

RESSALVA

Atendendo a solicitação do(a) autor(a), Leticia da Silva Cabral, o texto completo deste documento será disponibilizado somente a partir de 05/08/2028.

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA - UNESP
Faculdade de Engenharia de Bauru - Bauru

LETICIA DA SILVA CABRAL

**FILTRAÇÃO EM LINHA PARA REMOÇÃO DO MICROPLÁSTICO POLICLORETO
DE VINILA EM ÁGUAS DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Bauru
2026

LETICIA DA SILVA CABRAL

**FILTRAÇÃO EM LINHA PARA REMOÇÃO DO MICROPLÁSTICO POLICLORETO
DE VINILA EM ÁGUAS DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Orientador: Prof. Dr Adriano Gonçalves dos Reis

Bauru

2026

Cabral, Leticia da Silva.
Filtração em linha para remoção do microplástico
policloreto de vinila em águas do rio Paraíba do Sul /
Leticia da Silva Cabral. - Bauru, 2026
69 f. : il.

Dissertação (Mestrado)-Universidade Estadual
Paulista (Unesp), Faculdade de Engenharia, Bauru
Orientador: Adriano Gonçalves dos Reis

1. Coagulação. 2. Filtração granular rápida. 3.
Índice de filtrabilidade de Ives. 4. Potencial zeta. I.
Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia. II.
Título.

ATA DA DEFESA PÚBLICA DA DISSERTAÇÃO DE MESTRADO DE LETICIA DA SILVA CABRAL, DISCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA CIVIL E AMBIENTAL, DA FACULDADE DE ENGENHARIA - CÂMPUS DE BAURU.

Aos 04 de agosto de 2026, às 9h, por meio de Videoconferência, realizou-se a defesa de DISSERTAÇÃO DE MESTRADO de LETICIA DA SILVA CABRAL, intitulada "FILTRAÇÃO EM LINHA PARA REMOÇÃO DO MICROPLÁSTICO POLICLORETO DE VINILA EM ÁGUAS DOS RIO PARAÍBA DO SUL". A Comissão Examinadora foi constituída pelos seguintes membros: Prof. Dr. ADRIANO GONÇALVES DOS REIS (Orientador(a) - Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de São José dos Campos - ICT, Prof. Dr. LUIS FERNANDO FIGUEIREDO FARIA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Química e de Produção / Escola de Engenharia de Lorena / Universidade de São Paulo, Profª. Drª. LIANE YURI KONDO NAKADA (Participação Virtual) do(a) Departamento de Engenharia Ambiental / UNESP / Câmpus de São José dos Campos - ICT, Após a exposição pela mestrandia e arguição pelos membros da Comissão Examinadora que participaram do ato, de forma presencial e/ou virtual, a discente recebeu o conceito final: Aprovada _ _ _ _ _ . Nada mais havendo, foi lavrada a presente ata, que após lida e aprovada, foi assinada pelo(a) Presidente(a) da Comissão Examinadora.

IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA

A pesquisa pode contribuir para o avanço científico e técnico no tratamento de água de abastecimento ao demonstrar a viabilidade da remoção de microplásticos por filtração em linha com coagulantes químicos e naturais. No âmbito social e ambiental, oferece uma alternativa sustentável para proteger mananciais e melhorar a qualidade da água de abastecimento, com potencial aplicação local, regional e nacional. Também fortalece a internacionalização do conhecimento ao dialogar com uma temática de interesse global. Além disso, pode gerar impactos educacionais, inovadores e econômicos, ao estimular soluções de menor impacto e apoiar práticas mais eficientes no saneamento básico.

POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH

The study may contribute to scientific and technical advances in drinking water treatment by demonstrating the feasibility of removing microplastics through inline filtration using chemical and natural coagulants. From a social and environmental perspective, it offers a sustainable alternative to protect water sources and improve drinking water quality, with potential application at local, regional, and national levels. It also strengthens the internationalization of knowledge by addressing a topic of global interest. In addition, it may generate educational, innovative, and economic impacts by encouraging lower-impact solutions and supporting more efficient sanitation practices.

LETICIA DA SILVA CABRAL

**FILTRAÇÃO EM LINHA PARA REMOÇÃO DO MICROPLÁSTICO POLICLORETO
DE VINILA EM ÁGUAS DO RIO PARAÍBA DO SUL**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Bauru, Bauru, para obtenção do título de Mestra em Engenharia Civil e Ambiental.

Área de Concentração: Saneamento Ambiental

Data da defesa: 04/08/2026

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de São José dos Campos

Prof. Dr. Luis Fernando Figueiredo Faria
USP – Escola de Engenharia de Lorena – Campus de Lorena

Prof. Dr^a. Liane Yuri Kondo Nakada
UNESP – Instituto de Ciência e Tecnologia – Campus de São José dos Campos

Dedico este trabalho à minha família, que proporcionou inesgotável apoio durante minha trajetória acadêmica.

Aos meus pais Maurício e Rosania, à minha irmã Beatriz e ao meu esposo Lidio que, por muitas vezes, acreditam mais em mim do que eu mesma.

Em especial, ao meu avô Maurício e à minha avó Dalva, que se dedicaram incansavelmente em todas as fases do meu crescimento para que eu pudesse chegar até aqui.

AGRADECIMENTOS

Com inigualável alegria, gostaria de agradecer à todos que me ajudaram a concretizar a tão sonhada conclusão do mestrado.

Aos meus pais Maurício Teófilo Cabral Júnior e Rosania Aparecida da Silva Cabral, que nunca mediram esforços para me amparar na realização dos meus sonhos e que me ensinaram os princípios que me trouxeram até aqui.

À minha irmã Beatriz da Silva Cabral, que vibra pelo meu sucesso e que me transmite confiança a cada novo passo.

Ao meu esposo Lidio Soares dos Santos Júnior, que me acompanhou em cada etapa sendo meu suporte emocional.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Adriano Gonçalves dos Reis, pela exímia orientação ao longo do desenvolvimento da pesquisa, contribuindo com meu desenvolvimento acadêmico e desempenho profissional.

À Victoria Agnes Ferreira, aluna de iniciação científica, pelo comprometimento durante a realização dos ensaios no laboratório.

Aos técnicos Vanessa Rodrigues Pereira e Douglas Magrini Garrão do laboratório de Saneamento e Hidráulica do ICT-UNESP/SJC, por todo o auxílio durante a preparação e execução dos ensaios.

À instituição de ensino Universidade Estadual Paulista - “Júlio de Mesquita Filho” (UNESP), e ao Programa de Pós- Graduação em Engenharia Civil e Ambiental (PPGCA), pela oportunidade de desenvolvimento acadêmico.

Ao Centro Experimental Multiusuário da Universidade Federal do ABC (CEM-UFABC) pelo apoio experimental, em especial ao doutorando Rodrigo Almeria Raggio e ao Prof. Dr. Eduardo Lucas Subtil, pelas análises de potencial zeta.

Ao Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (INPE), especialmente à Dra. Laura de Simone Borma e ao Carlos Daniel Meneghetti, pela parceria e auxílio nas análises de carbono orgânico dissolvido.

Ao Instituto de Ciência e Tecnologia da Universidade Federal de São Paulo (ICT/UNIFESP) de São José dos Campos pelas análises de tamanho de partícula.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), Brasil. Processo nº 2024/06591-5.

“Somos o que repetidamente fazemos. A excelência, portanto, não é um ato,
mas um hábito”

Aristóteles

RESUMO

Este estudo avaliou a remoção do microplástico de policloreto de vinila envelhecido (MP-PVC-ENV) em água natural do Rio Paraíba do Sul, inserindo-se no contexto dos desafios atuais do saneamento ambiental diante da presença crescente de microplásticos como poluente emergente em mananciais de abastecimento. A pesquisa partiu da questão sobre a eficiência da filtração em linha, uma combinação de coagulação e filtração granular rápida, para remover esse contaminante em condições próximas às de tratamento real, tendo como objetivo geral avaliar a eficiência de remoção do MP-PVC-ENV por essa tecnologia, comparando os coagulantes químicos sulfato de alumínio e cloreto férrico com o natural do extrato salino da semente de *Moringa oleifera* (MO). Trata-se de uma pesquisa experimental, desenvolvida em escala de bancada, com ensaios de jar test acoplados a filtro de areia, utilizando água natural do rio Paraíba do Sul, MP-PVC-ENV (15 mg/L, D50 = 15,4 µm) e parâmetros de controle como turbidez, cor aparente, cor verdadeira, absorvância em 254 nm, carbono orgânico dissolvido (COD), absorvância ultravioleta específica (SUVA), potencial zeta e imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV). A concentração do microplástico foi estimada indiretamente por meio da correlação com a turbidez. Os resultados indicaram elevada eficiência do processo, com remoções superiores a 99% de turbidez, e consequentemente de MP-PVC-ENV, em condições ótimas, além de redução expressiva dos parâmetros de qualidade da água avaliados, evidenciando que a filtração em linha é eficaz para a retenção do microplástico estudado. O índice de filtrabilidade de Ives também foi estatisticamente igual nestas condições ótimas. Observou-se ainda que o MO apresentou desempenho estatisticamente igual ao dos coagulantes químicos em relação à remoção do MP-PVC-ENV, reforçando seu potencial como alternativa sustentável para o tratamento de água. Esse desempenho é atribuído às proteínas catiônicas presentes no MO, que atuam por meio dos mecanismos de adsorção e neutralização de carga, evidenciado pelo aumento do potencial zeta da suspensão, e a formação de pontes poliméricas entre as partículas desestabilizadas, de acordo com a imagem apresentada de MEV das partículas de MP-PVC-ENV agregadas e aderidas aos grãos de areia. O uso do MO aumentou o COD por causa da matéria orgânica residual, mas reduziu a SUVA em 81%, indicando boa remoção da matéria orgânica aromática associada à formação de subprodutos da desinfecção. Assim, o trabalho contribui para o avanço do conhecimento sobre a remoção de microplásticos em matrizes naturais e para o desenvolvimento de soluções tecnicamente viáveis e ambientalmente mais sustentáveis no saneamento básico.

Palavras-chave: coagulação; filtração granular rápida; índice de filtrabilidade de Ives; potencial zeta.

ABSTRACT

This study evaluated the removal of aged polyvinyl chloride microplastics (MP-PVC-ENV) from natural water collected from the Paraíba do Sul River, within the current context of environmental sanitation challenges posed by the increasing presence of microplastics as emerging pollutants in drinking water sources. The research addressed the question of whether inline filtration, a combination of coagulation and rapid granular filtration, could effectively remove this contaminant under conditions close to real water treatment practice, with the overall aim of assessing the removal efficiency of MP-PVC-ENV using this technology and comparing two chemical coagulants, aluminum sulfate and ferric chloride, with a natural coagulant based on the saline extract of *Moringa oleifera* seeds (MO). This was an experimental bench-scale study using jar tests coupled to a sand filter, with natural water from the Paraíba do Sul River, MP-PVC-ENV at 15 mg/L with a median diameter (D50) of 15.4 μm , and control parameters including turbidity, apparent color, true color, UV absorbance at 254 nm, dissolved organic carbon (DOC), specific ultraviolet absorbance (SUVA), zeta potential, and scanning electron microscopy images (SEM). Microplastic concentration was indirectly estimated through its correlation with turbidity. The results showed high process efficiency, with turbidity removals above 99%, and consequently removal of MP-PVC-ENV under optimal conditions, along with substantial reductions in the evaluated water quality parameters, demonstrating that inline filtration is effective for retaining the studied microplastic. The Ives filterability index was also statistically equivalent under these optimal conditions. MO performed statistically similarly to the chemical coagulants in terms of MP-PVC-ENV removal, reinforcing its potential as a sustainable alternative for water treatment. This performance is attributed to the cationic proteins in MO, which act through adsorption and charge neutralization, as evidenced by the increase in suspension zeta potential, and through polymer bridging between destabilized particles, as shown by the SEM image of MP-PVC-ENV particles aggregated and attached to sand grains. The use of MO increased DOC due to residual organic matter, but reduced SUVA by 81%, indicating effective removal of aromatic organic matter commonly associated with the formation of disinfection by-products. Overall, this work advances knowledge on microplastic removal in natural waters and supports the development of technically feasible and more environmentally sustainable solutions for drinking water treatment.

Keywords: coagulation; rapid granular filtration; Ives filterability index; zeta potential.

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 - Câmara de envelhecimento UVC aberta com MP de PVC distribuído em placas de Petri de vidro.
- Figura 2 - MPs de PVC virgem (a) e envelhecido (b).
- Figura 3 - Jar test com filtro de areia acoplado para realizar as operações unitárias de coagulação e filtração granular rápida (Filtração em linha).
- Figura 4 – Preparação das amostras para análise da interação entre a areia e os MP-PVC-ENV desestabilizados pela coagulação: a) Filtro de areia filtrando a água coagulada; b) amostra de areia retirada da seção intermediária do filtro; c) amostra seca e metalizada para análise no MEV.
- Figura 5 - Distribuição do tamanho das partículas do MP-PVC-ENV.
- Figura 6 - Potencial Zeta do MP-PVC-ENV em suspensão para diferentes pHs.
- Figura 7 – Imagem de microscopia eletrônica de varredura (MEV) do MP-PVC-ENV.
- Figura 8 - Correlação concentração-turbidez de MP-PVC-ENV na água do rio Paraíba do Sul.
- Figura 9 - Efeito da dosagem dos coagulantes MO (a), SA (b), CF (c) no potencial zeta da suspensão e na remoção de turbidez, cor verdadeira, cor aparente e UV254 após filtração em linha em pH 6,0. As barras de erro representam valores de desvio padrão.
- Figura 10 - Efeito do aumento da dosagem do coagulante CF na remoção de turbidez, cor verdadeira, cor aparente e UV254 após filtração em linha em pH 5,0. As barras de erro representam valores de desvio padrão.
- Figura 11 - Efeito do aumento da dosagem do NaCl 1M na remoção de turbidez, cor verdadeira, cor aparente e UV254 após filtração em linha em pH 6,0. As barras de erro representam valores de desvio padrão.
- Figura 12 - Efeito da dosagem dos coagulantes MO, SA e CF no Índice de Filtração de Ives (IFI) após filtração em linha em pH 6,0. As barras de erro representam valores de desvio padrão.
- Figura 13 – Variação do a) carbono orgânico dissolvido (COD) e da b) absorbância ultravioleta específica (SUVA), para diferentes dosagens de ES-SMO, SA e CF a pH 6,0 após a filtração em linha.

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Evolução do Grupo de Pesquisa em “Operações Unitárias Aplicadas ao Saneamento” do Departamento de Engenharia Ambiental do ICT/Unesp de São José dos Campos.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Caracterização da água do rio natural e água do rio com adição de 15 mg/L de MP-PVC-ENV de 20 amostras analisadas.

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ANOVA	Análise De Variância
BPA	Bisfenol-A
CAPES	Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior
CF	Cloreto Férrico
COD	Carbono Orgânico Dissolvido
DCE	Dupla Camada Elétrica
DLVO	Derjaguin–Landau–Verwey–Overbeek
DQO	Demanda Química de Oxigênio
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estação de Tratamento de Efluentes
FAPESP	Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo
FDCE	Repulsão Eletrostática
ICT	Instituto de Ciência e Tecnologia
IFI	Índice de Filtrabilidade de Ives
MEV	Microscopia Eletrônica De Varredura
MO	<i>Moringa oleifera</i>
MON	Matéria Orgânica Natural
MOR	Matéria Orgânica Residual
MP	Microplástico
MP-PVC-ENV	Microplástico Policloreto de Vinila Envelhecido
NaCl	Cloreto de Sódio
NaOH	hidróxido de Sódio
ONU	Organização das Nações Unidas
PAC	Cloreto de Polialumínio
PAM	Poliacrilamida

PE	Polietileno
PEVA	Polietileno Vinil Acetato
PET	Tereftalato de Polietileno
PH	Potencial Hidrogeniônico
PP	Polipropileno
PS	Poliestireno
POP	Poluentes Orgânicos Persistentes
PVC	Policloreto de Vinila
SA	Sulfato de Alumínio
SUVA	Absorbância Ultravioleta Específica
UNESP	Universidade Estadual Paulista
UNT	Unidade de Turbidez Nefelométrica
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO

2 OBJETIVOS

3 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

3.1 PROBLEMÁTICA DOS MPS PARA A SAÚDE HUMANA E MEIO AMBIENTE

3.2 MICROPLÁSTICOS NA ÁGUA DE ABASTECIMENTO

3.3. TÉCNICAS DE REMOÇÃO DO MP DA ÁGUA (COAGULAÇÃO-FLOCULAÇÃO-SEDIMENTAÇÃO-FILTRAÇÃO)

3.3.1. Coagulação

3.3.2. Floculação

3.3.3. Sedimentação

3.3.4. Filtração Granular Rápida

3.4. COAGULANTE NATURAL - MORINGA OLEIFERA

3.5. REMOÇÃO DE MP EM ÁGUAS SUPERFICIAIS

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

4.2 CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DE ESTUDO

4.3. QUANTIFICAÇÃO DOS MP (CURVA DE CALIBRAÇÃO)

4.4. ENSAIOS JAR TEST VIA FILTRAÇÃO EM LINHA

4.5. ÍNDICE DE FILTRABILIDADE DE IVES

4.6. AVALIAÇÃO DA INTERAÇÃO ENTRE MP-PVC-ENV E O FILTRO DE AREIA POR MEV

4.7. ANÁLISE ESTATÍSTICA

5. RESULTADOS

5.1. CARACTERIZAÇÃO DO MP PVC

5.2. QUANTIFICAÇÃO DO MP VIA TURBIDEZ

5.3. CARACTERIZAÇÃO DA ÁGUA DO RIO E DA ÁGUA DE ESTUDO

5.4. EFEITOS DAS DOSAGENS DOS COAGULANTES NA REMOÇÃO DE MP

5.5. EFEITOS DAS DOSAGENS DOS COAGULANTES NA FILTRABILIDADE

5.6. EFEITOS NO COD E SUVA APÓS FILTRAÇÃO EM LINHA

6 CONCLUSÃO

REFERÊNCIAS

1 INTRODUÇÃO

Por ser um material multifuncional, o plástico está presente na maior parte dos produtos consumidos nos dias de hoje. Em 2024, foram produzidas 430 milhões de toneladas de plástico, 4% a mais do que em 2023 (PLASTICS, 2025). Em relação a 2018, a produção mundial de plástico cresceu 16%, e mesmo durante a pandemia, em que os serviços e produção de bens de consumo sofreram queda significativa, a produção de plástico se manteve crescente em escala global (PLASTICS, 2025). O plástico é um polímero sintético, composto por inúmeros monômeros que formam uma macromolécula (MICHAELI, 1995). Desde a descoberta do primeiro polímero sintético, datada em 1909, e com o surgimento de outros tipos de plásticos, a diversidade de aplicações de seu uso viabilizou a produção de diferentes produtos, soluções e facilidades para a sociedade (SOARES, 2020).

A segunda revolução industrial foi precursora do aumento progressivo da industrialização e a demanda por este tipo de material foi acelerada pela crescente da população global. O plástico tornou-se um material amplamente acessível, versátil e presente em praticamente todos os aspectos do cotidiano das pessoas. Consequentemente, houve maior geração de resíduos plásticos, tornando sua presença no lixo doméstico cada vez mais expressiva (BHARDWAJ, 2024).

Devido a processos como ações mecânicas, foto-oxidação e biodegradação dos resíduos plásticos ao longo do tempo, surge um novo poluente emergente: o microplástico (MP). Essas partículas são transportadas a longas distâncias devido a correntes marítimas e fenômenos hidrodinâmicos, e já estão presentes em compartimentos ambientais aquáticos (COLE, 2011), biota marinha (SKAF, 2020) e, inclusive, no corpo humano (YANG, 2023). Em 2004, os MPs foram definidos pela primeira vez por THOMPSON et al. (2004) e foram classificados como micropartículas de plástico menores que 20,0 μm . Estudos recentes definem os MPs como partículas de diâmetro variando entre 0,1 μm e 5,0mm e como nanoplásticos quando menores que 0,1 μm (SHEN, 2020).

Os MPs são classificados como primários e secundários. Os MPs fabricados em tamanho de micropartículas para um determinado uso específico, como resinas industriais, esfoliantes e produtos de higiene, são classificados como

primários. Quanto aos secundários, são aqueles gerados através da degradação de produtos plásticos fabricados para outros usos (POMPÊO *et.al*, 2022).

Visto isso, as fontes geradoras deste poluente são as mais diversas. Desde a lavagem doméstica de roupas e tecidos de composição sintética (PIRC, 2016), uso de cosméticos e produtos de higiene pessoal, como esfoliantes e cremes dentais que contêm microesferas plásticas em sua composição (FENDALL, 2009), decomposição de resíduos plásticos, principalmente os descartados de forma inadequada (TONG, 2022), a deposição atmosférica nos ambientes aquáticos de águas pluviais contaminadas; e a água e outras bebidas engarrafadas em garrafas plásticas (OBMANN *et al*, 2018).

O processo convencional de tratamento de água inclui as etapas de coagulação, floculação, sedimentação e filtração granular rápida (CRITTENDEN *et al.*, 2012). Diversos estudos têm sido realizados em laboratório a fim de testar diferentes etapas e compreender a eficiência de remoção de MPs (Godoy *et al.*, 2025a; 2025b; Lapointe *et al*, 2020). Porém, SHEN *et al.* (2020) demonstraram em uma revisão sistemática da literatura que ainda existem inconclusões à respeito do tema, pois os trabalhos publicados têm resultados de eficiência de remoção do MP variando em uma escala muito abrangente. Dentre as técnicas convencionais de tratamento de água, o tratamento em linha, que envolve coagulação e filtração granular rápida e é aplicado para águas com baixa turbidez (CRITTENDEN *et al.*, 2012), ainda é muito pouco explorado para a remoção de MPs da água de abastecimento. Em um estudo recente (Batista, *et al.*, 2026), comparou-se a eficiência de remoção do MP via filtração em linha e filtração direta, sendo a primeira técnica mais eficiente, o que direcionou a escolha da mesma para realização dos ensaios do presente estudo.

O PVC tem ampla produção e aplicação em escala global e apresenta risco aos compartimentos ambientais. O PVC também tem sido identificado em ambientes aquáticos, tanto em águas superficiais quanto em sistemas de abastecimento de água potável (KOELMANS *et al.*, 2019; PIVOKONSKY *et al.*, 2020). Além disso, já foi encontrado no corpo humano, inclusive em maior quantidade em amostras de leite materno (RAGUSA *et al*, 2022). Em um estudo de LITHNER, LARSSON E DAVE (2011), 55 polímeros termoplásticos e termofixos

foram avaliados quanto aos riscos ambientais e à saúde humana, com base em substâncias químicas utilizadas em sua composição. O PVC foi classificado entre os polímeros mais tóxicos, devido à presença de monômeros considerados carcinogênicos e mutagênicos. Não foram encontrados na literatura científica estudos que avaliem o comportamento do PVC em sistemas de filtração em linha em água natural como matriz e, considerando sua ampla ocorrência no meio ambiente, evidencia-se a necessidade de estudos como este apresentado aqui.

O uso de coagulantes naturais para a remoção de microplásticos em águas superficiais apresenta literatura escassa. Entre esses materiais, a semente de *Moringa oleifera* tem se destacado por apresentar proteínas catiônicas com ponto isoelétrico elevado (10-11), o que favorece sua atuação em ampla faixa de pH. Seu mecanismo de coagulação envolve a adsorção e neutralização de cargas, além da formação de pontes entre partículas desestabilizadas, atribuída às proteínas de menor peso molecular presentes em sua composição. Embora esse coagulante possa promover agregação eficiente, os flocos formados tendem a ser menores do que aqueles obtidos com polímeros sintéticos, como a poliacrilamida, em razão da menor extensão das cadeias proteicas (Ndabigengesere et al., 1995; Badawi et al, 2025; Agarwal et al, 2024; Ribeiro et al., 2019). Apesar de estudos recentes terem demonstrado o potencial da semente de *M. oleifera* na remoção de microplásticos em águas sintéticas (Godoy et al., 2025a; Batista et al., 2026), ainda não foram encontrados trabalhos que avaliem seu desempenho em águas naturais superficiais, evidenciando uma importante lacuna científica.

Visto que os MPs são um poluente emergente com potencial de afetar a saúde pública e os compartimentos ambientais, e diante da necessidade de novos estudos que esclareçam a viabilidade de remoção de tais partículas da água de abastecimento, o interesse científico deste projeto de pesquisa é avaliar o potencial de remoção de MPs da água através do tratamento via filtração em linha por meio das etapas de coagulação e filtração granular rápida, utilizando-se de coagulantes tanto natural (extrato salino da semente de *Moringa oleifera*) quanto químicos (cloreto férrico e sulfato de alumínio) em amostras de água natural (rio Paraíba do Sul). Até onde sabemos, ainda não foi publicado nenhum estudo sobre o uso de semente de *M. oleifera* para remoção de MPs envelhecidos de água superficial via

filtração em linha. Além disso, a avaliação do mecanismo de coagulação associado à remoção do MP e o acompanhamento do carbono orgânico residual e da absorbância ultravioleta específica tornam este estudo ímpar na literatura.

Esta pesquisa está alinhada com o Objetivo de Desenvolvimento Sustentável no 6 da ONU - Assegurar a disponibilidade e gestão sustentável da água e saneamento para todos.

O presente estudo integra-se à linha de pesquisa desenvolvida pelo grupo de pesquisa do CNPq em “[Operações Unitárias Aplicadas ao Saneamento](#)”, liderado pelo Prof. Adriano Gonçalves dos Reis, do Departamento de Engenharia Ambiental do Instituto de Ciência e Tecnologia (ICT) da Universidade Estadual Paulista (UNESP) de São José dos Campos. Este estudo dá continuidade aos esforços em andamento do grupo de pesquisa (Quadro 1) em remover MPs da água de abastecimento com o uso do coagulante natural extraído da semente de *M. oleífera* em comparação aos coagulantes sintéticos sulfato de alumínio e cloreto férrico. Essa abordagem visa contribuir para o aprimoramento de processos de tratamento de água mais sustentáveis, com menor impacto ambiental e maior eficiência. Além disso, neste trabalho é avaliada a técnica de filtração em linha para remoção de MPs da água de abastecimento com o uso de água natural (Rio Paraíba do Sul) como matriz. Este estudo faz parte do Projeto de Pesquisa Regular aprovado na FAPESP 2024/06591-5 - Filtração direta e em linha para remoção de microplásticos da água de abastecimento.

Quadro 1 - Evolução do Grupo de Pesquisa em “[Operações Unitárias Aplicadas ao Saneamento](#)” do Departamento de Engenharia Ambiental do ICT/Unesp de São José dos Campos.

Período	Aluno	Tipo de Pesquisa / Link	Título/Tema	Avanço na pesquisa
2016-2017	João Vitor Mariano Ribeiro	IC	Construção e emprego de diagramas de coagulação com sulfato de alumínio para otimização do tratamento em águas de abastecimento	Primeiro projeto de pesquisa do grupo, o qual estabeleceu as metodologias de ensaio e análise em tratamento de água de abastecimento
2016-2017	Lilian de Paula Sousa	IC	Diagramas de coagulação para uso de cloreto férrico em tratamento de águas de abastecimento em ciclo completo	Investigou um segundo coagulante químico no tratamento de água de abastecimento
2016-2017	Priscila Vega Andrade	IC / TG / Artigo	Inclusão de um tratamento terciário quimicamente assistido na estação de tratamento de efluente do Parque Tecnológico de São José dos Campos	Uso de diferentes coagulantes $[Al_2(SO_4)_3]$, PAC ou $FeCl_3$ no tratamento terciário de efluentes
2017-2018	Wagner Yukio Kamiwada	IC / TG / Artigo	Emprego do cloreto de polialumínio (PAC) em estudos de tratabilidade de água de abastecimento via coagulação, floculação e sedimentação	Estudo aprofundado do coagulante PAC no tratamento de água de abastecimento
2017-2018	João Vitor Mariano Ribeiro	IC / TG / Artigo	Emprego de semente de <i>Moringa oleifera</i> no tratamento de águas de abastecimento via filtração direta	Este foi o primeiro trabalho do grupo de pesquisa com o uso da semente de <i>M. oleifera</i> como coagulante natural
2018-2019	Roberta M. Seneda	IC / TG / Artigo	Cinética da floculação: um estudo comparativo no uso do cloreto de polialumínio com alta e baixa basicidade e o sulfato de alumínio	Avaliação de cinética de floculação e comparação entre coagulantes químicos
2018-	Talita C. S.	IC / TG /	Caracterização e estabilização alcalina de lodo de ETE e determinação	Tratamento e disposição de lodo de

2019	Guerra	Artigo	da elevação do pH para uso no solo	ETE por estabilização química
2018-2019	Carolina F. Palanca	IC / TG / Artigo	Remoção de cor e turbidez de um efluente sanitário secundário com o uso de semente de <i>Moringa oleifera</i> como coagulante	Uso da semente de <i>M. oleifera</i> como coagulante em tratamento de efluentes
2018-2021	Priscila V. Andrade	Mestrado / Artigo	Uso da semente de <i>Moringa oleifera</i> como coagulante no tratamento terciário de efluente sanitário	Uso da semente de <i>M. oleifera</i> como coagulante em tratamento de efluentes
2019-2020	Lucas Juvelho Gargel	IC / TG / Artigo	Uso da semente de <i>Moringa oleifera</i> como bioissorvente para remoção do corante azul de metileno em solução aquosa	Primeiros ensaios de adsorção com o uso da semente de <i>M. oleifera</i> como adsorvente de baixo custo
2020-2021	Carolina Almeida Lopes	IC / TG / Artigo	Avaliação do uso da casca da semente de <i>Moringa oleifera</i> como bioissorvente na remoção do corante azul de metileno	Uso da casca da semente de <i>M. oleifera</i> como adsorvente de baixo custo
2021-2022	Victoria Rodrigues Ribeiro	TG	Ativação química da casca da semente de <i>Moringa oleifera</i> para uso como adsorvente	Primeiras pesquisas com a ativação de resíduos para otimização da capacidade adsorvente
2021-2022	Beatriz Siqueira Tihameri	IC / TG / Artigo	Uso da semente de <i>Moringa oleifera</i> após extração do óleo via soxhlet para tratamento de água de abastecimento	Estudo das diferentes formas de extração para uso da semente de <i>M. oleifera</i> como coagulante
2020-2022	Geane Garcia Chales	Mestrado / Artigo	Efeito dos métodos de extração no uso da semente de <i>Moringa oleifera</i> como coagulante primário	Estudo das diferentes formas de extração para uso da semente de <i>M. oleifera</i> como coagulante
2021-2022	Hosana M. da Costa Rateiro	TG / Capítulo de Livro	Eficiência de remoção de carga orgânica em Estação de Tratamento de Efluentes piloto instalada no Parque Tecnológico de São José dos Campos	Planta piloto para tratamento de efluentes do Parque de Inovação Tecnológica
2021-2022	Luiz G. R. Godoy	IC / TG / Artigo	Remoção de microplásticos na água via coagulação, floculação e sedimentação	Primeiros ensaios de remoção de MP da água de abastecimento

2022-2023	Gabrielle Soares Batista	IC / TG / Artigo	Condicionamento com semente de <i>Moringa oleifera</i> para adensamento do lodo gerado em reator anaeróbio compartimentado	Uso da semente de <i>M. oleifera</i> como coagulante no sobrenadante do adensado de lodo de ETE
2023-2024	Daniela Duque Resende	TG / Artigo	Uso da vagem de <i>Moringa oleifera</i> como adsorvente natural de fósforo e sua comparação com carvão ativado comercial para mitigação de ecossistemas eutrofizados	Desenvolvimento da vagem da semente de <i>M. oleifera</i> como adsorvente de baixo custo
2022-2025	Victória Agnes S. Ferreira	IC / TG / Artigo	Abordagem sustentável para a remoção de bisfenol A da água: adsorvente de baixo custo utilizando a casca da semente de <i>Moringa oleifera</i>	Desenvolvimento da casca da semente de <i>M. oleifera</i> para adsorção de BPA da água
2021-2024	Cely Roledo	Doutorado / Artigo / Artigo	Avaliação da contaminação por Bisfenol A (BPA) no rio Paraíba do Sul e da sua remoção por adsorção	Desenvolvimento da casca da semente de <i>M. oleifera</i> para adsorção de BPA da água
2022-2023	Leticia da S. Cabral	TG / Artigo	Uso do cloreto de polialumínio (PAC) para remoção de microplásticos da água tratada	Estudo de remoção de MP de polietileno
2022-2023	Maria G. Custodio de Oliveira	TG / Artigo	Remoção de microplásticos no tratamento de água utilizando a semente de <i>Moringa oleifera</i> como coagulante natural	Primeiros ensaios para remoção de MP com o uso da semente de <i>M. oleifera</i> como coagulante
2023-2025	Luiz Gustavo R. Godoy	Mestrado / Artigo / Artigo	Remoção de microplástico da água via coagulação-floculação com o uso de coagulantes sintético e natural	Estudo de remoção de MPs da água com uso de coagulantes químicos e naturais e auxílio de monitoramento não intrusivo de tamanho do floco
2024	Adriano G. dos Reis	Livre-docência	Uso de coagulante natural e adsorvente de baixo custo no tratamento de águas de abastecimento e residuárias	Título de livre-docente em Operações Unitárias Aplicadas ao Saneamento
2024-2026	Gabrielle Soares	Mestrado / Artigo	Remoção do microplástico policloreto de vinila da água via filtração direta e em linha com o uso da semente de <i>Moringa oleifera</i>	Estudo da capacidade de remoção de MP da água preparada em laboratório

	Batista			via filtração direta e em linha com o uso de coagulantes químico e natural.
2025-2026	Bruno Barreto Fernandes	IC / PFC	Remoção de microplásticos do Rio Paraíba do Sul via coagulação, floculação e sedimentação	Estudo da capacidade de remoção de MP de água natural via floculação lastreada com o uso de coagulantes químico e natural.
2025-Atual	Luiz Gustavo R. Godoy	Doutorado	Microplásticos como vetores de transporte de contaminantes emergentes: estudo avançado de adsorção e toxicidade	Em andamento. Está sendo estudado o efeito da contaminação de MPs no meio ambiente
2025-Atual	Maria Clara C. L. Guimarães	IC / PFC	Avaliação da capacidade dos microplásticos de polietileno de transportar bisfenol A via adsorção	Em andamento. Está sendo estudada a capacidade de adsorção de BPA no MP-PE virgem e envelhecido.
2025-Atual	Lanah Correa da Silva	IC / PFC	Microplásticos de policloreto de vinila como vetores de transporte do contaminante emergente bisfenol A: estudo de adsorção	Em andamento. Será estudada a capacidade de adsorção de BPA no MP-PVC virgem e envelhecido.
2024-Atual	Leticia da Silva Cabral	Mestrado	Filtração em linha para remoção do microplástico policloreto de vinila em águas do Rio Paraíba do Sul	Este estudo. Está sendo estudada a capacidade de remoção de MP da água natural via filtração em linha com o uso de coagulantes químicos e natural.

Fonte: Elaborado pelos autores (2026).

6 CONCLUSÃO

Este estudo avaliou a remoção do microplástico de policloreto de vinila envelhecido (MP-PVC-ENV) da água natural do Rio Paraíba do Sul por filtração em linha, combinando coagulação e filtração granular rápida com o extrato salino da semente de *Moringa oleifera*, sulfato de alumínio e cloreto férrico. Os principais resultados mostraram que os três coagulantes alcançaram desempenho muito elevado, com remoções máximas de turbidez, e consequentemente de MP-PVC-ENV, superiores a 99%, e valores estatisticamente semelhantes entre si nas dosagens ótimas, além de forte redução de cor aparente, cor verdadeira, UV_{254} e SUVA.

A pesquisa demonstra que a filtração em linha é uma alternativa eficiente para remover MP-PVC-ENV em água natural, em condições mais próximas da realidade de tratamento de água de abastecimento. Também evidencia que o extrato salino da semente de *Moringa oleifera* pode atingir desempenho comparável ao dos coagulantes químicos, o que amplia o interesse por soluções mais sustentáveis e potencialmente menos dependentes de insumos convencionais. Esse desempenho é atribuído às proteínas catiônicas presentes no extrato salino da semente de *Moringa oleifera*, que atuam por meio de dois mecanismos: neutralização de carga de coloides carregados negativamente, evidenciados pelo aumento do potencial zeta da suspensão, e a formação de pontes poliméricas entre as partículas, evidenciado pelas imagens de MEV das partículas de MP-PVC-ENV agregadas e aderidas ao grão de areia.

O trabalho foi conduzido em escala de bancada, com condições controladas, o que limita a extrapolação imediata para estações de tratamento em escala real. Além disso, o ensaio avaliou um único tipo de microplástico, o PVC, e uma matriz específica de água superficial, de modo que outros polímeros e diferentes características de água podem apresentar comportamento distinto. Também deve-se considerar que o uso de coagulante natural pode elevar o carbono orgânico dissolvido residual, exigindo atenção em aplicações práticas. Em contrapartida, a alta capacidade de remoção do SUVA (81%) evidencia a efetividade

do extrato salino da semente de *Moringa oleifera* na remoção de compostos com potencial de formação de subprodutos da desinfecção com cloro.

Como continuidade nos estudos, recomenda-se testar a tecnologia em escala piloto e em diferentes condições sazonais do rio, incluindo variações de turbidez e matéria orgânica natural. Também é importante ampliar os estudos para outros tipos de microplásticos, avaliar diferentes meios filtrantes e investigar o impacto operacional em longo prazo, como perda de carga, ciclos de retrolavagem e qualidade do lodo gerado.

REFERÊNCIAS

- AGARWAL, P.; PRAKASH, S.; SAINI, G. Natural coagulants (Moringa oleifera and Benincasa hispida) based removal of microplastics. **Cleaner Water**, [s. l.], vol. 1, p. 100010, 1 Jun. 2024. DOI 10.1016/j.clwat.2024.100010.
- ANDERSON, L. E., TCHONLLA, M., EARLE, M., SWINAMER, R., GAGNON, G. A. Adapting direct filtration to increasing source water dissolved organic carbon using clarification and granular activated carbon. **AWWA Water Science**, e1352. 2023. <https://doi.org/10.1002/aws2.1352>
- BADAWI, A. K., HASAN, R., ISMAIL, B. Sustainable coagulative removal of microplastic from aquatic systems: recent progress and outlook. **RSC Advances**, Volume 15, Issue 31, 2025, Pages 25256-25273, ISSN 2046-2069, <https://doi.org/10.1039/d5ra04074d>.
- BAPTISTA, A. T. A., SILVA, M. O., GOMES, R. G., BERGAMASCO, R., VIEIRA, M. F., VIEIRA, A. M. S. Protein fractionation of seeds of Moringa oleifera lam and its application in superficial water treatment. **Separation and Purification Technology**, [s. l.], vol. 180, p. 114–124, 8 Jun. 2017. DOI 10.1016/J.SEPPUR.2017.02.040.
- BATISTA, G. S., FERREIRA, V. A. S., GODOY, L. G. R., MORUZZI, R. B., Sharifi, S., REIS, A. G. Removal of Microplastics from Drinking Water by Moringa oleifera Seed: Comparative Performance with Alum in Direct and in-Line Filtration. Systems **ACS Omega** 2026 11 (4), 6602-6612. DOI: 10.1021/acsomega.5c11569
- BAYARKHUU, B., BYUN, J. Optimization of coagulation and sedimentation conditions by turbidity measurement for nano- and microplastic removal. **Chemosphere** 306: 135572. 2022. <https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2022.135572>
- BITTENCOURT, C., DE PAULA, M. A. S. **Tratamento de água e efluentes: fundamentos de saneamento ambiental e gestão de recursos hídricos**. 1a ed. São Paulo: Érica, 2014. ISBN: 978-85-365–0916-7.
- BHARDWAJ, L.K., RATH, P., YADAV, P. *et al.* Microplastic contamination, an emerging threat to the freshwater environment: a systematic review. **Environ Syst Res** 13, 8, 2024. <https://doi.org/10.1186/s40068-024-00338-7>.
- CHALES, G.G., TIHAMERI, B.S., MILHAN, N.V.M., KOGA-ITO, C.Y., ANTUNES, M.L.P., REIS, A.G.D. Impact of Moringa oleifera Seed-Derived Coagulants Processing Steps on Physicochemical, Residual Organic, and Cytotoxicity Properties of Treated Water. **Water** 2022, 14, 2058. <https://doi.org/10.3390/w14132058>.
- CHRISTOPHER, W.K., CHOW, J. A., VAN LEEUWEN, R. F., DRIKAS, M. Optimised coagulation using aluminium sulfate for the removal of dissolved organic carbon. **Desalination**. Volume 245, Issues 1–3, 2009, Pages 120-134, ISSN 0011-9164, <https://doi.org/10.1016/j.desal.2008.06.014>.

COLE, M., LINDEQUE, P., HALSBAND, C., GALLOWAY, T. S. Microplastics as contaminants in the marine environment: A review. **Marine Pollution Bulletin**. Volume 62, Issue 12, 2011. Pages 2588-2597. ISSN 0025-326X. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2011.09.025>.

COSTA, M. M.. Otimização do processo de coagulação de águas superficiais com metodologia de superfície de resposta: estudo de coagulantes inorgânicos para remoção de cor, turbidez e UV 254. 65f. Dissertação (Mestrado Profissional em Engenharia Ambiental) – **Universidade Federal do Tocantins**, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Ambiental, Palmas, 2023.

CRITTENDEN, J. C.; TRUSSELL, R. R.; HAND, D. W.; HOWE, K. J.; TCHOBANOGLIOUS, G. **MWH's Water Treatment: Principles and Design: Third Edition**. [S. l.]: John Wiley and Sons, 2012. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9781118131473>.

DAYARATHNE, n., ANGOVE, M. J., ARYAL, R., ABUEL-NAGA, H., MAINALI, B. Removal of natural organic matter from source water: Review on coagulants, dual coagulation, alternative coagulants, and mechanisms. **Journal of Water Process Engineering**. Volume 40, 2021, 101820, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2020.101820>.

FENDALL, L. S., SEWELL, M. A. Contributing to marine pollution by washing your face: Microplastics in facial cleansers. **Marine Pollution Bulletin**. Volume 58, Issue 8. 2009. Pages 1225-1228. ISSN 0025-326X. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2009.04.025>.

GODOY, L. G. R.; DE OLIVEIRA, M. G. C.; MORUZZI, R. B.; SHARIFI, S.; DOS REIS, A. G. Improving microplastics aggregate settling velocity through ballasted flocculation via natural-based coagulants and nonintrusive image monitoring. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], vol. 74, p. 107761, 2025a. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2214714425008335?via%3Dihub>.

GODOY, L.G.R., MORUZZI, R.B., ODJEGBA, E.E. et al. Enhanced removal of microplastics from drinking water using ballasted flocculation: a comparative study with conventional methods using non-intrusive image analysis. **Brazilian Journal of Chemical Engineering**. 42, 1363–1378 (2025b). <https://doi.org/10.1007/s43153-024-00530-3>

HILLEBRAND, F. J., BENETTI, A. D. Characterization of dissolved organic matter in drinking water treatment processes using rapid fractionation. **Eng Sanit Ambient**, v.25 n.2, 2020 | 237-246. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522020193488>

CHABI, K., LI, J., YE, C., KIKI, C., XIAO, X., LI, X., GUO, L., GAD, M., FENG, M., YU, X. Rapid sand filtration for <10 µm-sized microplastic removal in tap water treatment: Efficiency and adsorption mechanisms, **Science of The Total Environment**, Volume 912, 2024, 169074, ISSN 0048-9697, <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169074>.

CHOW, K., TRIPATHY, S. S., BERSILLON, J. L., DUBEY, S. P. Chlorination byproducts, their toxicodynamics and removal from drinking water. **Journal of Hazardous Materials**, [s. l.], vol. 140, no. 1–2, p. 1–6, 9 Feb. 2007. DOI 10.1016/J.JHAZMAT.2006.10.063.

HOWE, K. J., HAND, D. W., CRITTENDEN, J. C., TRUSSEL, R. R., TCHOBANOGLOUS, G. **Princípios de Tratamento de Água**. 1a ed. São Paulo: Cengage learning, 2016. 624p. ISBN: 978-85-221-2200-4.

IVES, K. J. **A new concept of filterability**. Progress in Water Technology 10(5-6):123-137. 1978. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-022939-3.50016-7>

Jang, M., Kim, M., Han, M., Kwak, D. Experimental application of a zero-point charge based on pH as a simple indicator of microplastic particle aggregation, **Chemosphere**, Volume 299, 2022, 134388, ISSN 0045-6535, <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2022.134388>.

KIRSTEIN, I. V., HENSEL, F., GOMIERO, A. et al. Drinking plastics – Quantification and qualification of microplastics in drinking water distribution systems by FTIR and Py-GCMS. **Water Res** 188:116519. 2021. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2020.116519>

KOELMANS, A.A., MOHAMED NOR, N. H., HERMSEN, E., KOOI, M., MINTENIG, S. M., DE FRANCE, J. Microplastics in freshwaters and drinking water: Critical review and assessment of data quality. **Water Res** 155: 410–22. 2019. <https://doi.org/10.1016/J.WATRES.2019.02.054>

Lapointe, M., Farner, J. M., Hernandez, L. M., Tufenkji, N. Understanding and improving microplastic removal during water treatment: impact of coagulation and flocculation, **Environ. Sci. Technol.** 54 (2020) 8719–8727, <https://doi.org/10.1021/acs.est.0c00712>

LETTERMAN, R. D. (Ed.). **Water quality and treatment: a handbook of community water supplies**. 5. ed. New York: McGraw-Hill, 1999.

LI, B., ZHAO, J., GE, W., LI, W., YUAN, H. Coagulation-flocculation performance and floc properties for microplastics removal by magnesium hydroxide and PAM. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Volume 10, Issue 2. 2022. 107263. ISSN 2213-3437. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.107263>.

LI, Y.; MENG, Y.; QIN, L.; SHEN, M.; QIN, T.; CHEN, X.; CHAI, B.; LIU, Y.; DOU, Y.; DUAN, X. Occurrence and Removal Efficiency of Microplastics in Four Drinking Water Treatment Plants in Zhengzhou, China. **Water**, 16, 131. 2024. <https://doi.org/10.3390/w16010131>

LITHNER, D., LARSSON, Å., DAVE, G. Environmental and health hazard ranking and assessment of plastic polymers based on chemical composition. **Sci Total Environ.** 2011. 409(18):3309-3324. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2011.04.038>

MA, B., XUE, W., DING, Y., HU, C., LIU, H., QU, J. Removal characteristics of microplastics by Fe-based coagulants during drinking water treatment. **Journal of Environmental Sciences.** Volume 78. 2019a. Pages 267-275. ISSN 1001-0742. <https://doi.org/10.1016/j.jes.2018.10.006>.

MATILAINEN, A., GJESSING, E. T., LAHTINEN, T., HED, L., BHATNAGAR, A., SILLANPÄÄ, M. An overview of the methods used in the characterisation of natural organic matter (NOM) in relation to drinking water treatment. **Chemosphere**, [s. l.], vol. 83, no. 11, p. 1431–1442, 1 Jun. 2011. DOI 10.1016/J.CHEMOSPHERE.2011.01.018.

MEGERSA, M.; GACH, W.; BEYENE, A.; AMBELU, A.; TRIEST, L. Effect of salt solutions on coagulation performance of *Moringa stenopetala* and *Maerua subcordata* for turbid water treatment. **Separation and Purification Technology**, v. 221, p. 319-324, 2019. DOI: 10.1016/j.seppur.2019.04.013.

MICHAELI, W. **Tecnologia dos plásticos**. Editora Blucher, 1995. Ebook. ISBN 9788521217305. <https://app.minhabiblioteca.com.br/#/books/9788521217305/>.

NA, S. H., KIM, M. J., KIM, J. T., JEONG, S., LEE, S., CHUNG, J., KIM, E. J. Microplastic removal in conventional drinking water treatment processes: Performance, mechanism, and potential risk. **Water Research**, [s. l.], vol. 202, p. 117417, 1 Sep. 2021., <https://doi.org/10.1016/j.watres.2021.117417>.

NDABIGENGESERE, A., NARASIAH, K. S., TALBOT, B. G. Active agents and mechanism of coagulation of turbid waters using *Moringa oleifera*. **Water Research**, [s. l.], vol. 29, no. 2, p. 703–710, 1 Feb. 1995. DOI 10.1016/0043-1354(94)00161-Y.

NEGRETE VELASCO, V. A.; RAMSEIER GENTILE, S.; ZIMMERMANN, S.; STOLL, S. Contamination and removal efficiency of microplastics and synthetic fibres in a conventional drinking water treatment plant. **Frontiers in Water**, v. 4, art. 835451, 05 abr. 2022. DOI: 10.3389/frwa.2022.835451. Disponível em: <https://www.frontiersin.org/journals/water/articles/10.3389/frwa.2022.835451/full>

NEPOMUCENO, T. C. **Estudo de aplicabilidade de coagulantes orgânicos e inorgânicos no tratamento de água para abastecimento público**. 169f. Trabalho de Conclusão de Curso Graduação em Engenharia Sanitária e Ambiental. Universidade Estadual da Paraíba. Campina Grande, 2015.

OBMANN, B., SARAU, G., HOLTMANNSPÖTTER, H., PISCHETSRIEDER, M., CHRISTIANSEN, S., WILHELM, D. Small-sized microplastics and pigmented particles in bottled mineral water. **Water Research**. 2018. 141. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2018.05.027>.

OKORO, B. U., SHARIFI, S., JESSON, M., BRIDGEMAN, J., MORUZZI, R. Characterisation and performance of three Kenaf coagulation products under different operating conditions. **Water Research**, [s. l.], vol. 188, p. 116517, 1 Jan. 2021. DOI 10.1016/J.WATRES.2020.116517.

OUYANG, Z., ZHANG, Z., JING, Z. et al. The photo-aging of polyvinyl chloride microplastics under different UV irradiations. **Gondwana Res.** 2022. 108:72-80. <https://doi.org/10.1016/j.gr.2021.07.010>.

PADILHA, D. J.; CERUTI, F. C.; VIDAL, C. M. de S.; MARTINS, C. H. Análise da utilização de três diferentes coagulantes na remoção de água de manancial de abastecimento. VII Encontro Internacional de produção científica. **Anais eletrônico**. CESUMAR – Centro Universitário de Maringá. Maringá, PR. 2011.

Plastics, 2025. **Plastics-The Facts 2025**. Disponível em: <https://plasticseurope.org/knowledge-hub/plastics-the-fast-facts-2025/>.

PIRC, U., VIDMAR, M., MOZER, A., KRZAN, A. Emissions of microplastic fibers from microfiber fleece during domestic washing. **Environ Sci Pollut Res** 23, 22206–22211. 2016. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-7703-0>.

PIVOKONSKY, M., CERMAKOVA, L., NOVOTNA, K., PEER, P., CAJTHAML, T., JANDA, V. Occurrence of microplastics in raw and treated drinking water. **Science of The Total Environment**. Volume 643. 2018. Pages 1644-1651. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.08.102>.

PIVOKONSKY, M., PIVOKONSKA, L., NOVOTNA, K., CERMAKOVA, L., KLIMTOVA, M. Occurrence and fate of microplastics at two different drinking water treatment plants within a river catchment. **Sci Total Environ** 741:140236. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140236>

POMPÊO, M., RANI-BORGES, B., DE PAIVA, T. C. B. Microplásticos nos ecossistemas: impactos e soluções. São Paulo. **Instituto de Biociências**, Universidade de São Paulo, 2022. ISBN: 978-65-88234-11-2.

RAGUSA, A., NOTARSTEFANO, V., SVELATO, A., BELLONI, A., GIOACCHINI, G., BLONDEEL, C., ZUCCHELLI, E., DE LUCA, C., D'AVINO, S. GULOTTA, A., et al. Raman Microspectroscopy Detection and Characterisation of Microplastics in Human Breastmilk. **Polymers** 2022, 14, 2700. <https://doi.org/10.3390/polym14132700>.

RAMIREZ ARENAS, L. M.; RAMSEIER GENTILE, S.; ZIMMERMANN, S.; STOLL, S. *Fate and removal efficiency of polystyrene nanoplastics in a pilot drinking water treatment plant*. **Science of the Total Environment**, v. 813, p. 152623, 2022. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.152623.

RIBEIRO, J. V. M.; ANDRADE, P. V.; DOS REIS, A. G. Moringa Oleifera Seed as a Natural Coagulant to Treat Low-Turbidity Water by in-Line Filtration. **Revista Ambiente e Água**. 2019, 14 (6), No. e2442

RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo: Blucher, 2009. 624p. ISBN: 978-85-212-0498-5.

ROMPHOPHAK, P., FAIKHAW, O., SAIRIAM, S., THUPTIMDANG, P., COUFORT-SAUDEJAUD, C. Removal of microplastics and nanoplastics in water treatment processes: A systematic literature review. **Journal of Water Process Engineering**. Volume 64. 2024. 105669, ISSN 2214-7144. <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2024.105669>.

SARKAR, D. J., SARKAR, S. D., DAS, B. K., PRAHARAJ, J. K., MAHAJAN, D. K., PUROKAIT, B., MOHANTY, T. R., MOHANTY, D., GOGOI, P., V, S. K., BEHERA, B. K., MANNA, R. K., SAMANTA, S. Microplastics removal efficiency of drinking water treatment plant with pulse clarifier, **Journal of Hazardous Materials**, Volume 413, 2021, 125347, ISSN 0304-3894, <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2021.125347>.

SHEN, M., SONG, B., ZHU, Y., ZENG, G., ZHANG, Y., YANG, Y., WEN, X., CHEN, M., YI, H. Removal of microplastics via drinking water treatment: Current knowledge and future directions. **Chemosphere**. Volume 251. 2020. 126612. ISSN 0045 6535. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126612>.

SILVEIRA, T. N.; PEQUENO, L. A. B.; BARBOSA, M. G. N.; SANTOS, W. B.; FERREIRA, W. B. Avaliação da eficiência de coagulantes inorgânicos em estações de tratamento de água subdimensionadas. In: **Anais do CONAPESC – Congresso de Pesquisa, Ensino e Extensão**, 2019. Disponível em: https://editorarealize.com.br/editora/anais/conapesc/2019/TRABALHO_EV126_MD1_SA6_ID2617_30072019101220.pdf

SKAF, D. W., PUNZI, V. L., ROLLE, J. T., KLEINBERG, K. A. Removal of micron-sized microplastic particles from simulated drinking water via alum coagulation. **Chemical Engineering Journal**. Volume 386. 2020. 123807. ISSN 1385-8947. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.123807>.

SOARES, E. A. F. A história do plástico. **UP – Universo Plástico**. Polímeros. Disponível em: <https://uniplastico.wordpress.com/2020/05/17/a-historia-doplastico/>.

THOMPSON, R., OLSEN, Y. MITCHELL, R. DAVIS, A. ROWLAND, S. JOHN, A. MCGONIGLE, D. F., RUSSELL, A. 2004. Lost at Sea: Where Is All the Plastic?. **Science** (New York, N.Y.). 304. 838. <https://doi.org/10.1126/science.1094559>.

TONG, H., ZHONG, X., DUAN, Z., YI, X., CHENG, F., XU, W., YANG, X. Micro- and nanoplastics released from biodegradable and conventional plastics during degradation: Formation, aging factors, and toxicity. **Science of The Total Environment**. Volume 833. 2022. 155275. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.155275>.

VEGA, A. P., PALANCA, C. F., DE OLIVEIRA, M. A. C., ITO, C. Y. K., DOS REIS, A. G. Use of Moringa oleifera seed as a natural coagulant in domestic wastewater

tertiary treatment: Physicochemical, cytotoxicity and bacterial load evaluation. **Journal of Water Process Engineering**, [s. l.], vol. 40, p. 101859, 1 Apr. 2021. DOI 10.1016/J.JWPE.2020.101859.

WANG, K., WANG, K., LIANG, S., GUO, C., WANG, W., WANG, J. Accelerated aging of polyvinyl chloride microplastics by UV irradiation: Aging characteristics, filtrate analysis, and adsorption behavior. **Environ Technol Inno** 32:103405. 2023. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2023.103405>.

WANG, Q., WANGJIN, X., ZHANG, Y. et al. The toxicity of virgin and UV-aged PVC microplastics on the growth of freshwater algae *Chlamydomonas reinhardtii*. **Sci Total Environ** 749:141603. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141603>

WANG, Y., OKOCHI, H., TANI, Y., HAYAMI, H., MINAMI, Y., KATSUMI, N., TAKEUCHI, M., SORIMACHI, A., FUJII, Y., KAJINO, M., ADACHI, K., ISHIHARA, Y., IWAMOTO, Y., NIIDA, Y. Airborne hydrophilic microplastics in cloud water at high altitudes and their role in cloud formation. **Environmental Chemistry Letters**. 2023. 21:3055–3062. <https://doi.org/10.1007/s10311-023-01626-x>.

WEISHAAR, J. L., AIKEN, G. R., BERGAMASCHI, B. A., FRAM, M. S., FUJII, R., MOPPER, K. Evaluation of Specific Ultraviolet Absorbance as an Indicator of the Chemical Composition and Reactivity of Dissolved Organic Carbon. **Environmental Science and Technology**, [s. l.], vol. 37, no. 20, p. 4702–4708, 15 Oct. 2003. DOI 10.1021/ES030360X. Available at: [/doi/pdf/10.1021/es030360x?ref=article_openPDF](https://doi.org/10.1021/es030360x?ref=article_openPDF).

XUE, J., PELDSZUS, S., VAN DYKE, M. I., HUCK, P. M. Removal of polystyrene microplastic spheres by alum-based coagulation-flocculation-sedimentation (CFS) treatment of surface waters, **Chemical Engineering Journal**, Volume 422, 2021, 130023, ISSN 1385-8947, <https://doi.org/10.1016/j.cej.2021.130023>.

YANG, Y., XIE, E., DU, Z., PENG, Z., HAN, Z., LI, L., ZHAO, R., QIN, Y., XUE, M., LI, F., HUA, K., YANG, X. Detection of Various Microplastics in Patients Undergoing Cardiac Surgery. **Environmental Science & Technology**. 2023. 57 (30), 10911-10918. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c07179>.

YUAN, F., YUE, L., ZHAO, H., WU, H. Study on the adsorption of polystyrene microplastics by three-dimensional reduced graphene oxide. **Water Sci. Technol.** 81, 2163–2175. 2020. <https://doi.org/10.2166/wst.2020.269>.

YUKSEL, E., EYVAZ, M., AKTAS, T.S., SAATCI, A.M. A New Polyelectrolyte Dosing Method: Injection into Deep Bed Filter Media. **Clean Soil Air Water**, 39: 750-758. 2011. <https://doi.org/10.1002/clen.201000277>

Zhao, Y., Wan, S., Xu, M., Wu, G., Wang, D., Yi, C., Cui, L. Effect of aging on the properties of microplastics and their adsorption behavior of norfloxacin, **Journal of Water Process Engineering**, Volume 70, 2025, 107021, ISSN 2214-7144, <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2025.107021>.

ZHANG, Y., DIEHL, A., LEWANDOWSKI, A., GOPALAKRISHNAN, K., BAKER, T. Removal efficiency of micro- and nanoplastics (180 nm–125 µm) during drinking water treatment, **Sci. Total Environ.** 720, 137383. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.137383>

ZHOU, G., WANG, Q., LI, J., LI, Q., XU, H., YE, Q., WANG, Y., SHU, S., ZHANG, J. Removal of polystyrene and polyethylene microplastics using PAC and FeCl₃ coagulation: Performance and mechanism. **Science of The Total Environment.** Volume 752. 2021. 141837. ISSN 0048-9697. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.141837>.