre quando partículas maiores ficam retidas nos espaços menores do meio filtrante. Esse mecanismo é predominante nos filtros de ação superficial, onde os poros da camada filtrante são menores do que as partículas que precisam ser removidas, permitindo que a água passe enquanto as impurezas ficam retidas (Botari, 2007).

Neste contexto, entre os principais mecanismos, também é possível citar a sedimentação, difusão, impacto inercial, interceptação e ação hidrodinâmica (Amirtharajah, 1988). A Figura 5 apresenta os principais mecanismos de transporte envolvidos na remoção de partículas durante o processo de filtração em meios porosos, como ocorre nos filtros lentos, assim como o movimento das partículas nas linhas de fluxo.

Figura 5 – Mecanismos de transporte.



Fonte: Adaptado de Lunardi (2021).

As funções desses mecanismos são apresentadas no Quadro 2.

Quadro 2 – Mecanismos atuantes e respectivas funções.

Mecanismo	Função
Ação hidrodinâmica	Ocorre quando partículas maiores são submetidas a diferentes velocidades de escoamento, o que gera um movimento perpendicular ao fluxo e as direciona para regiões de menor velocidade, permitindo sua captura pelo coletor.
Difusão	Envolve partículas muito pequenas que são afetadas pelo movimento browniano. Esse movimento aleatório aumenta com a temperatura, fazendo com que as partículas colidam com o coletor, promovendo sua remoção.
Sedimentação	Esse mecanismo ocorre quando a baixa velocidade de sedimentação permite que a partícula se desloque ou se deposite no meio filtrante, influenciada pela gravidade, que atua nas partículas presentes na parte superior do coletor.
Inércia	Refere-se ao fenômeno no qual uma partícula, devido à sua inércia, continua a seguir sua trajetória reta e colide com o coletor, mesmo quando as linhas de corrente se desviam. Isso acontece porque a partícula possui quantidade de movimento suficiente para não seguir o fluxo de escoamento.
Interceptação	Ocorre devido à diferença de tamanho entre a partícula e o coletor. A proximidade das linhas de fluxo com a superfície do coletor permite que as partículas sejam capturadas no meio filtrante durante o escoamento.

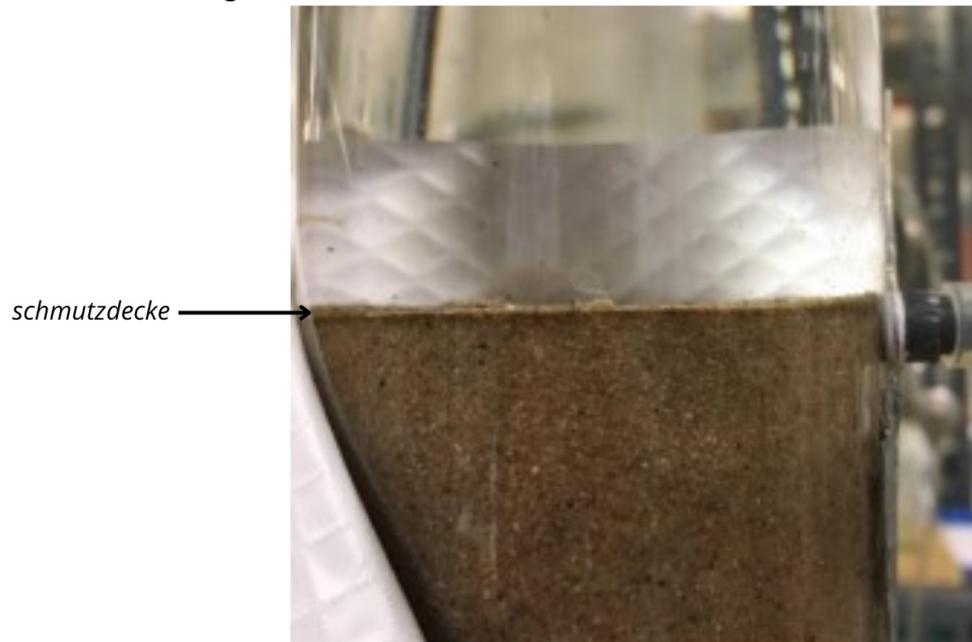
Fonte: Adaptado de Di Bernardo (2002).

3.6 O *SCHMUTZDECKE*

O *schmutzdecke* é a camada biológica formada na superfície do meio filtrante de um filtro lento de areia (Figura 6). Esta camada desempenha um papel importante na eficácia do processo de filtração, funcionando como uma barreira biológica que contribui para a remoção de impurezas e microrganismos da água. Trata-se de uma camada gelatinosa ou biofilme, que tem coloração marrom-avermelhada, é composta de matéria orgânica em decomposição, ferro, manganês e sílica, e, portanto, atua como um meio filtrante fino que contribui para a remoção de turbidez na água bruta (Ranjan, 2018).

Esta camada também funciona como uma zona inicial de atividade biológica e proporciona alguma degradação de compostos orgânicos solúveis presentes na água bruta, o que é útil para reduzir sabores, odores e cor. Ela contribui para a remoção de patógenos e sólidos em suspensão, reduzindo o tamanho dos poros entre os grãos de areia, o que favorece o aprisionamento mecânico desses patógenos e partículas suspensas (Ranjan; Prem, 2018).

Figura 6 – *Schmutzdecke* formado em um filtro lento.



Fonte: de Souza (2020).

3.6.1 Diversidade microbiana no *Schmutzdecke*

Na parte superior do meio filtrante, conforme o processo de filtração avançado, forma-se o *schmutzdecke*, uma camada de material decantado ou retido na superfície pelo processo de filtração, composta por uma mistura de algas, protozoários, diatomáceas, rotíferos e bactérias. Essa camada funciona como uma barreira adicional por onde a água sobrenadante do filtro passa, sendo submetida a processos biológicos de tratamento, como predação entre os microrganismos, além de atuar como uma barreira física complementar ao meio filtrante (Huisman; Wood, 1974; Campos et al., 2002; De Souza, 2020). No *schmutzdecke*, algas mortas e bactérias são consumidas, liberando sais inorgânicos, enquanto compostos orgânicos nitrogenados são mineralizados e oxidados a nitrato (Huisman; Wood, 1974; De Souza, 2020).

De Souza (2020), em seu estudo observou a presença de diversos micro e macro organismos na superfície do meio filtrante compondo o *schmutzdecke*. Entre esses organismos, destacou-se a presença de diatomáceas, sendo a mais comum a *Aulacoseira sp.* As diatomáceas são relatadas como contribuintes para a colmatação de filtros devido ao seu formato e à composição de sua parede celular, que contém sílica, um material que não se degrada no filtro. A ocorrência dessas diatomáceas pode estar relacionada à disponibilidade de nutrientes na água bruta (Aguila; Di Bernardo, 2003; Taira, 2008).

Silva et al. (2021) demonstram que a estrutura e a composição da comunidade microbiana no *schmutzdecke* podem variar com base nas condições operacionais do filtro e na

qualidade da água afluyente. Mudanças na carga de contaminantes, na temperatura e na presença de nutrientes podem influenciar a diversidade e a atividade dos microrganismos presentes, refletindo a necessidade de um monitoramento contínuo para garantir a eficácia do sistema.

3.6.2 Atividade biológica no meio filtrante

Durante a operação dos filtros, partículas orgânicas e inorgânicas são transportadas e aderem à superfície dos grãos de areia, formando uma camada biológica conhecida como biofilme. Esse biofilme, composto por microrganismos, suas excreções e células mortas, promove a degradação de matéria orgânica e a remoção de partículas suspensas (Huisman; Wood, 1974; Nakamoto, 2011). À medida que o filtro amadurece, as partículas com cargas positivas começam a se aderir à superfície da areia, aumentando a eficiência do processo (Huisman; Wood, 1974).

A presença de uma população microbiológica diversa no meio filtrante permite a biodegradação da matéria orgânica solúvel e contribui para a manutenção da atividade biológica ao longo do tempo. Estudos demonstram que a atividade metabólica no filtro aumenta com o tempo, resultando em uma maior biomassa acumulada no material filtrante (Collins et al., 1991). Além disso, filtros lentos também favorecem processos de nitrificação e desnitrificação, especialmente nas camadas mais profundas, onde as condições de oxigênio e nutrientes variam consideravelmente (Nakhai; Farooq, 2003; Aslan; Cakici, 2007).

Collins et al. (1991) relatam que os filtros lentos possuem uma população microbiológica extensa, com diversidade nutricional e capacidade de biodegradar matéria orgânica solúvel. Os autores também destacam que a raspagem dos filtros contribui para manter altas taxas de atividade metabólica e estimula o crescimento de biomassa.

3.7 ANÁLISE ENZIMÁTICA COMO INDICADOR DE ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA

A análise enzimática, especialmente utilizando o diacetato de fluoresceína (FDA), é um procedimento que pode ser empregado para monitorar a atividade microbiológica em sistemas de filtração de água. A aplicação dessa técnica permite avaliar a presença de microrganismos, bem como o potencial de entupimento biológico, correlacionando a atividade enzimática com a qualidade da água e a eficiência hidráulica dos sistemas filtrantes. Martins (2021) e Puhl (2021) demonstram em seus estudos que a análise enzimática pode servir como uma ferramenta

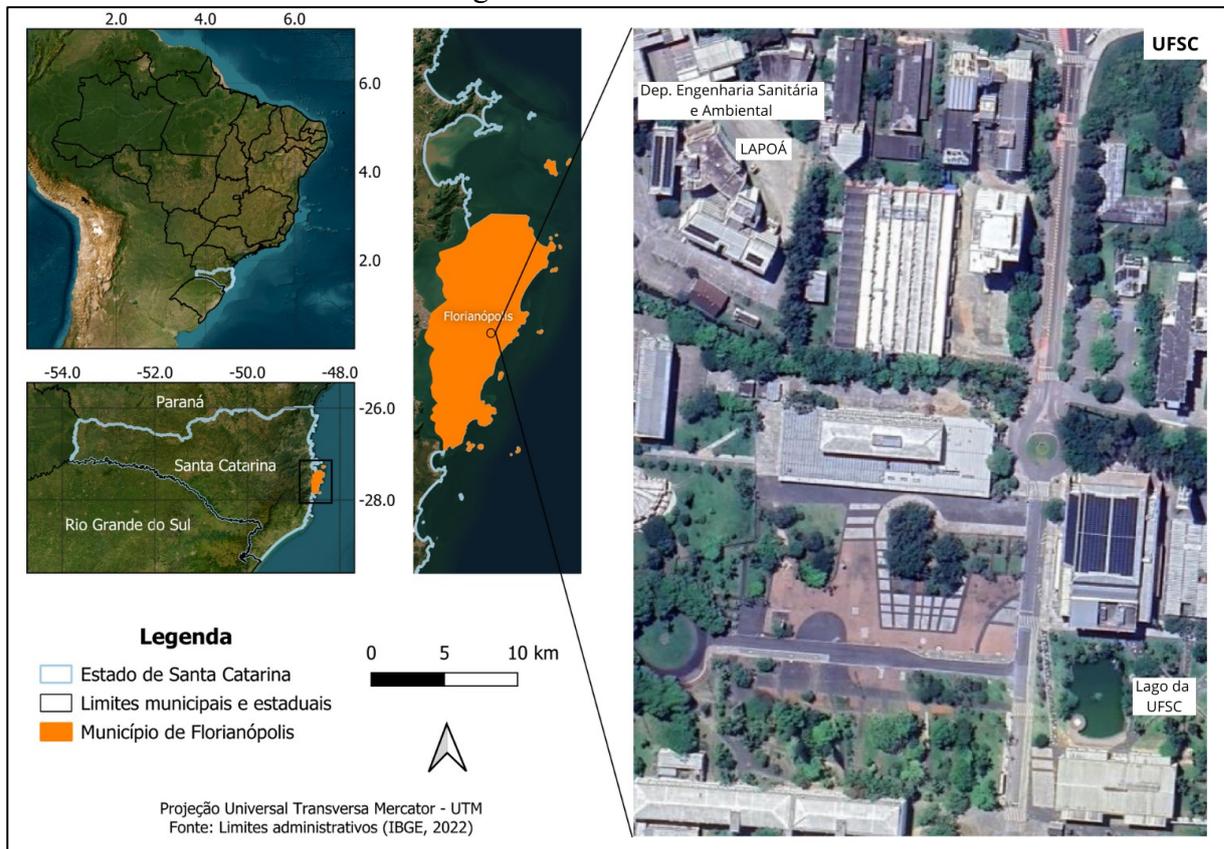
propostas do estudo. Martins (2021), por sua vez, reforça a aplicabilidade desses ensaios na identificação de padrões de colmatção biológica em diferentes granulometrias de meio filtrante, contribuindo para o entendimento das condições ideais para o funcionamento de filtros lentos e sua relação com a atividade microbiológica.

4 MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 DESCRIÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO

O presente trabalho deu continuidade a pesquisa desenvolvida por Silveira (2024), que investigou a influência do uso de esponjas de poliuretano e sementes de *Moringa oleifera* na filtração lenta de regime intermitente. Conforme descrito no estudo inicial, a pesquisa foi conduzida nas instalações da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC), Campus Reitor João David Ferreira Lima, situada no bairro Trindade, no município de Florianópolis, Santa Catarina (Figura 8).

Figura 8 – Local de estudo.



Fonte: A autora (2024).

A água bruta utilizada neste estudo foi coletada diariamente, durante 345 dias, de um lago, localizado no campus da UFSC, que apresenta área de 77m² e profundidade de 1,5m, (Figura 9) e posteriormente transportada ao Laboratório de Potabilização de Águas LAPOÁ (Silveira, 2024). A pesquisa foi feita utilizando-se quatro configurações de filtros lentos intermitentes de areia, sendo denominadas: FLI - filtro lento de regime intermitente, FLIE -

filtro lento intermitente com esponja, FLICD - filtro lento intermitente sem esponja e adição da água decantada pelo coagulante (*Moringa oleifera*) e FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante (*Moringa oleifera*).

Figura 9 – Lago de estudo.



Fonte: A autora (2024).

Os ensaios enzimáticos e avaliação do teor de matéria orgânica foram realizados no Laboratório Integrado de Meio Ambiente (LIMA), enquanto a microscopia eletrônica de varredura (MEV) foi conduzida no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da Universidade Federal de Santa Catarina (UFSC). Já a visualização dos microrganismos ocorreu no Laboratório Multiusuário de Estudos Biológicos (LAMEB), também localizado na UFSC.

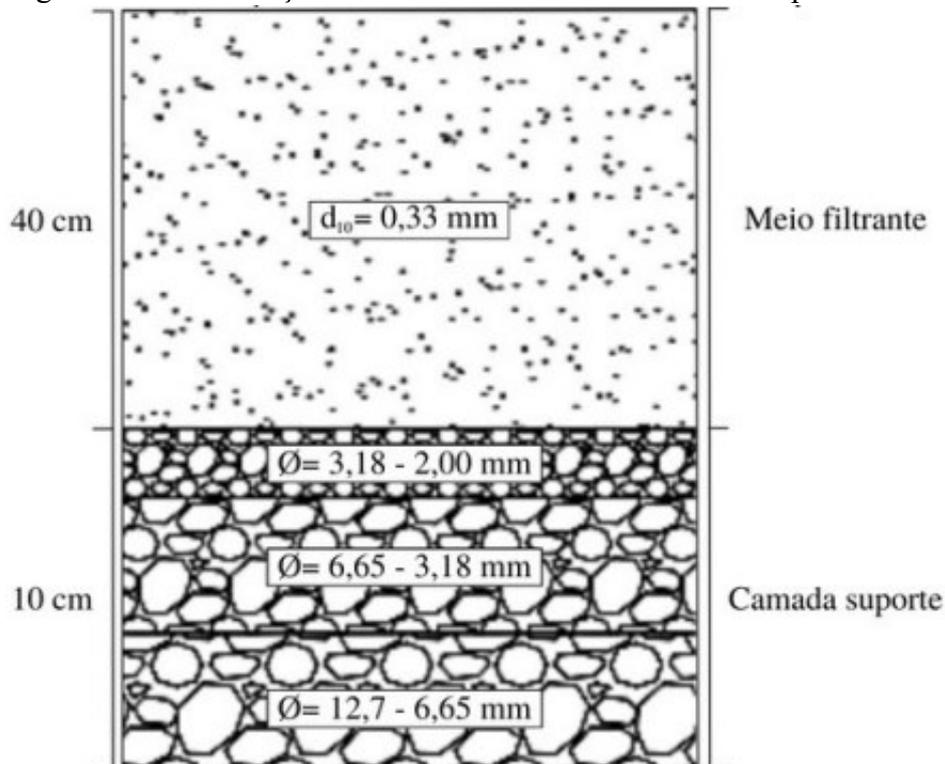
4.2 DESCRIÇÃO DOS FILTROS LENTOS INTERMITENTES

As unidades de filtração utilizadas no presente estudo foram as mesmas construídas e dimensionadas por Silveira (2024). Conforme descrito pela autora, os filtros foram montados de acordo com o modelo proposto por CASWT (2009), sendo operados em regime intermitente

de fluxo descendente.

As estruturas foram construídas utilizando tubos de PVC com 1,0 metro de altura, diâmetro nominal (DN) de 100 mm e diâmetro interno (DI) de 96,4 mm. A base das unidades foi formada por uma camada de suporte com 10 cm de altura, composta por pedregulhos do tipo pedra britada, previamente limpos e secos em estufa. A camada foi subdividida em três granulometrias: de 12,7 a 6,65 mm, 6,65 a 3,18 mm e 3,18 a 2,00 mm, com alturas de 4 cm, 3 cm e 3 cm, respectivamente, conforme ilustrado na Figura 10. Sobre a camada de suporte, foi adicionada a camada filtrante composta por areia, com 40 cm de altura, apresentando diâmetro efetivo (d_{10}) de 0,33 mm, coeficiente de uniformidade (CU) de 1,55 e coeficiente de curvatura (CC) de 1,1 (Silveira, 2024).

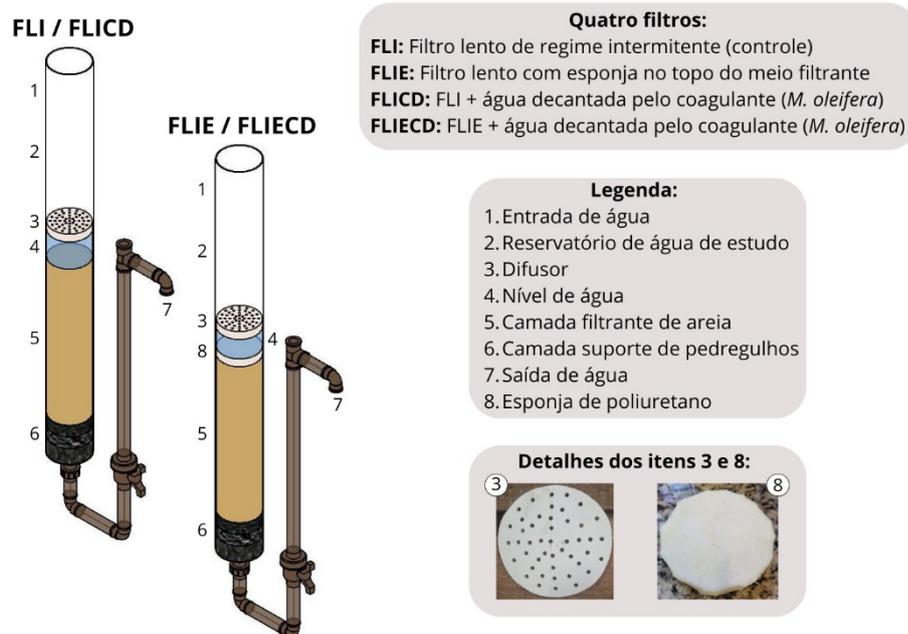
Figura 10 – Distribuição do material filtrante e da camada suporte dos filtros



Fonte: Silveira (2024).

A Figura 11 ilustra o esquema das configurações de filtro lento intermitente, mostrando as versões diferentes entre o layout dos quatro filtros, sendo que dois deles apresentam uma esponja de poliuretano com 2 cm de espessura (FLIE e FLIECD), enquanto os outros dois não apresentam esponja (FLI e FLICD).

Figura 11 – Desenho esquemático dos filtros.



Fonte: A autora (2024).

A primeira configuração, denominada FLI (Filtro Lento de Regime Intermitente), representa o filtro controle operado de forma intermitente, sem a adição de pré-tratamentos. A segunda configuração, FLIE (Filtro Lento Intermitente com Esponja), inclui uma esponja de poliuretano posicionada no topo do meio filtrante, atuando como um pré-tratamento ao coar partículas maiores antes da água atingir o meio de filtração. A terceira configuração, FLICD (Filtro Lento Intermitente com Adição da Água Decantada pelo Coagulante), utiliza a adição de água decantada pelo coagulante natural (*M. oleifera*), sem a presença da esponja. Por fim, a quarta configuração, FLIECD (Filtro Lento Intermitente com Esponja e Adição da Água Decantada pelo Coagulante), combina os dois métodos de pré-tratamento, utilizando tanto a esponja de poliuretano quanto a água decantada pelo coagulante (*M. oleifera*).

Todas as quatro unidades contam com a presença de um prato difusor, que permite que a água flua lentamente e de maneira uniforme sobre a lâmina d'água, evitando a perturbação do *schmutzdecke*. O prato difusor foi construído utilizando um CAP DN de 100 mm, que foi cortado e perfurado (Silveira, 2024).

4.3 OPERAÇÃO DOS FILTROS LENTOS INTERMITENTES

O monitoramento da operação dos filtros lentos intermitentes ocorreu de julho de 2023 a julho de 2024, envolvendo a alimentação diária das unidades, permitindo um regime de

funcionamento intermitente onde a água era introduzida em intervalos estabelecidos. A alimentação ocorreu manualmente com 1,3 L de água bruta (FLI e FLIE) e decantada (FLICD e FLIECD) a cada 24 horas em um regime intermitente, seguida pela metodologia de CAWST (2012).

O volume de alimentação foi calculado a partir do volume dos poros. A porosidade total é definida como a relação entre o volume de vazios e o volume total de um sedimento, podendo ser representada como uma fração decimal ou em forma de porcentagem. Isso se deve ao fato de que o volume total do sedimento é composto pela porção sólida e pelos espaços vazios (Freeze & Cherry, 1979; Martins, 2021; Silveira, 2024). De acordo com Silveira, foi considerado um valor de 44% para a porosidade total e uma altura de 40 cm para o meio filtrante das unidades de filtração utilizadas. Dessa forma, foi possível determinar o volume dos poros utilizando as Equações 3 e 4:

$$Ab = \pi \cdot r^2 \quad (3)$$

$$V = Ab \cdot h \cdot 0,44 \quad (4)$$

onde:

V = volume dos poros (m³);

Ab = área da base (m²);

h = altura do meio filtrante (m);

π = pi (3,14);

r = raio (m).

A vazão inicial foi medida volumetricamente, conforme o método descrito por CAWST (2012), e a limpeza dos filtros foi realizada sempre que a vazão inicial estabelecida fosse inferior a 30 ml/min. A manutenção consistiu na raspagem dos primeiros centímetros da camada de areia nas configurações FLI e FLIE, enquanto nas configurações FLICD e FLIECD a esponja foi comprimida e descomprimida em 350 ml de água para sua limpeza (Silveira, 2024).

4.3.1 Pré-tratamento com *Moringa oleifera*

As duas configurações de filtro lento intermitente com água decantada (FLICD e FLIECD), foram submetidas ao pré-tratamento com o pó das sementes de *Moringa oleifera*,

visando reduzir a turbidez e remover partículas suspensas da água antes da sua passagem nos filtros.

Para a preparação do coagulante em pó, foi seguida a metodologia de Miller et al. (2008), com adaptações. As sementes de *Moringa oleifera* foram trituradas em um liquidificador e, em seguida, peneirados até se obter partículas com aproximadamente 1 mm de diâmetro. O pó resultante foi armazenado em um recipiente hermético por até um mês, sendo utilizado nos ensaios de *Jartest* e em adaptações com garrafas de água mineral, para determinação das dosagens ótimas.

Após determinar a dosagem ideal do coagulante por meio do *Jartest* a etapa foi adaptada substituindo o equipamento por garrafas de água mineral, com o objetivo de desenvolver uma técnica viável para comunidades isoladas. Nesse processo, as garrafas foram preenchidas com água bruta, e a melhor dosagem do coagulante foi aplicada. Em seguida, realizou-se a agitação das garrafas com movimentos circulares, permitindo que a água decantasse antes de ser utilizada na alimentação dos sistemas FLICD e FLIECD (Silveira, 2024).

A Figura 12 apresenta os procedimentos detalhados para a preparação do coagulante utilizado neste trabalho, ilustrando as etapas na seguinte ordem: (A) vagens maduras e secas; (B) retirada das sementes das vagens; (C) sementes descascadas manualmente; (D) trituração das sementes; (E) peneiramento e (F) pó resultante (Silveira, 2024).



Fonte: Adaptado de Silveira (2024).

4.3.2 Procedimento de limpeza dos filtros

No presente estudo, o procedimento de limpeza dos filtros foi baseado nas orientações da CAWST (2012), adaptadas para as características dos filtros instalados no LAPOÁ, que possuem uma área e uma vazão menores em relação ao modelo descrito no manual. Conforme descrito por Silveira (2024), foi ajustada uma vazão de aproximadamente 45 mL/min, com um limite máximo de 50 mL/min e mínimo de 30 mL/min, considerando o reservatório cheio.

A limpeza dos filtros seguiu o método tradicional de raspagem. Inicialmente, removiam-se o prato difusor, e o sobrenadante era sifonado com o auxílio de uma mangueira. Posteriormente, realizava-se a raspagem dos 5 cm superiores do meio filtrante, o qual era nivelado antes de recolocar o prato difusor e adicionar água até o nível de saída do filtro (Silveira, 2024).

Nos filtros contendo esponjas de poliuretano, a limpeza era realizada por compressão e liberação da esponja em cinco recipientes consecutivos contendo 350 mL de água. Durante o processo, a esponja era transferida de um recipiente para outro, com movimentos repetitivos, sendo posteriormente recolocada no filtro correspondente (Silveira, 2024).

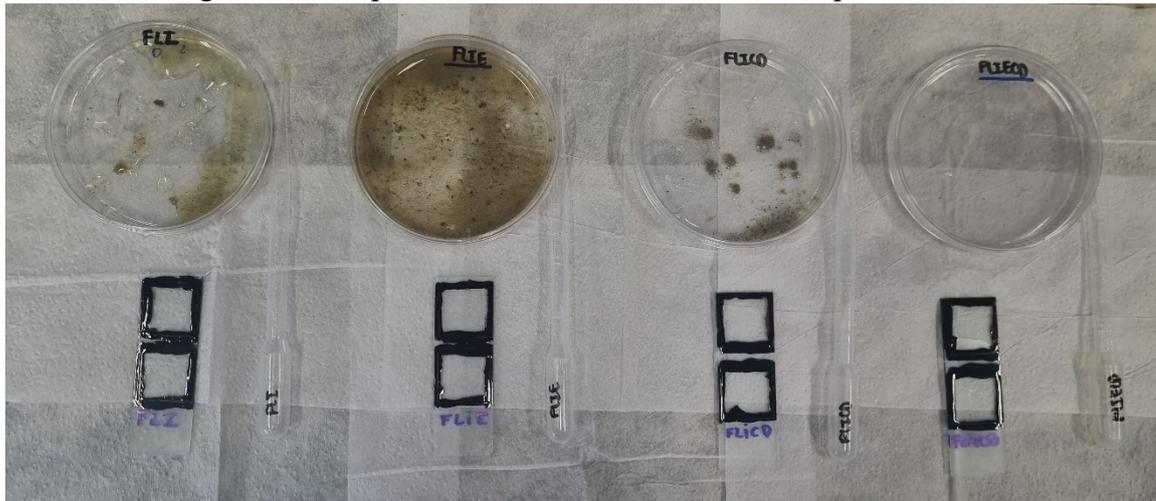
4.4 PREPARAÇÃO DAS AMOSTRAS PARA MICROSCOPIA DE CAMPO CLARO

A visualização da camada biológica (*schmutzdecke*) foi realizada por microscopia de campo claro, com o objetivo de observar a comunidade microbiana formada na superfície do meio filtrante e da esponja de poliuretano. As amostras de cada unidade de filtração foram coletadas entre o mês de abril e junho de 2024, para a observação e identificação dos microrganismos atuantes na camada biológica das diferentes configurações propostas.

As análises e fotomicrografias foram conduzidas utilizando um microscópio invertido de campo claro (Olympus IX83) localizado no Laboratório Multiusuário de Estudos Biológicos (LAMEB) da Universidade Federal de Santa Catarina. As amostras foram analisadas logo após a coleta, para preservação das mesmas.

Utilizando uma pipeta Pasteur, foi coletado aproximadamente 1 ml de amostra de *schmutzdecke* da areia (FLI e FLICD) e da esponja de poliuretano (FLIE e FLIECD), sendo posteriormente adicionada à lâmina, que foi selada com uma lamínula posicionada sobre a amostra (Figura 13).

Figura 13 – Preparo das amostras de *schmutzdecke* para análise.



Fonte: A autora (2024).

A identificação dos microrganismos foi realizada com o suporte da equipe do Laboratório de Ficologia da UFSC (LAFIC), permitindo uma avaliação detalhada da diversidade microbiana ativa no *schmutzdecke*, enquanto a tratativa das imagens foi feita utilizando o software *Image J*.

4.5 OBSERVAÇÃO DA MICROESTRUTURA DAS ESPONJAS DE POLIURETANO

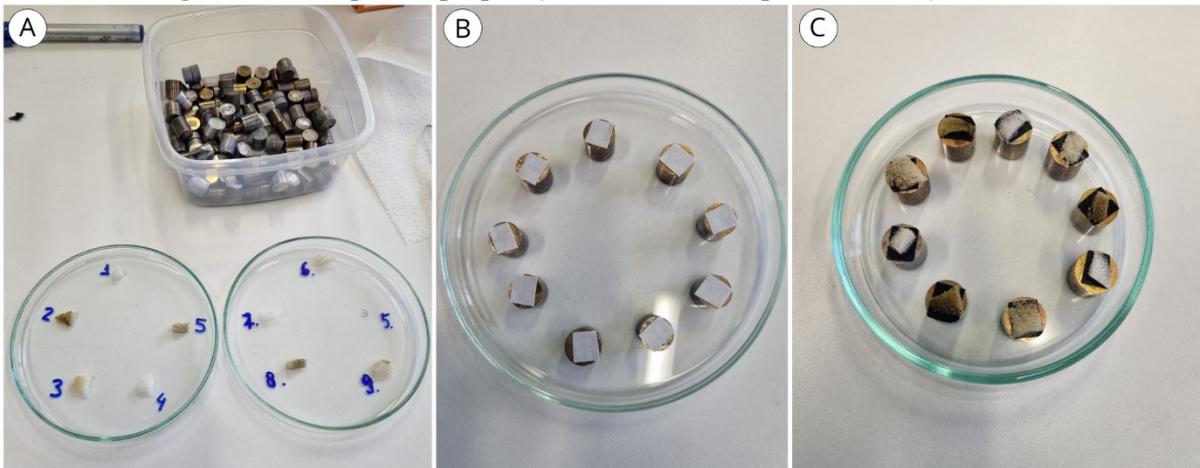
A observação da microestrutura das esponjas de poliuretano foi feita por meio de fotomicrografias obtidas no microscópio eletrônico de varredura JEOL JSM-6390LV (MEV), conduzida no Laboratório Central de Microscopia Eletrônica (LCME) da UFSC. A análise permitiu uma visualização detalhada dos poros da esponja de poliuretano e da distribuição das partículas e microrganismos retidos em sua superfície. Foram comparadas amostras de uma esponja controle (antes da utilização) com aquelas retiradas após a operação dos filtros FLIE e FLIECD. Foram cortadas amostras com aproximadamente 3 cm (cada amostra), fixadas por 1 hora em solução de Glutaraldeído a 3%, e lavadas 3 vezes com tampão fosfato 0,1M (pH 7,2) (Souza et al., 2021).

Posteriormente, as amostras foram submetidas a um processo de desidratação gradual com soluções de etanol/água de diferentes concentrações crescentes: 50%, 70%, 80%, 90%, finalizando com 3 trocas em etanol absoluto (100%). A desidratação foi concluída com a aplicação de hexametildissilazano (HMDS), substituindo o etanol residual e garantindo a integridade estrutural da amostra. Por fim, as amostras desidratadas foram coladas com fitas condutivas dupla face em stubs de alumínio, revestidas com 25mm de ouro e observadas no

MEV com ampliações de 100 a 1000 vezes a 20Kv (Souza et al., 2021).

A metodologia descrita garantiu a preservação da microestrutura das amostras para análise, conforme relatado em Souza et al. (2021) e estudos similares, como Fratesi et al. (2004) e Karcz et al. (2012). Na Figura 14 é possível visualizar as etapas de preparação após coleta das amostras, as figuras seguem a seguinte ordem: (A) desidratação da amostra com solução HMDS; (B) fixação das amostras em stubs de alumínio e (C) revestimento das amostras com camada de ouro.

Figura 14 – Etapas de preparação das amostras para observação em MEV.



Fonte: A autora (2024).

4.6 ANÁLISE ENZIMÁTICA DO MEIO FILTRANTE

A análise enzimática do meio filtrante foi realizada com o objetivo de quantificar a atividade microbiológica presente nos filtros lentos intermitentes. Após 345 dias de operação dos filtros, a alimentação dos pilotos foi interrompida, dando início a análise enzimática utilizando o método de Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA).

Os filtros tiveram seus registros abertos para realização da drenagem lenta e posterior raspagem das camadas. As amostras das camadas foram acondicionadas e identificadas em embalagens plásticas transparentes, dando início às análises de imediato (Figura 15).

Figura 15 – Preparação das amostras coletadas no meio filtrante.



Fonte: A autora (2024).

Para evitar procedimentos que pudessem interferir nos resultados dos ensaios, foi aberto o registro de um filtro por dia e a alimentação das colunas restantes foram mantidas diariamente até que fossem abertas e submetidas ao ensaio (Martins, 2021).

As camadas identificadas correspondem às seguintes profundidades:

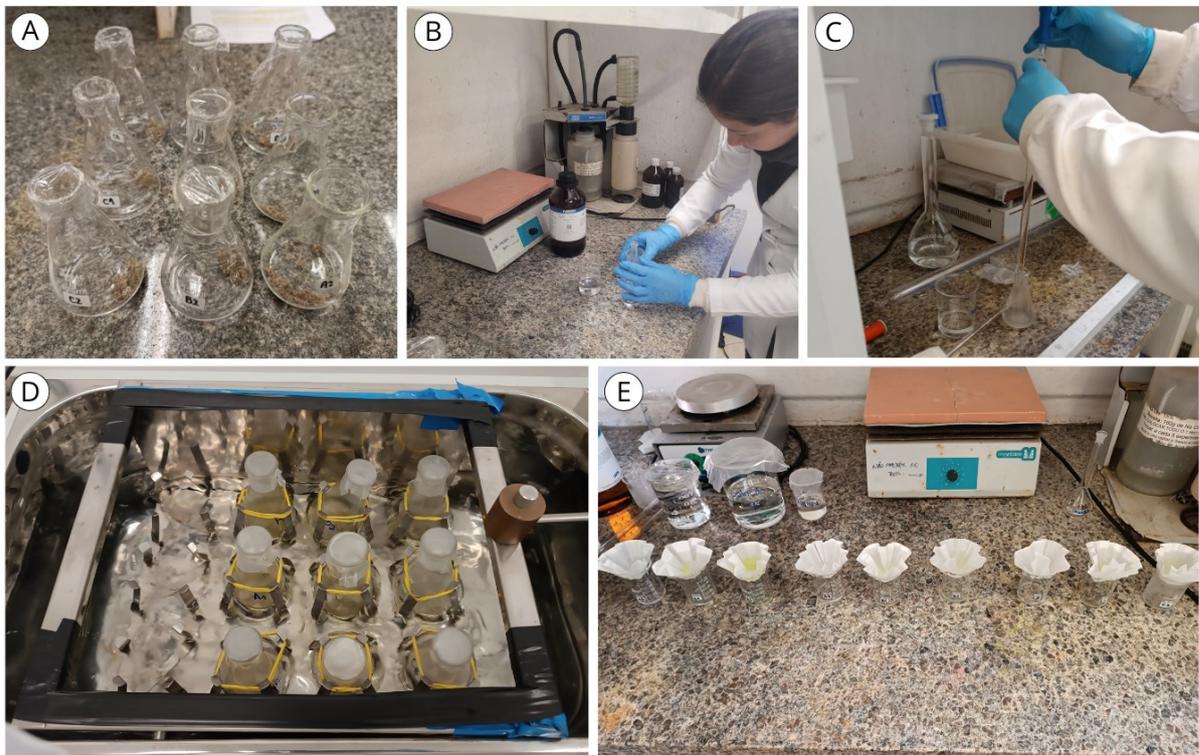
- Camada A = 0 a 2 cm;
- Camada B = 2 a 4 cm;
- Camada C = 4 a 6 cm;
- Camada D = 6 a 10 cm;
- Camada E = 10 a 15 cm;
- Camada F = 15 a 20 cm;
- Camada G = 20 a 25 cm;
- Camada H = 25 a 30 cm;
- Camada I = 30 a 40 cm.

A metodologia foi baseada no estudo de Adam e Duncan (2001), com algumas adaptações conforme Martins et al. (2021) e Puhl et al. (2023). Foram utilizadas 2 g de amostra de areia (amostra de material filtrante), colocadas em frascos Erlenmeyer e adicionados posteriormente 15 ml de tampão fosfato de potássio (60 mM, pH 7,6) e 0,2 ml de FDA a 1000 µg/ml. As análises foram realizadas em duplicata, acompanhadas dos seus respectivos brancos, os quais não foram submetidos a adição de FDA. Um total de 108 amostras foram coletadas, com 27 de cada filtro (duplicatas e brancos).

Cada Erlenmeyer foi selado com parafilm e as amostras foram dispostas em um Shaker (marca Marklabor), a 30°C por 20 minutos. A reação de hidrólise foi interrompida com clorofórmio/metanol (2:1 v/v). Posteriormente, as amostras foram centrifugadas a 2000 rpm por 3 minutos, e o sobrenadante foi filtrado com papel de filtro qualitativo (Whatman, No 2) e analisado em um espectrofotômetro a 490 nm (UV-Vis Bel Engineering M51).

A fluoresceína resultante da hidrólise foi quantificada por espectrofotometria, medindo-se a intensidade da fluoresceína emitida, que está diretamente relacionada à atividade enzimática e, portanto, quantificando a atividade microbiológica do meio filtrante de cada configuração estudada. Na Figura 16 é possível visualizar as etapas correspondentes ao método de Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA), sendo (A) amostras de areia colocadas em frascos Erlenmeyer após pesagem; (B) adição de tampão fosfato de potássio; (C) adição de FDA; (D) agitação da mistura e (E) sobrenadante sendo filtrado com papel.

Figura 16 – Etapas do ensaio de hidrólise do diacetato de fluoresceína (FDA).



Fonte: A autora (2024).

4.7 AVALIAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

Para a avaliar o teor de matéria orgânica, cinco gramas de amostras do meio filtrante foram pesados de cada camada das quatro unidades de filtração, utilizando cadinhos de porcelana e uma balança analítica. As amostras foram secas em estufa a 105°C por um período

de 24 horas e, em seguida, colocadas em dessecadores até atingirem a temperatura ambiente, momento em que foram novamente pesadas.

Posteriormente, as amostras foram incineradas em uma mufla a 500°C por 6 horas. Após o resfriamento nos dessecadores, foram pesadas novamente, descontando-se o peso previamente registrado dos cadinhos. A diferença de massa antes e depois da incineração foi utilizada para calcular o teor de matéria orgânica presente nas amostras, conforme a Equação 1 (Adam e Duncan, 2001). A Figura 17 apresenta a preparação das amostras do meio filtrante para análise do teor de matéria orgânica, as figuras correspondem a: (A) amostras em cadinhos de porcelana após pesagem e (B) amostras inseridas em dessecador.

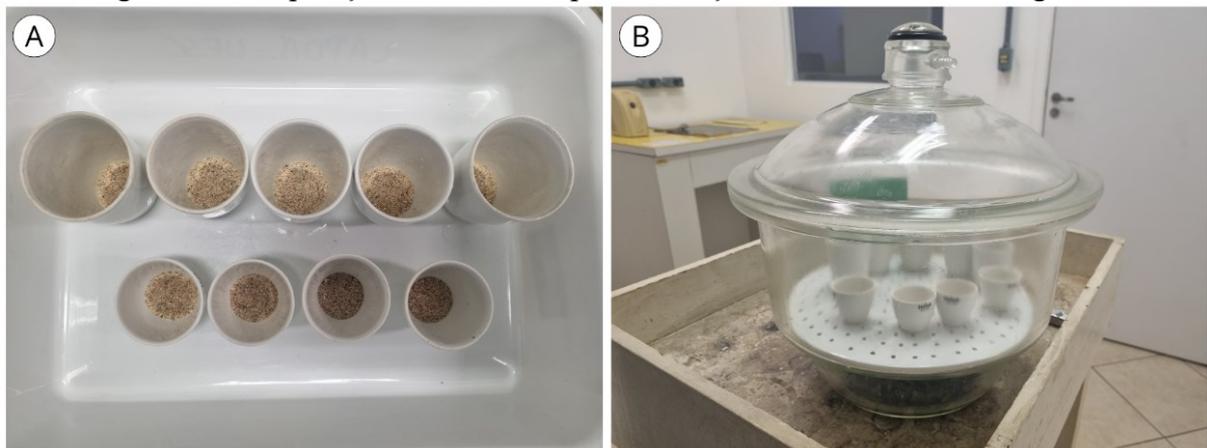
$$\text{Teor de matéria orgânica} = \frac{M1-M2}{M1} \cdot 100 \quad (1)$$

Onde,

M1 = massa da amostra seca (g);

M2 = massa da amostra após mufla (g).

Figura 17 – Preparação das amostras para avaliação do teor de matéria orgânica.



Fonte: A autora (2024).

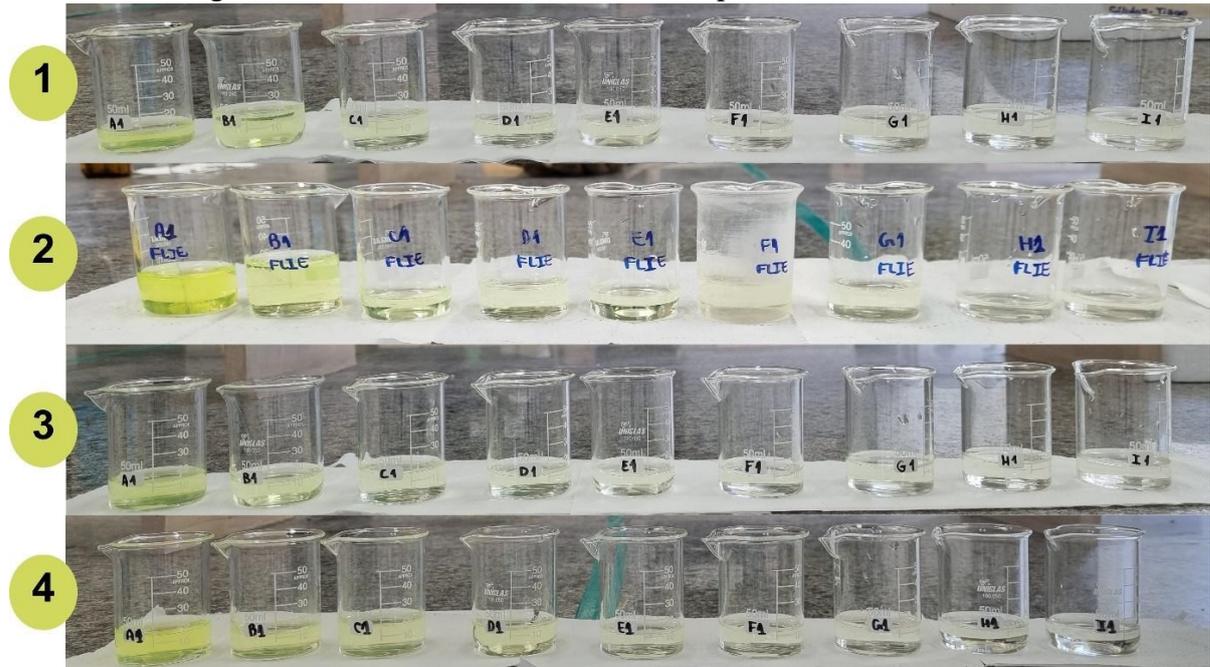
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 AVALIAÇÃO DA ATIVIDADE MICROBIOLÓGICA POR MEIO DA ANÁLISE ENZIMÁTICA COM DIACETATO DE FLUORESCEÍNA (FDA)

A Hidrólise do Diacetato de Fluoresceína (FDA) é amplamente reconhecida como um método preciso e simples para quantificar a atividade microbiana total em diversas amostras ambientais, incluindo solos (Adam e Duncan, 2001). Esse método se baseia na ação enzimática que hidrolisa o substrato de FDA, liberando uma cor fluorescente à base de fluoresceína, que atua como indicador de atividade microbiológica. De acordo com Martins (2021) e Puhl (2021) nos primeiros centímetros do meio filtrante de areia, ocorre uma reação de hidrólise e desidratação de FDA pelas enzimas esterases de maneira intensificada, refletindo um alto nível de atividade microbiológica. Essa aparência é consequência do processo de retenção de partículas suspensas e do crescimento microbiano, favorecido pela presença de oxigênio e nutrientes, que são essenciais para a degradação dos substratos.

Na Figura 18 é possível observar o resultado visual das análises realizadas, antes do descarte, em cada camada do meio filtrante nas diferentes configurações dos filtros lentos intermitentes. As amostras correspondem às seguintes configurações de filtros: (1) FLI - filtro lento de regime intermitente, (2) FLIE - filtro lento intermitente com esponja, (3) FLICD - filtro lento intermitente sem esponja e adição da água decantada pelo coagulante (*Moringa oleifera*) e (4) FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante (*Moringa oleifera*).

Figura 18 – Análise visual das amostras após os ensaios de FDA.



Fonte: A autora (2024).

Os primeiros centímetros do meio filtrante correspondem a camada de maior liberação de fluoresceína, possuindo um produto final com cor amarelada mais visível. Isso significa alta atividade microbológica resultante do processo de retenção de partículas suspensas e crescimento microbológico, possivelmente devido à disponibilidade de oxigênio dissolvido e nutrientes (Martins et al., 2021).

A Tabela 1 apresenta as concentrações de fluoresceína obtidas com o Método do Diacetato de Fluoresceína (FDA) realizado em duplicata para as quatro configurações de filtros avaliadas. Os gráficos, apresentados nas Figuras 19 e 20, contém as médias dos valores de atividade enzimática nas camadas de todas as configurações de filtros estudadas.

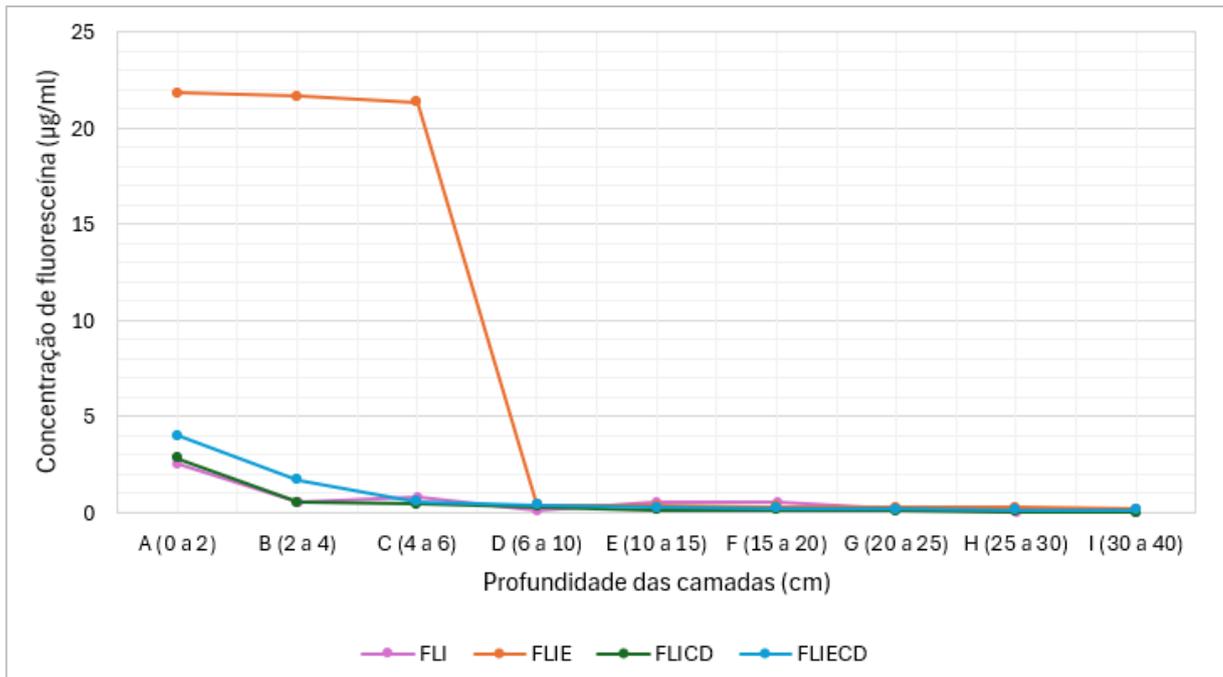
Tabela 1 – Valores da concentração de fluoresceína em cada amostra analisada.

Concentração de fluoresceína (ug/ml)					
Amostra	Grupo	FLI	FLIE	FLICD	FLIECD
A1	A	1,82	21,81	2,89	4,02
A2	A	3,21	21,81	2,79	3,94
B1	B	0,57	22,37	0,5	1,72
B2	B	0,55	20,91	0,51	1,65
C1	C	0,94	20,91	0,42	0,52
C2	C	0,73	21,79	0,43	0,64
D1	D	0,11	0,37	0,32	0,45
D2	D	0,058	0,38	0,32	0,36
E1	E	1,03	0,3	0,12	0,23
E2	E	0	0,4	0,14	0,27
F1	F	1,13	0,31	0,1	0,2
F2	F	0	0,31	0,15	0,21
G1	G	0,36	0,29	0,086	0,16
G2	G	0	0,23	0,11	0,21
H1	H	0,012	0,26	0,078	0,14
H2	H	0	0,23	0,026	0,15
I1	I	0	0,16	0,025	0,12
I2	I	0	0,17	0,022	0,11
Média		0,584	7,389	0,502	0,839

Legenda: As siglas na coluna “Amostra” representam as duplicatas: 1 – amostra 1; 2 – amostra 2. FLI - filtro lento de regime intermitente, FLIE - filtro lento intermitente com esponja, FLICD - filtro lento intermitente sem esponja e adição da água decantada pelo coagulante e FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante.

Fonte: A autora (2024).

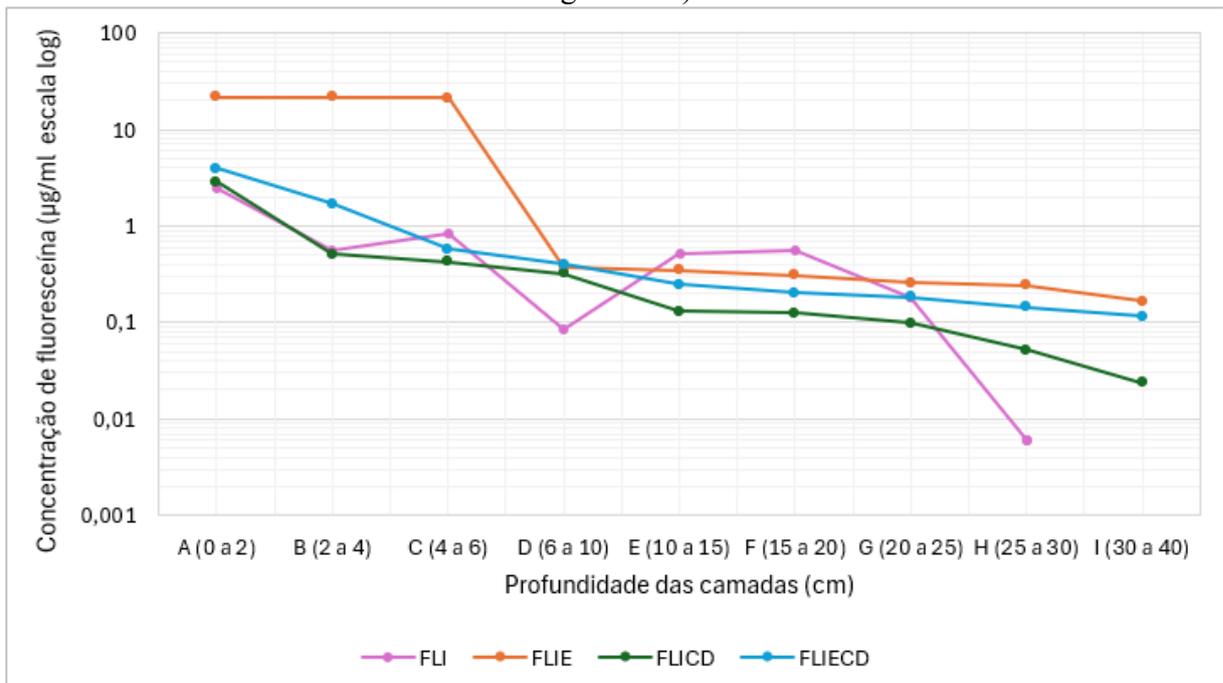
Figura 19 – Valores médios de atividade enzimática conforme profundidade da camada.



Legenda: FLI - filtro lento de regime intermitente, FLIE - filtro lento intermitente com esponja, FLICD - filtro lento intermitente sem esponja e adição da água decantada pelo coagulante e FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante.

Fonte: A autora (2024).

Figura 20 – Valores médios de atividade enzimática conforme profundidade (em escala logarítmica).



Legenda: FLI - filtro lento de regime intermitente, FLIE - filtro lento intermitente com esponja, FLICD - filtro lento intermitente sem esponja e adição da água decantada pelo coagulante e FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante.

Fonte: A autora (2024).

Em todas as configurações de filtros avaliadas, os resultados indicam que a atividade enzimática por enzimas esterases tende a ser mais elevada nas camadas superficiais (camadas A e B). O comportamento observado nos filtros foi de redução da atividade enzimática com o aumento da profundidade, podendo ser um reflexo da diminuição gradativa da disponibilidade de oxigênio e nutrientes presentes nas camadas mais profundas do filtro lento, como na zona anaeróbia (Figura 4).

Nos sistemas de filtração lenta, as camadas superficiais do meio filtrante, especialmente a camada do *schmutzdecke*, possuem maior disponibilidade de oxigênio dissolvido e uma alta concentração de matéria orgânica e partículas suspensas, que servem como substrato para os microrganismos (Pizzolatti, 2014; de Souza, 2020).

No trabalho de Martins (2021) também foi observado que a atividade enzimática decaiu em profundidade do meio filtrante. Neste estudo observou-se que os primeiros centímetros do meio filtrante correspondem às camadas com maior liberação de fluoresceína, devido à hidrólise do substrato. Esse comportamento foi atribuído à alta atividade microbiológica nas camadas superficiais, causada pelo acúmulo de partículas e pela formação de biofilme, o que também resultou em maior perda de condutividade hidráulica e maior retenção de frações orgânicas na primeira camada do filtro (Baveye et al., 1998; Pavelic et al., 2007; Rinck-pfeiffer et al., 2000; Martins, 2021).

As maiores concentrações de fluoresceína, equivalente a 22,37 µg/ml e 4,02 µg/ml, foram observadas no FLIE e FLIECD, respectivamente, sendo superior aos valores encontrados nos demais filtros. A comparação dos dados dos filtros com e sem esponja de poliuretano demonstrou que o material cumpriu seu papel, atuando como uma barreira física, retendo partículas e matéria orgânica nas camadas superiores, o que favoreceu a formação de uma camada biológica densa e rica em microrganismos, conforme apontado pelos valores de concentração obtidos nas camadas subsequentes de areia.

A esponja de poliuretano desempenhou um papel significativo, possivelmente, devido à sua elevada área superficial específica, que proporciona um amplo espaço para acúmulo de nutrientes e atividades microbiológicas. Esse comportamento favorece o desenvolvimento da atividade enzimática na esponja, que, eventualmente, se aproxima fisicamente do *schmutzdecke* através do fluxo descendente da água e da ação da gravidade. Esse comportamento ocorre porque a esponja se localiza em uma camada imediatamente superior ao meio filtrante, que apresenta maior resistência à passagem das partículas. Dessa forma, a atividade microbiológica e os materiais acumulados na esponja tendem a ser lentamente transportados em profundidade.

No estudo de Silveira (2024), foi discutido o comportamento dos filtros com e sem esponja de poliuretano, e como resultado foi observado que uma considerável quantidade de sólidos suspensos foi retida na esponja, o que auxiliou no prolongamento da carreira de filtração dos filtros com o material. Ao observar os dados do estudo anterior, é possível apontar que o uso da esponja e a frequência de limpeza dos filtros podem ter influenciado na atividade microbiológica do meio filtrante nas primeiras camadas do meio filtrante.

No estudo de Silveira (2024), foi discutido o comportamento dos filtros com e sem esponja de poliuretano, e como resultado foi observado que uma considerável quantidade de sólidos suspensos foi retida na esponja, o que auxiliou no prolongamento da carreira de filtração dos filtros com o material. Esse prolongamento ocorreu, em parte, devido à menor frequência de limpeza necessária nos filtros com esponja, uma vez que o material atuou como uma camada adicional de retenção de sólidos. Ao observar os dados do estudo anterior, é possível apontar que o uso da esponja e a menor frequência de limpeza dos filtros podem ter influenciado positivamente na atividade microbiológica nas primeiras camadas do meio filtrante, favorecendo a formação e o enriquecimento do *schmutzdecke*.

No filtro FLI, a atividade enzimática ao longo do meio filtrante não apresentou uma diminuição linear, diferentemente das outras configurações de filtro. Esse comportamento pode ser atribuído à ausência de um pré-tratamento físico (como a esponja de poliuretano) ou químico (como o coagulante) que, nas outras configurações, ajuda a reter partículas e matéria orgânica nas camadas superficiais, resultando em uma atividade microbiológica mais concentrada no topo e um decaimento mais previsível em profundidade.

No caso do FLI, houve, possivelmente, uma distribuição mais dispersa de matéria orgânica ao longo do meio filtrante, o que leva a variações de atividade enzimática em diferentes profundidades, pois as partículas, nutrientes e oxigênio dissolvido podem se distribuir de maneira mais heterogênea no meio filtrante. Esse resultado pode estar associado a grande quantidade de carreiras de filtração obtidas no FLI, conforme relatado por Silveira (2024), devido à grande carga orgânica presente na água bruta, o que influenciou no aumento da frequência de limpezas (método de raspagem) e, conseqüentemente, no maior arraste de materiais em profundidade.

Baptista et al., (2017) apresentam que o uso de *Moringa oleifera* pode aumentar a demanda biológica e química de oxigênio, assim como as concentrações de matéria orgânica dissolvida na água tratada. De acordo com Silveira (2024), a combinação do pré-tratamento com o coagulante natural pode ter contribuído para a diminuição da atividade microbiana nos filtros FLICD e FLIECD.

A média da concentração de fluoresceína nas camadas dos filtros FLI, FLIE, FLICD e FLIECD foi de 0,58; 7,39; 0,50 e 0,84 µg/ml, respectivamente. A menor concentração observada pode estar relacionada à frequência e ao método de limpeza, que envolve a raspagem do *schmutzdecke* e das camadas superiores da areia (FLI e FLICD), e a compressão e descompressão da esponja de poliuretano (FLIE e FLIECD) (Silveira, 2024).

Como indicado neste estudo, as camadas superiores são as mais biologicamente ativas, e sua remoção perturba o meio filtrante e a comunidade biológica, prolongando o tempo necessário para o restabelecimento da atividade microbiológica. Silveira (2024) observou que o FLI e o FLICD tiveram mais carreiras de filtração do que o FLIE e o FLIECD, com esses últimos apresentando maior concentração de fluoresceína, quando comparados com os filtros alimentados com a mesma água. Embora o intervalo entre as limpezas não tenha sido foco neste estudo, é possível que tenha impactado nos valores obtidos na análise.

5.2 AVALIAÇÃO DO TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA

A turbidez da água bruta do Lago da UFSC reflete a alta concentração de partículas em suspensão, característica comum de ambientes eutrofizados com elevada carga orgânica. No estudo de Cardoso (2018), foram registrados valores médios de turbidez de 10.331,56 RFU no ponto 1, localizado próximo ao píer do lago junto ao Centro de Convivência, e 9.925,44 RFU no ponto 2, situado sob a escultura artística “Boitá Incandescente”, ao lado do Centro de Cultura e Eventos. Esses níveis elevados estão diretamente associados a baixa transparência da água e à presença de matéria orgânica dissolvida, fitoplâncton e detritos em suspensão, que comprometem a qualidade visual da água e dificultam os processos de filtração e desinfecção.

Os resultados da avaliação do teor de matéria orgânica para as diferentes configurações de filtros estão apresentados na Tabela 2. Na Figura 21 é possível observar o gráfico dos valores obtidos.

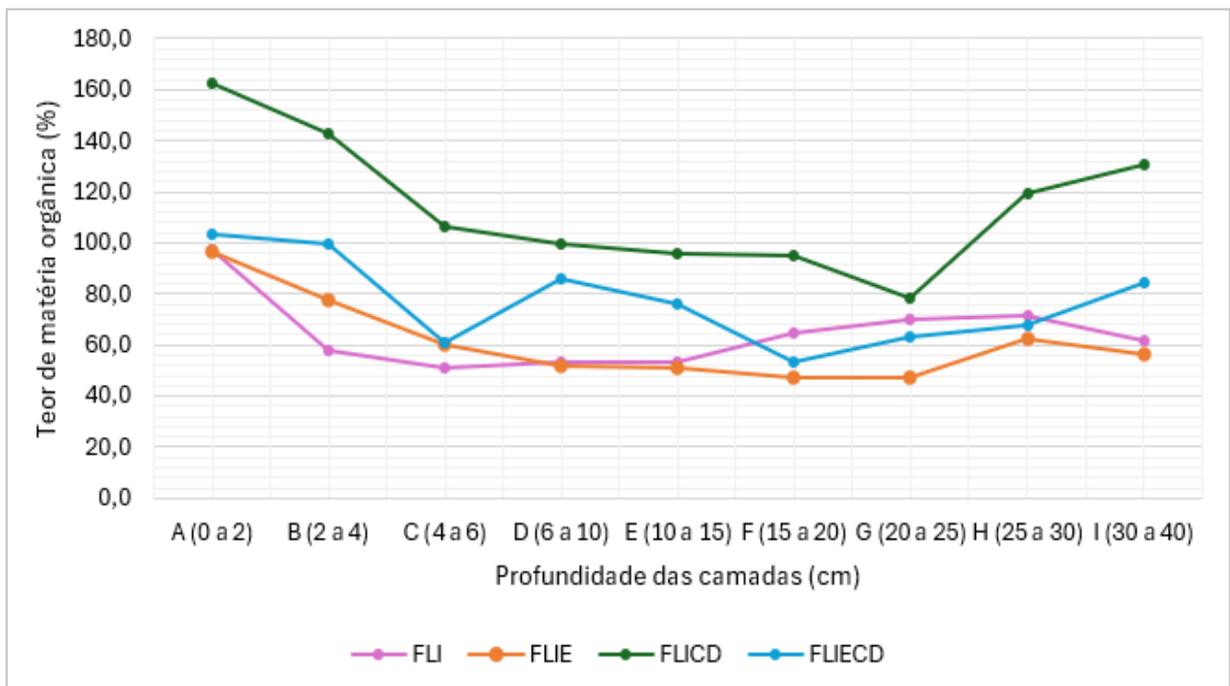
Tabela 2 – Teor de matéria orgânica nas configurações de filtro lento conforme profundidade.

Grupo	Profundidade (cm)	Teor de matéria orgânica (%)			
		FLI	FLIE	FLICD	FLIECD
A	A (0 a 2)	97,3	96,6	162,6	103,3
B	B (2 a 4)	57,6	77,7	143,0	99,3
C	C (4 a 6)	51,4	60,4	106,7	60,9
D	D (6 a 10)	53,5	52,1	99,8	86,1
E	E (10 a 15)	53,3	51,0	95,9	76,1
F	F (15 a 20)	64,5	46,9	95,1	53,3
G	G (20 a 25)	70,2	47,0	78,1	63,2
H	H (25 a 30)	71,4	62,8	119,2	67,8
I	I (30 a 40)	61,5	56,5	130,9	84,7

Legenda: FLI - filtro lento de regime intermitente, FLIE - filtro lento intermitente com esponja, FLICD - filtro lento intermitente sem esponja e adição da água decantada pelo coagulante e FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante.

Fonte: A autora (2024).

Figura 21 – Teor de matéria orgânica em porcentagem para cada configuração de filtro.



Legenda: FLI - filtro lento de regime intermitente, FLIE - filtro lento intermitente com esponja, FLICD - filtro lento intermitente sem esponja e adição da água decantada pelo coagulante e FLIECD - filtro lento intermitente com esponja e adição da água decantada pelo coagulante.

Fonte: A autora (2024).

Assim como na análise enzimática, os resultados tendem a mostrar que a concentração de matéria orgânica é mais alta nas camadas superficiais (camadas A e B) e diminui progressivamente em direção às camadas mais profundas (camadas H e I).

Nos filtros FLICD e FLIECD, observa-se um teor de matéria orgânica mais elevado nas camadas superiores, quando comparados aos filtros que não utilizam coagulante. Esse acúmulo de matéria orgânica pode estar diretamente relacionado à atividade microbiológica, pois serve como fonte de nutrientes para os microrganismos presentes na camada de filtração. As camadas que apresentam maior concentração de matéria orgânica também apresentam níveis mais elevados de atividade enzimática, reforçando a relação entre a disponibilidade de substrato e a atividade microbiana.

Nos filtros com água decantada (FLICD e FLIECD), também foi observado que algumas camadas mais profundas contêm teores de matéria orgânica mais elevados em comparação aos outros filtros. Esse comportamento pode estar associado à utilização e ao modo de preparo do coagulante natural, que durante o processo de coagulação e decantação, gera subprodutos orgânicos, resultantes da suspensão gradual da matéria orgânica, que podem ser transportados para camadas mais profundas pelo filtro (Liu et al., 2019; Silveira, 2024).

De forma geral, os resultados obtidos evidenciam uma tendência de decaimento nos teores de matéria orgânica ao longo da profundidade das camadas do meio filtrante. Esse comportamento se mantém semelhante ao observado na análise enzimática, em que as camadas superiores apresentam maior atividade, possivelmente devido à maior disponibilidade de substratos orgânicos nessa região.

Além disso, a configuração granulométrica do meio filtrante padrão utilizada na filtração lenta, caracterizada por um diâmetro efetivo pequeno e coeficiente de uniformidade menor que 3, promove uma distribuição de grãos que torna o meio mais denso com menores espaços entre os grãos. Esse arranjo dificulta o avanço dos sólidos em profundidade, favorecendo a formação e a manutenção do *schmutzdecke* nos primeiros centímetros do meio filtrante (Caputo, 1973; Pinto, 2011).

Ainda, apesar de não ter sido aplicado algum método estatístico no presente estudo, os resultados da análise enzimática e do teor de matéria orgânica, visualmente, tendem a se mover na mesma direção. Essa observação foi comprovada no estudo de Martins (2021), que apontou uma correlação positiva entre o teor de matéria orgânica e a fluoresceína.

5.3 ANÁLISE DA DIVERSIDADE MICROBIANA IDENTIFICADA NO *SCHMUTZDECKE*

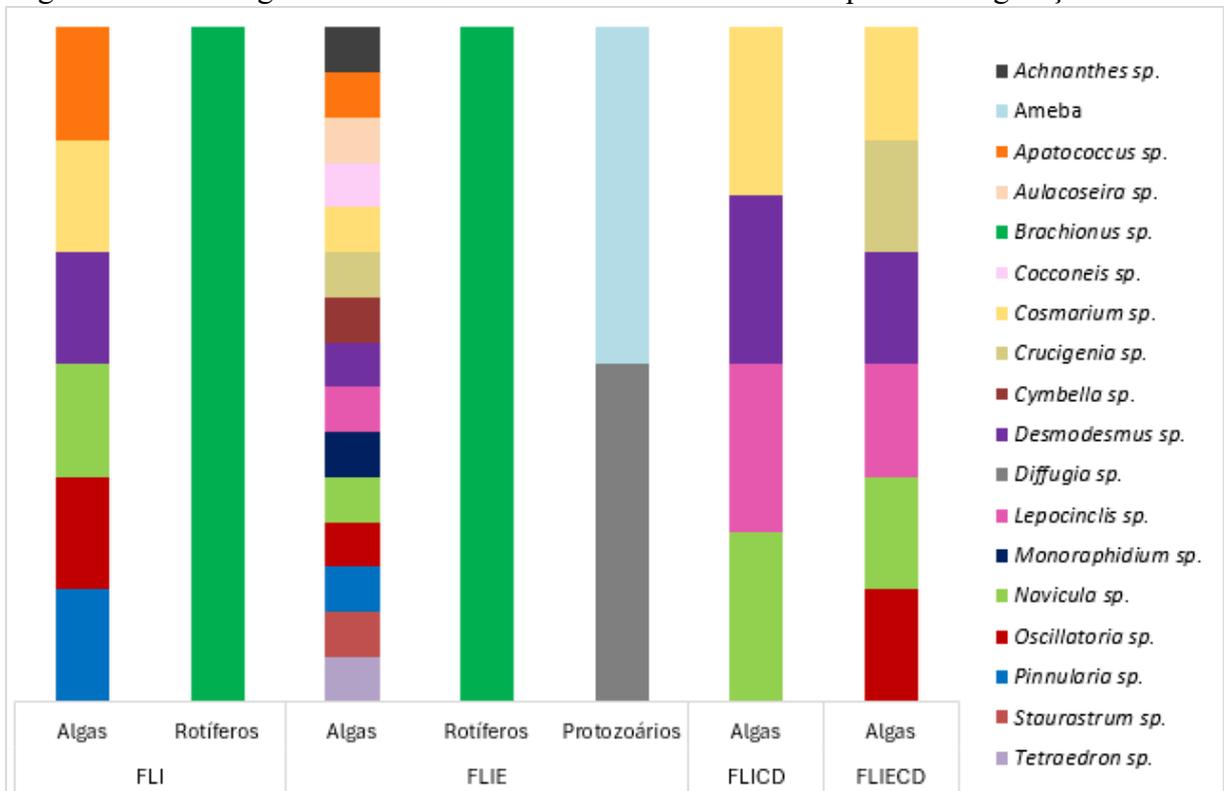
Os diferentes tipos de microrganismos presentes no *schmutzdecke* desempenham um papel importante na eliminação de partículas e patógenos, o que resulta em uma filtração mais eficiente. Essa estrutura complexa abriga uma comunidade microbiana diversa, que contribui

não apenas para a remoção de contaminantes, mas também para a resistência a colmatação biológica do filtro, prolongando sua vida útil e garantindo ciclos de operações mais longos (Ranjan e Prem, 2018; Bai et al., 2023).

Conforme já abordado neste trabalho, as quatro configurações de filtros lentos foram operadas por 345 dias consecutivos. Durante este período foram realizadas 3 análises microbiológicas para identificar a predominância dos microrganismos presentes no *schmutzdecke* dos filtros. As análises específicas foram realizadas nos dias 286º, 314º e 342º de operação, utilizando microscopia de campo claro para observar a distribuição e predominância de microrganismos na camada biológica.

Os microrganismos identificados em cada configuração de filtro lento podem ser observados na Figura 22.

Figura 22 – Microrganismos identificados no *schmutzdecke* das quatro configurações de FLI.



Fonte: A autora (2024).

A análise microbiológica no *schmutzdecke* revelou uma diversa variedade microbiana originária da água bruta, composta por grupos de algas, rotíferos e protozoários. Os microrganismos se adaptam às características da água bruta e ao ambiente da filtração (Lamon et al., 2021; Azêvedo et al., 2022).

Esses resultados estão diretamente relacionados às condições de água bruta utilizada

nesse estudo. Na pesquisa de Silveira (2024), a análise de clorofila-a no Lago da UFSC revelou concentrações altas que refletem o estado trófico avançado do ecossistema. De acordo com as medições realizadas no período de monitoramento, a clorofila-a teve um valor médio de 76,79 µg/L na água bruta. O valor médio de clorofila-a na água decantada foi calculado em 30,96 µg/L, enquanto as águas filtradas apresentaram valores médios de 16,11 µg/L, 10,94 µg/L, 7,78 µg/L e 5,49 µg/L para o FLI, FLIE, FLICD e FLIECD, respectivamente.

No trabalho de Cardoso (2018), foi constatado que o lago em questão, pelos cálculos de índices de estado trófico utilizados, se mantém em níveis extremos de eutrofização, classificado entre os estados de Supereutrófico e Hipereutrófico. Segundo a CONAMA 357/2005 a água bruta coletada não seria recomendada para uso direto ou indireto sem tratamento prévio, visto que foram encontrados valores acima de 30 µg/L para clorofila-a.

Os estudos citados destacam como a qualidade inicial da água bruta influencia diretamente a diversidade e a abundância de microrganismos presentes. A alta concentração de clorofila-a, característica de ambientes eutrofizados, favorece o crescimento de organismos autotróficos, como as microalgas, que, por sua vez, sustentam cadeias tróficas microbianas.

No presente estudo, os grupos e gêneros de microrganismos variaram conforme a configuração do filtro, sugerindo que as configurações distintas (utilização de esponja e/ou coagulante) afetaram a composição microbiológica. É importante salientar que a maior parte da atividade bacteriana na natureza não ocorre com células isoladas em crescimento planctônico (livres e em suspensão), mas sim com bactérias organizadas em comunidades de diferentes níveis de complexidade, associadas a diversas superfícies e, geralmente, formando um biofilme (Carmela et al., 2010; Azêvedo et al., 2022).

Nos filtros com esponja (FLIE e FLIECD) foram encontrados uma maior variedade de microrganismos em comparação aos filtros sem esponja. No FLIE foi observada a maior diversidade, sendo encontrados 18 microrganismos entre algas, rotíferos e protozoários, enquanto no FLIECD foram encontrados 6 microrganismos do grupo pertencente às algas. Possivelmente, essa condição ocorreu devido às características específicas que a esponja de poliuretano proporcionou, criando um ambiente estável para o desenvolvimento microbiano, nos quais os microrganismos podem se fixar e crescer entre os poros do material.

No FLIECD, a diversidade microbiológica tende a ser menor devido ao pré-tratamento aplicado com as sementes de *Moringa oleifera*. Com menos nutrientes disponíveis, apenas certos tipos de algas conseguem se estabelecer, resultando em uma comunidade menos diversificada em comparação ao FLIE, que utiliza apenas a esponja (Oliveira, 2017).

No sistema FLI foram observados 7 tipos de microrganismos, entre algas e rotíferos.

Neste filtro a ausência de esponja e de água decantada, permite um ambiente onde uma variedade de microrganismos pode competir e coexistir. Já no FLICD predominaram 4 grupos diferentes pertencentes às algas, a presença de água decantada nesse filtro cria um ambiente mais restrito, que diminui não apenas os nutrientes disponíveis, mas também restringe o espaço para o crescimento de microrganismos ao remover partículas suspensas. Isso favorece apenas grupos específicos melhor adaptados à essa condição ambiental como algumas espécies específicas de algas (Azevêdo, 2022).

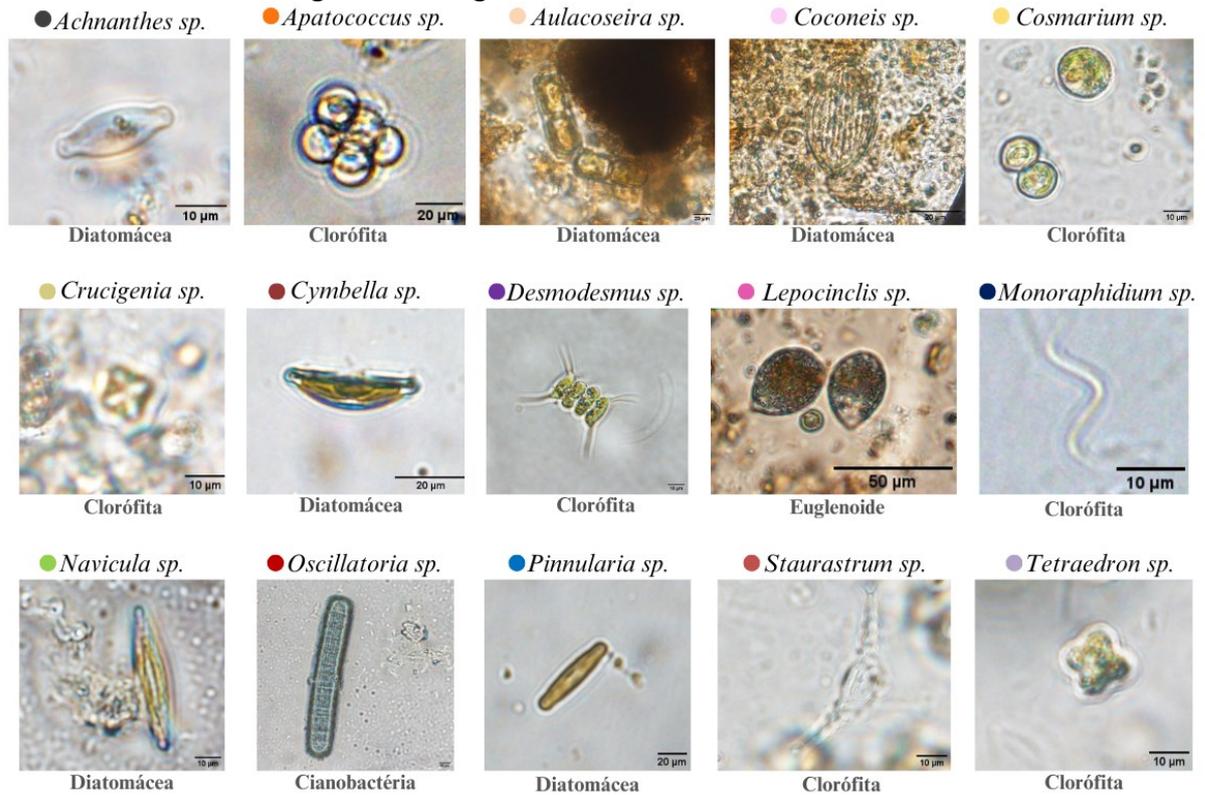
Na Figura 22 fica evidente que o grupo mais presente nas amostras das quatro configurações de filtros é a comunidade de algas, isso ocorre porque elas desempenham um papel crucial no funcionamento do *schmutzdecke*. As algas são organismos fotossintetizantes que utilizam a luz e os nutrientes presentes na água para se desenvolverem, o filtro lento de areia proporciona condições ideais para seu crescimento. Além disso, a atividade fotossintética das algas também auxilia na oxigenação da camada superficial do filtro, criando um ambiente propício para outros organismos, como bactérias e protozoários (Oliveira, 2017).

As algas têm papel importante na estruturação do *schmutzdecke*, devido à produção de carboidratos que conferem maior elasticidade ao biofilme (Underwood; Paterson, 2003). Além disso, podem sobreviver e excretar substâncias tóxicas, dificultando a produção de bactérias patogênicas (Huisman; Wood, 1974; Terin, 2021).

Dentre as algas identificadas, podem-se encontrar as diatomáceas, caracterizadas por possuírem carapaça de sílica que permanece intacta após a morte; as cianobactérias que podem ou não produzir cianotoxinas e serem fixadoras de nitrogênio atmosférico; as algas móveis que se movimentam por flagelos e tem capacidade de superarem a força hidrodinâmica; algas planctônicas e as unicelulares que geralmente se unem em grupos de variadas formas (Mello, 1998).

As algas identificadas consideradas mais persistentes no sistema de filtração deste estudo são: *Navícula sp.* (diatomácea), *Cosmarium sp.* e *Desmodesmus sp.* (algas verdes pertencentes ao grupo das algas unicelulares e planctônica), e *Oscillatoria sp.* (*Cyanobacteria*) (Mello, 1998). Na Figura 23, é possível visualizar todos os grupos de algas encontradas nas amostras realizadas para o presente estudo.

Figura 23 – Algas identificadas no *schmutzdecke*.



Fonte: A autora (2024).

Apesar das algas possuírem papéis importantes no contexto de purificação da água, a sua excessiva proliferação pode acarretar sérios problemas nos processos de tratamento. Algas de grande tamanho, como diatomáceas, podem causar entupimento rápido nas camadas superiores dos filtros, aumentando a necessidade de limpeza e reduzindo a produção de água tratada. Já algas menores (como *Navicula*, *Crucigenia* e *Monoraphidium*) podem atravessar os filtros devido ao seu tamanho, forma ou mobilidade, causando problemas nos estágios posteriores de tratamento e comprometendo a qualidade da água (Mello, 1998).

A presença do rotífero *Brachionus sp.* nas amostras dos filtros indicam um papel crucial na remoção de partículas e controle de populações microbianas visto que são responsáveis por predação de microrganismos menores, incluindo algas, bactérias e protozoários. Essa atividade contribui não apenas para a retenção de microrganismos no meio filtrante ou na esponja, mas também ajuda a reduzir a carga microbiana (Silveira, 2024; Wotton, 2002; Arndt, 1993). A Figura 24 apresenta um dos rotíferos encontrados nas amostras analisadas.

Figura 24 – Rotífero identificados no *schmutzdecke*.

● *Brachionus sp.*



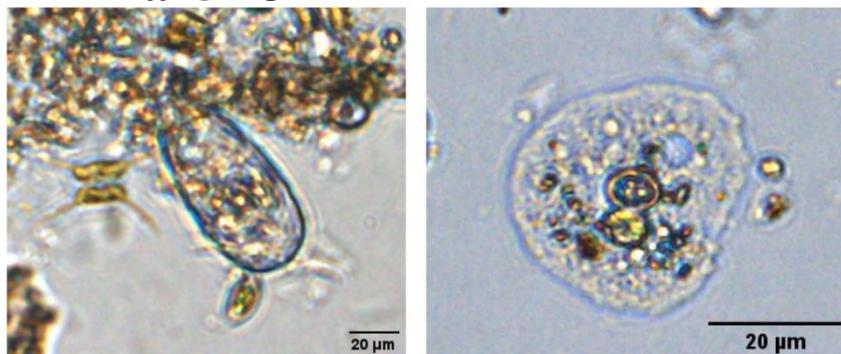
Fonte: A autora (2024).

Os protozoários presentes no *schmutzdecke*, assim como os rotíferos, também desempenham um papel de predação de microrganismos menores, como bactérias. No presente trabalho os protozoários encontrados foram os rizópodes (amebas e *Diffugia*), que por não apresentarem flagelos, alimentam-se por fagocitose. Sob certas condições ambientais, os protozoários formam cistos resistentes à dessecação, congelamento e altas temperaturas (Haarhoff e Cleasby, 1991). Na Figura 25 são apresentados os grupos de protozoários encontrados nas amostras de *schmutzdecke* do presente trabalho.

Figura 25 – Protozoários identificados no *schmutzdecke*.

● *Diffugia sp.*

● Ameba



Fonte: A autora (2024).

Quanto aos hábitos de alimentação desses organismos, observa-se que quando em equilíbrio, ocorre uma cadeia trófica de seres que habitam o interior do meio filtrante. Dentre as relações de trofia que podem ocorrer no interior do filtro, podem-se citar a das amebas e *Diffugia*, que se alimentam de algas unicelulares e pequenas partículas. Já os rotíferos, como o *Brachionus*, são conhecidos pela sua capacidade de predação de algas. Eles se alimentam de

algas maiores, controlando o crescimento delas no *schmutzdecke* (Terin, 2021).

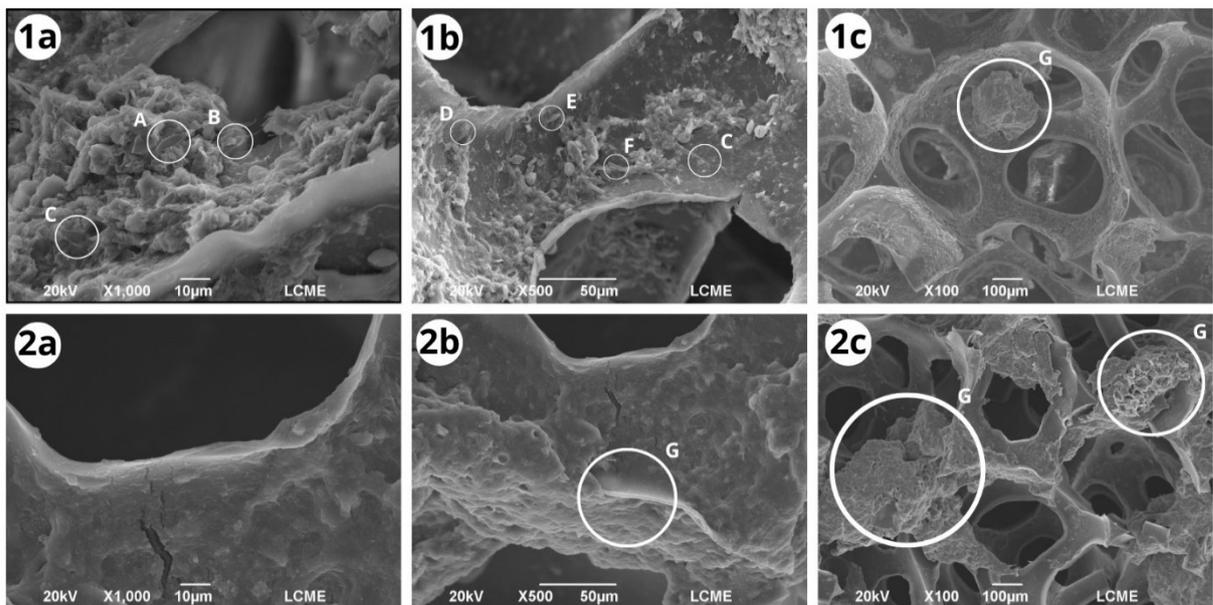
Brito et al. (2005) relatam que, na remoção de microrganismos pelo filtro, atuam não apenas o processo natural de peneiramento, mas uma combinação de fatores físicos, químicos e, principalmente, microbiológicos, como predação, competição, morte natural e necrofagia.

5.4 AVALIAÇÃO DA MICROESTRUTURA DA ESPONJA DE POLIURETANO

Após o fim de operação dos filtros, ao 345º dia, as esponjas de poliuretano contidas nos filtros FLIE e FLIECD foram analisadas utilizando-se a microscopia eletrônica de varredura (MEV). Para visualização das imagens foram utilizadas ampliações no microscópio de X100, X500 e X1000, conforme a Figura 26.

A visão ampliada do interior revela as relações tridimensionais das células transversais e das membranas celulares formadas pelo polímero. Além disso, é possível identificar nas imagens a presença de diversos microrganismos, como diatomáceas: (a) *Achnanthes sp.*, (b) *Gomphonema sp.*, (d) *Navicula sp.*, (e) *Pinnularia sp.* e (f) *Aulacoseira sp.* e cianobactérias filamentosas: (c) *Oscillatoria sp.* e (g) biomassa aderida aos poros.

Figura 26 – Microestrutura da esponja de poliuretano após utilização no FLIE e FLIECD.



Legenda: 1 – FLIE e 2 – FLIECD.

Fonte: A autora (2024).

Como resultado, a análise pós-utilização das esponjas de poliuretano demonstrou que a estrutura porosa é altamente eficiente na retenção de partículas suspensas na água, agindo como um pré-tratamento. Em comparação com a areia, a esponja tem uma estrutura mais aberta e

maleável, portanto, é possível capturar partículas maiores no início do processo de filtração.

Conforme a esponja é utilizada, inicia-se a acumulação de matéria orgânica e partículas, assim como o acúmulo de microrganismos, que ocorre até que alguns dos poros fiquem obstruídos. No entanto, essa colmatação ocorre de maneira controlada, facilitando a remoção e limpeza quando necessário. Assim, os filtros contendo a esponja tem uma vantagem sobre a areia.

Na esponja do FLIE os poros exibem uma maior quantidade de biomassa aderida, o material exibe um grande número de microrganismos, incluindo algas diatomáceas, como *Navicula sp.*, *Pinnularia sp.*, e *Aulacoseira sp.*, além de cianobactérias filamentosas, entre elas *Oscillatoria sp.*, cujo crescimento geralmente ocorre em resposta à disponibilidade de nutrientes. Esse acúmulo pode indicar que a esponja FLIE, sem o uso de coagulante, oferece um ambiente mais adequado para o crescimento de biofilmes e multiplicação de diferentes microrganismos.

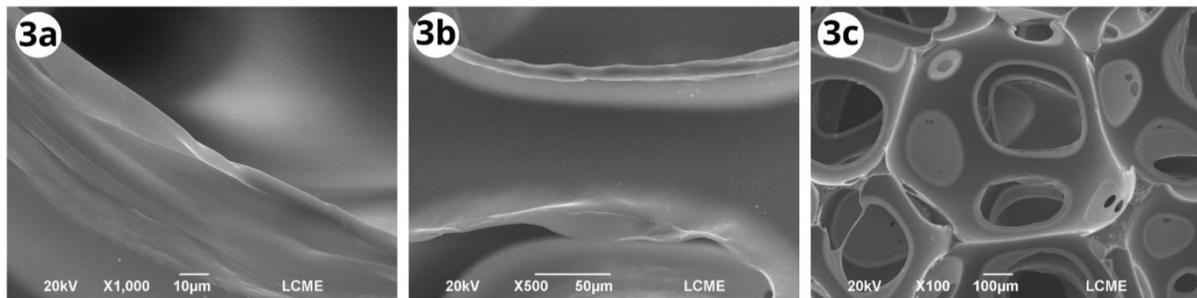
No estudo de Souza (2020), também pelo MEV, foi possível observar a presença de diatomáceas no meio filtrante composto por areia, principalmente na superfície. Diatomáceas são apontadas como contribuintes para a colmatação de filtros devido ao seu formato e à composição de sua parede celular, que contém sílica e não se degrada no filtro (Aguila; Di Bernardo, 2003; Taira, 2008; Nakamoto, 2011).

O FLIECD também apresentou biomassa, no entanto, como se pode observar, as densidades são menores do que as vistas no FLIE. O uso de água decantada no FLIECD aparenta ter reduzido a quantidade de matéria orgânica disponível, o que limita o crescimento de alguns microrganismos antes de chegarem à esponja e resulta em uma colmatação menos acentuada nos poros.

5.4.1 Comparação da microestrutura em esponjas de poliuretano utilizadas e sem utilização

Para comparar as microestruturas de uma esponja utilizada após a operação dos filtros lentos, com as de uma esponja sem uso, foi analisada a microestrutura de uma esponja controle, nova e ainda não utilizada. A Figura 27 apresenta a análise da microestrutura da esponja controle.

Figura 27 – Microestrutura da esponja controle (antes da utilização).



Fonte: A autora (2024).

A esponja controle de poliuretano possui uma estrutura porosa limpa e bem definida, com poros amplos e uma estrutura tridimensional aberta, que facilita o fluxo de água e a retenção inicial de partículas. No entanto, após a utilização, é possível observar uma alteração significativa na microestrutura dos poros devido ao acúmulo de biomassa e à colonização por diferentes tipos de microrganismos, como algas e cianobactérias, conforme Figura 25.

Embora a biomassa acumulada nos poros da esponja seja necessária para a retenção de contaminantes e o desenvolvimento do *schmutzdecke*, o excesso de biomassa pode causar colmatação dos filtros e a necessidade de limpeza (Mello, 2018).

No FLIE, o acúmulo de microrganismos e biomassa nos poros, quando em excesso, pode levar a uma intervenção parcial, o que reduz a eficiência de fluxo e pode exigir uma limpeza mais frequente para manter a funcionalidade da esponja. Por outro lado, a presença do coagulante no FLIECD pode ter ajudado a reduzir o entupimento de poro, permitindo que a esponja mantivesse sua estrutura relativamente mais aberta por um período mais longo. Isso pode contribuir para uma maior durabilidade do sistema e uma menor necessidade de manutenção.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

Este estudo teve como objetivo avaliar e comparar a atividade microbiológica ao longo da profundidade do meio filtrante, utilizando o método de ensaio enzimático com diacetato de fluoresceína (FDA), e identificar os microrganismos presentes no *schmutzdecke* das quatro configurações de filtros lentos (FLI, FLIE, FLICD e FLIECD).

Além disso, a presente pesquisa destacou a relevância dos pré-tratamentos, como o uso da *Moringa oleifera* e a esponja de poliuretano, para potencializar o desempenho dos sistemas de filtração lenta em escala domiciliar. A partir dos resultados obtidos pode-se chegar as seguintes conclusões:

Referente ao objetivo 1: Avaliar a atividade microbiológica ao longo da profundidade do meio filtrante de quatro diferentes configurações de filtro lento intermitente, pode concluir-se que:

- A análise enzimática indicou que a atividade microbiológica é mais intensa nas camadas superiores, evidenciando a relevância da biocamada formada (*schmutzdecke*). Esse comportamento reflete a maior disponibilidade de matéria orgânica e oxigênio nessa região, que favorece o crescimento e a atividade microbiana.
- Nos filtros que utilizam esponjas de poliuretano, é observada uma redução no teor de matéria orgânica dissolvida, atribuída à capacidade da esponja de reter partículas maiores, especialmente ao comparar filtros alimentados pela mesma água. Por outro lado, os filtros que utilizaram o coagulante *Moringa oleifera* apresentaram um aumento no teor de matéria orgânica, possivelmente relacionado ao próprio coagulante ou ao modo de preparo utilizado.
- Com o aumento da profundidade, a atividade microbiológica analisada pelo método FDA demonstrou um declínio consistente em todas as configurações. Esse comportamento reflete a eficiência do sistema em reter e degradar matéria orgânica nas camadas superiores, resultado diretamente associado às condições de granulometria utilizadas, que promovem um meio filtrante mais denso e eficiente na retenção de sólidos, independentemente do tipo de pré-tratamento aplicado.

Referente ao objetivo 2: Identificar os microrganismos presentes no *schmutzdecke* do meio filtrante e esponja de poliuretano de cada filtro lento intermitente, conclui-se que:

- A identificação microbiológica revelou uma ampla variedade de microrganismos presentes no *shmutzdecke*. Foram identificadas diatomáceas, como *Achnanthes sp.*, *Navicula sp.*, *Pinnularia sp.*, e cianobactérias, como *Oscillatoria sp.*, organismos fundamentais para a manipulação de matéria orgânica e equilíbrio do ecossistema microbiano. É importante destacar que o uso da esponja nos filtros contribuiu significativamente para uma maior variabilidade de microrganismos, ampliando a diversidade observada e fortalecendo o papel funcional do sistema.
- Foram observados protozoários, como Ameba e *Diffugia sp.*, conhecidos por atuarem na predação de bactérias, contribuindo para o controle da biomassa microbiana. Foram encontradas também algas verdes, como *Cosmarium sp.* e *Cymbella sp.*,

microrganismos que contribuem para o fornecimento de oxigênio através da fotossíntese e promovem o crescimento de microrganismos aeróbicos.

- Nos filtros que utilizam esponjas de poliuretano, foi observada a adesão de biomassa nos poros da esponja, indicando que o material se apresentou como um ambiente propício para o desenvolvimento do *schmutzdecke*. A presença de biofilmes microbianos nas esponjas demonstra sua eficácia como suporte físico para a colonização microbiológica, permitindo a retenção e manipulação de compostos orgânicos de maneira mais eficiente.

Referente ao objetivo 3: Comparar a microestrutura da esponja de poliuretano de distintas configurações (sem e com pré-tratamento com *Moringa oleifera*) com uma esponja modelo sem utilização, concluiu-se que:

- O coagulante natural influenciou de maneira relevante no aumento do teor de matéria orgânica, já o uso da esponja auxiliou na retenção de partículas. Os filtros com esponja, em especial o FLIE, demonstraram uma capacidade maior de retenção de partículas e microrganismos, conforme evidenciado pela comunidade microbiana observada nas fotomicrográficas, especialmente ao comparar a esponja controle, com a esponja após o longo período de utilização.
- O uso de filtros lentos intermitentes, especialmente com esponja, mostrou-se uma alternativa eficiente e viável para o tratamento de água em áreas de difícil acesso e com infraestrutura limitada, oferecendo uma solução sustentável e de baixo custo.

7 RECOMENDAÇÕES

Tendo em vista as constatações obtidas neste trabalho, sugere-se para futuras pesquisas:

- Avaliar como diferentes características da água bruta interferem na composição microbiana no *schmutzdecke* e na eficiência dos filtros de regime intermitente;
- Comparar o desempenho dos filtros lentos intermitentes utilizando no pré-tratamento outros coagulantes naturais e diferentes materiais sintéticos no topo do meio filtrante;
- Explorar esponjas de diferentes características como alternativa de pré-tratamento em diferentes configurações de filtro lento intermitente;

- Realizar estudos sazonais para compreender se as variações climáticas (temperatura, intervalos e períodos de seca) influenciam a diversidade microbiana e a atividade microbiológica no sistema de filtração.

REFERÊNCIAS

ADAM, G.; DUNCAN, H. Development of a sensitive and rapid method for the measurement of total microbial activity using fluorescein diacetate (FDA) in a range of soils. **Soil Biology And Biochemistry**, v. 33, n. 7-8, p. 943-951, jun. 2001. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/s0038-0717\(00\)00244-3](http://dx.doi.org/10.1016/s0038-0717(00)00244-3).

ALMEIDA, R. M.; Vendramini, D. Abastecimento de água em comunidade ribeirinha do submédio São Francisco: o Caso da Ilha do Rodeadouro (BA). **RDE - Revista de Desenvolvimento Econômico**, v. 1, n. 39, p. 492, abr. 2015. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.21452/rde.v17nesp.4018>.

AMAGLOH, FK; BENANG, A. Eficácia da semente de *Moringa Oleifera* como coagulante para purificação de água. **African Journal of Agricultural Research**, v. 4, n. 2, p. 119-123, 2009.

AMIRTHARAJAH, A. Some theoretical and conceptual views of filtration. **Journal (American Water Works Association)**, v. 80, n. 12, p. 36-46, 1988.

ANDERSEN, R. A. Diversity of eukaryotic algae. **Biodiversity & Conservation**, v. 1, n. 4, p. 267-292, 1992.

ANDREOLI, F. C. **Filtros lentos de areia em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas subterrâneas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. Tese (Doutorado) - Universidade de São Paulo (EESC/USP), 2020.

ANUNCIACÃO, K. de F. et al. Avaliação da atividade antioxidante e fenóis totais dos óleos extraídos das sementes de *Moringa oleifera* lam. **Revista Virtual de Química**, v. 12, n. 1, p. 148-154, 2020. Disponível em: http://rvq.s bq.org.br/detalhe_artigo.asp?id=1156. Acesso em: 10 ago. 2024.

ARANTES, C. C. et al. Diferentes formas de aplicação da semente de *Moringa oleifera* no tratamento de água. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 19, p. 266-272, mar. 2015.

ARANTES, C. C. et al. Uso de coagulantes naturais à base de *Moringa oleifera* e tanino como auxiliares da filtração em geotêxtil sintético não tecido. **Eng. Agríc.**, Jaboticaba, v. 34, n. 4, p. 780-788, ago. 2014.

BALDEZ, S. D. **Estudo de dimensionamento de filtro lento retrolavável de camada simples (areia) e dupla camada filtrante (areia e antracito)**. 2023. 68 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/29750>. Acesso em: 10 out. 2023.

BAPTISTA, M. G.; NIXDORF, B. Low Disturbances Favor Steady State: Case of Cyanobacterial Monodominance in a Brazilian Coastal Lagoon. **Inland Waters**, v. 4, n. 2, p. 243-254, 2014.

BESSA, Isabela Moreira. **Filtração lenta domiciliar como proposta para o tratamento de água em uma comunidade rural: estudo de caso no acampamento do Mst Edson Nogueira em Macaé/RJ**. 2020. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Civil, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Macaé, 2020.

BOTARI, A. **Modelação matemática da perda de carga e da remoção de turbidez e de partículas na filtração direta ascendente**. Doutorado em Hidráulica e Saneamento—São Carlos: Universidade de São Paulo, 12 fev. 2007.

BRASIL, CONAMA. Resolução. 357, de 17 de março de 2005. **Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA**, v. 357, 2005

BRITO, L. L. A. D. et al. Amadurecimento de filtros lentos de areia e remoção de microrganismos indicadores de qualidade da água ao longo da profundidade do leito: uma avaliação em instalação piloto. **Engenharia Sanitaria e Ambiental**, v. 10, n. 4, p. 307–317, dez. 2005.

CARDOSO, Carlos Eduardo. **Caracterização limnológica do Lago da Universidade Federal de Santa Catarina, no campus Florianópolis, Brasil**. 2018. 70 f. TCC (Graduação) - Curso de Ciências Biológicas, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2018.

CARVAJAL, R. A. R. **Desinfecção solar da água: avaliação da técnica “sodis” aplicada a águas de chuva, poço e manancial superficial, nas condições climáticas de verão na região de Porto Alegre, RS**. 2015. 100 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015. Disponível em: <https://lume.ufrgs.br/bitstream/handle/10183/147070/000998863.pdf?sequence=1&isAllowed=y>. Acesso em: 02 ago. 2024.

CARVALHO, T. K.; SABOGAL PAZ, L. P. **Filtração lenta em areia como alternativa doméstica de tratamento de água – eficiência do método de operação por batelada**. Relatório Final. Pesquisa de Iniciação Científica. PIBIC. EESC/USP. São Carlos, 2013.

CAWST – **Centre of Affordable Water and Sanitation Technology**. Biosand Filter Manual - design, construction, installation and maintenance. Calgary, Canada, 2009.

CAWST – **Centre of Affordable Water and Sanitation Technology**. Biosand Filter Construction Manual. Calgary, Canada, 2012.

CENTRE FOR AFFORDABLE WATER AND SANITATION TECHNOLOGY CAWST. **Biosand Filter Construction Manual**. Agosto, 2012.

CHUNG A.K.C et al. Nitrogen and phosphate mass balance in a sub-surface flow constructed wetland for treating municipal wastewater. **Ecological Engineering** 32, 81–89, 2008.

COLLINS, M. R.; EIGHMY, T. T.; FENSTERMACHER JR, J. M.; SPANOS, S. K. Removing natural organic matter by conventional slow sand filtration. **Journal-American Water Works Association**, v. 84, n. 5, p. 80–90, 1992.

DALSASSO, R. L.; SENS, M. L. Filtração direta com pré-floculação e coagulação com sulfato de alumínio e hidroxicloreto de alumínio: estudo com água de manancial eutrofizado. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 11, n. 3, p. 241-249, set. 2006.

DE JESUS LIMA, A.; CONCEIÇÃO DE GOIS SANTOS MICHELAN, D.; FERRAZ SILVA, C. Desempenho e recuperação de filtros lentos com meios filtrantes alternativos quando submetidos a carga de patógenos. **Revista DAE**, v. 70, n. 238, p. 163–176, 4 out. 2022.

DI BERNARDO, L; DANTAS, A. D. B; VOLTAN, P. E. N. **Tratabilidade de Água e dos Resíduos Gerados em Estações de Tratamento de Água**. Editora LDiBe. 2011.

ELLIOT M. et al. Investigation of E. coli and Virus Reductions Using Replicate, Bench-Scale Biosand Filter Columns and Two Filter Media”. **International Journal of Environmental Research and Public Health**, v. 12, n. 9, p. 10276–10299. 2015. Disponível em: <https://doi.org/10.3390/ijerph120910276>.

FAZOLO, T. **Influência de uma esponja de poliuretano instalada no meio filtrante de um filtro lento intermitente, com destaque para aclimação do sistema**. 2023. 59 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2023. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/249298>. Acesso em: 22 out. 2024.

FRANCO, C. S. et al. Coagulação com semente de moringa oleifera preparada por diferentes métodos em águas com turbidez de 20 a 100 UNT. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 22, n. 4, p. 781-788, ago. 2017. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/s1413-41522017145729>.

FREITAS, B. L. S. **Filtros lentos em escala domiciliar como alternativa de tratamento de águas com risco microbiológico em comunidades isoladas**. 2017. 206 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Departamento de Engenharia Hidráulica e Saneamento, Universidade de São Paulo, São Carlos, 2023. Disponível em: <https://www.teses.usp.br/teses/disponiveis/18/18138/tde-18102017-165857/pt-br.php>. Acesso em: 01 ago. 2024.

FULAZZAKY, M. A. et al. Empirical models of bio-sand filter to calculate the design parameters. **Water Supply**, v. 9, n. 6, p. 723–734, 1 dez. 2009.

GRAHAM, N. J. D.; COLLINS, M. R. Slow sand filtration: recent research and application perspectives. In: NAKAMOTO, N. et al. (Ed.). **Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes: Further Developments and Applications**. 1st. ed. London: IWA Publishing, 2014. p. 3–16.

HAARHOFF, J.; CLEASBY, J. Biological and Physical Mechanisms in Slow Sand Filtration. In: LOGSDON, G. (Ed.). **Slow Sand Filtration**. Oregon, USA: American Society of Civil Engineers, 1991. p. 19–68.

HELLER, L. et al. Desempenho Da Filtração Lenta Em Areia Submetida a Cargas de Pico de Oocistos de *Cryptosporidium Sp*, Bactérias e Sólidos: Uma Avaliação Em Instalação Piloto; **Eng. sanit. ambient**, 2006.

INSTITUTO TRATA BRASIL. **Ranking do Saneamento 2021**. 2021. Disponível em: <https://tratabrasil.org.br/ranking-do-saneamento-2021/>. Acesso em: 03 set. 2024.

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.

JUNIOR, O. M. C. et al. Caracterização e Otimização do Tratamento de Efluente Têxtil por Coagulação-Floculação Utilizando Coagulante Natural Tanino. **Revista Ciências Exatas e Naturais**, [S.L.], v. 14, n. 1, p. 79-90, jun. 2012. Editora Unicentro. <http://dx.doi.org/10.5777/recen.2012.01.05>.

KATAYON, S.; NOOR, M. J.; ASMA, M. et al. Effects of storage conditions of Moringa oleifera seeds on its performance in coagulation. **Bioresource Technology**, v. 97, n. 13, p. 1455-1460, 2006.

KOUL, B. et al. Application of Natural Coagulants in Water Treatment: a sustainable alternative to chemicals. **Water**, v. 14, n. 22, p. 1-27, 18 nov. 2022. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/w14223751>.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3º ed. Campinas: Editora Átomo, 2010.

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

LIBRALATO, G.; GHIRARDINI, A.; AVEZZÙ, F. To centralise or to decentralise: An overview of the most recent trends in wastewater treatment management. **Journal of Environmental Management**. v. 94, n. 1, p. 61-68, 2012.

LIMA, Anderson de Jesus *et al.* Desempenho e recuperação de filtros lentos com meios filtrantes alternativos quando submetidos a carga de patógenos. **Revista Dae**, São Paulo, v. 70, n. 238, p. 163-176, dez. 2022. Disponível em: https://revistadae.com.br/artigos/artigo_edicao_238_n_2087.pdf. Acesso em: 03 out. 2024.

LLOYD, B. J. **The significance of protozoal predation and adsorption for the removal of bacteria by slow sand filtration**. In: GRAHAM, N.; COLLINS, R. (eds.). *Advance in Slow Sand and Alternative Biological Filtration*. John Wiley & Sons Ltd., 1996, London, UK.

LOGSDON, G. S.; KOHNE, R.; ABEL, S. et al. Slow sand filtration for small water systems. **Journal of Environmental Engineering and Science**, v. 1, n. 5, p. 339-348, 2002.

MARTINS, M. **Estudo da colmatação biológica através da atividade enzimática em colunas de simulação de sistemas de filtração em margem**. 2021. 106 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/21324>. Acesso em: 27 jul. 2024.

MARTINS, M. et al. Enzymatic analysis in bank filtration sites as a tool for assessing biological clogging — A column study. **Journal of Water Process Engineering**, v. 44, p. 102375, dez. 2021.

MEDEIROS, R. C.; FAVA, N. M. N; FREITAS, B. L. S. et al. Drinking water treatment by multistage filtration on a household scale: Efficiency and challenges. **Water Research**, v. 178, jul. 2020. Disponível: <http://dx.doi.org/10.1016/j.watres.2020.115816>.

MELLO, O. M. T. **Avaliação do desempenho da filtração em múltiplas etapas no tratamento de águas com elevadas concentrações de algas**. 1998. 156 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos, Universidade de Brasília, Brasília, 1998. Disponível em: <http://ptarh.unb.br/dissertacoes/avaliacao-do-desempenho-da-filtracao-em-multiplas-etapas-no-tratamento-de-aguas-com-elevadas-concentracoes-de-algas/>. Acesso em: 01 nov. 2024.

MELO JÚNIOR, A. S. et al. **Desempenho da filtração lenta empregada no tratamento da carga de DBO oriunda de esgoto doméstico**. XII Seminario Internacional de Investigación en Urbanismo, São Paulo-Lisboa, 2020. **Anais...** Em: SEMINARIO INTERNACIONAL DE INVESTIGACIÓN EN URBANISMO. Academia de Escolas de Arquitectura e Urbanismo de Língua Portuguesa, jun. 2020. Disponível em: <<http://hdl.handle.net/2117/336506>>. Acesso em: 17 set. 2024

MULLER, T.; GRANADA, C. E.; SPEROTTO, R. A.. Qualidade da água de três locais com potenciais fontes de contaminação no Rio Taquari, RS. **Revista Ambiente & Água**. 2016, v. 11, n. 1, pp. 75-84, 2016.

MURTHA, M.; HELLER, L.; LIBÂNIO, M. "Filtração lenta de areia: funcionamento e eficácia." **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, vol. 2, pp. 45-55, 1997.

NAÇÕES UNIDAS. **Assembleia Geral**. Resolução A/RES/64/292 adotada pela Assembleia Geral em 28 de Julho de 2010a. Disponível em: https://www.un.org/ga/search/view_doc.asp?symbol=A/RES/64/292. Acesso em: 13 de jun. 2024.

NAKAMOTO, N.; GIMBEL, R.; NIGEL, G. **Progress in Slow Sand and Alternative Biofiltration Processes**. Londres: IWA Publishing, 2014.

NASCIMENTO, Ana Paula do; PELEGRINI, Ronaldo Teixeira; BRITO, Núbia Natália de. FILTRAÇÃO LENTA PARA O TRATAMENTO DE ÁGUAS PARA PEQUENAS COMUNIDADES RURAIS. **Reec - Revista Eletrônica de Engenharia Civil**, v. 2, n. 4, p. 54-58, 31 dez. 2008.

NEY MURTHA; HELLER, L.; LIBÂNIO, M. **Filtração lenta em areia como alternativa tecnológica para o tratamento de águas de abastecimento no Brasil**. Unpublished, 2016. Disponível em: <http://rgdoi.net/10.13140/RG.2.1.1275.0480>. Acesso em: 21 out. 2024.

NOOR, Mohamed Hizam Mohamed *et al.* Moringa oleifera extract as green coagulant for POME Treatment: preliminary studies and sludge evaluation. **Materials Today: Proceedings**, [S.L.], v. 46, n. 5, p. 1940-1947, fev. 2021. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.matpr.2021.02.241>.

OLIVEIRA, Fernando Freitas de. **Tratamento de água do mar por filtros de areia biológicos: Estratégia para o controle de biofilmes**. 2017. 118 f. Tese (Doutorado) - Curso de Biotecnologia, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2017.

ONU, O. D. N. U. **Resolução nº 64/292**. O direito humano à água e ao saneamento. 2010.

PAINEL SANEAMENTO BRASIL. **Parcela da população sem acesso à água (% da população)**. 2022. Disponível em: <https://www.painelsaneamento.org.br/explore/ano?SE%5Ba%5D=2022&SE%5Bo%5D=a>. Acesso em: 13 ago. 2024.

PIZZOLATTI, B. S. **Estudos de limpeza de filtro lento por raspagem e retrolavagem**. 2010. 119 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2013. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/103288>. Acesso em: 11 set. 2024.

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)**. 2014. 201 p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2014.

PUHL, V. de A. **Avaliação da colmatção biológica através da atividade enzimática em filtros lentos intermitentes para uso unifamiliar**. 2021. 112 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2021. Disponível em: <https://repositorio.ufsm.br/handle/1/23611>. Acesso em: 01 ago. 2024.

PUHL, V. A. et al. Enzymatic analysis in household intermittent slow sand filters as a tool for assessing biological clogging. **Journal of Water Process Engineering**, v. 55, p. 104177, out. 2023. Disponível em: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S2214714423006979?via%3Dihub>. Acesso em: 17 set. 2024.

RANJAN, P.; PREM, M. Schmutzdecke- A Filtration Layer of Slow Sand Filter. **International Journal Of Current Microbiology And Applied Sciences**, v. 7, n. 07, p. 637-645, 10 jul. 2018. Excellent Publishers. Disponível em: <http://dx.doi.org/10.20546/ijcmas.2018.707.077>.

REDDY, D. Harikishore Kumar *et al.* Biosorption of Ni(II) from aqueous phase by Moringa oleifera bark, a low cost biosorbent. **Desalination**, [S.L.], v. 268, n. 1-3, p. 150-157, mar. 2011. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.desal.2010.10.011>.

RODRIGUES, N. M. M. **Tratamento de água com filtração lenta domiciliar intermitente**. 2022. 78 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade Federal da Fronteira Sul, Cerro Largo, 2022. Disponível em: <https://rd.uffs.edu.br/bitstream/prefix/5704/1/RODRIGUES.pdf>. Acesso em: 03 out. 2024.

SALEEM, M.; BACHMANN, R. T. A contemporary review on plant-based coagulants for applications in water treatment. **Journal of industrial and Engineering Chemistry**. v. 72, n. 25, 281-297, 2019.

SANTOS, L. L. et al. Aplicação da tecnologia de filtração em margens para redução ou eliminação de contaminantes físico-químicos na região semi-árida de Pernambuco. In: XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos, 2011, Maceió, AL. **Anais do XIX Simpósio Brasileiro de Recursos Hídricos**, 2011. p. 19.

SILVA, D. E. D. et al. Análise da eficiência da filtração lenta para o tratamento de água de uma nascente situada na zona rural de Passabém – MG. **Research, Society and Development**, v. 7, n. 6, p. e676184, 30 jan. 2018.

SILVA, A. C. "Potencial da Moringa Oleifera como Coagulante Natural no Tratamento de Água." **Revista Brasileira de Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 10, n. 3, p. 211-222, 2005.

SILVEIRA, M. K. **Estudo comparativo entre o uso do coagulante extraído das sementes de moringa oleifera e os coagulantes químicos no tratamento de água**. 2021. 75 f. TCC (Graduação) - Curso de Engenharia Ambiental e Sanitária, Universidade do Sul de Santa Catarina, Palhoça, 2021. Disponível em: <https://repositorio.animaeducacao.com.br/items/726b6b2f-ef38-441c-9f4b-2fdece1e26b8>. Acesso em: 03 set. 2024.

SILVEIRA, M. K. **Influência do uso de esponjas de poliuretano e sementes de Moringa oleifera na filtração lenta de regime intermitente**. 2024. 166 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/257602>. Acesso em: 01 set.2024.

SOBSEY, MD et al. Um ponto de uso para filtragem de água potável doméstica: Uma solução prática e eficaz para fornecer acesso sustentado à água potável segura no mundo em desenvolvimento. **Environ. Sci. Technol.**, v. 42, n. 12, p. 4261–4267, 2008.

SOUZA, F. H. **Estudo da biomassa e comunidade bacteriana em filtros lentos retrolaváveis**. 2020. 324 f. Tese (Doutorado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2020. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/216503>. Acesso em: 05 set. 2024.

SPINELLI, V. A. **Quitosana, polieletrólito natural para o tratamento de água potável**. 2001. 146 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Sanitária e Ambiental, Centro Tecnológico, Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2001. Cap. 88037440. Disponível em: <https://repositorio.ufsc.br/handle/123456789/82191>. Acesso em: 10 out. 2024.

TERIN, U. C. **Sistema de múltiplas etapas com filtração lenta no tratamento domiciliar de águas superficiais com risco microbiológico**. Doutorado em Hidráulica e Saneamento— São Carlos: Universidade de São Paulo, 19 ago. 2021a.

VERAS, L. R. V.; BERNARDO, L. TRATAMENTO DE ÁGUA DE ABASTECIMENTO POR MEIO DA TECNOLOGIA DE FILTRAÇÃO EM MÚLTIPLAS ETAPAS - FIME. **Eng. Sanit. Ambient.**, São Carlos, v. 13, p. 109-116, 07 mar. 2008.

VERBEL, R. E. O. et al. Utilización de Tuna (opuntia ficus-indica) como coagulante natural en la clarificación de aguas crudas. **Avances Investigación en Ingeniería**, v.11, n.1, 1794-4953, 2014.

WHO. **Guidelines for drinking-water quality: fourth edition incorporating the first addendum**. 4th. ed. Geneva: World Health Organization, 2017.

WHO (WORLD HEALTH ORGANIZATION); UNICEF (UNITED NATIONS INTERNATIONAL CHILDREN'S EMERGENCY FUND). **Progress on household drinking water, sanitation and hygiene 2000-2017. Special focus on inequalities**. 2019b.