

**UNIVERSIDADE TECNOLÓGICA FEDERAL DO PARANÁ
DEPARTAMENTO ACADÊMICO DE QUÍMICA E BIOLOGIA
BACHARELADO EM QUÍMICA**

DIOGO EIJI MIYAMOTO

**REMOÇÃO DE *Microcystis aeruginosa* EM ÁGUA DE MANANCIAL DE
ABASTECIMENTO COM A APLICAÇÃO DE COAGULANTES QUÍMICO E
NATURAL**

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

CURITIBA

2021

DIOGO EIJI MIYAMOTO

**REMOÇÃO DE *Microcystis aeruginosa* EM ÁGUA DE MANANCIAL DE
ABASTECIMENTO COM A APLICAÇÃO DE COAGULANTES QUÍMICO E
NATURAL**

**Removal of *Microcystis aeruginosa* in water from a supply source with
application of chemical and natural coagulants**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito à obtenção do título de
Bacharel em Química, do Departamento
Acadêmico de Química e Biologia da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Orientadora: Prof.^a Dr.^a Lucila Adriani de Almeida
Coral

CURITIBA

2021



[4.0 Internacional](https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/)

Esta licença permite remixe, adaptação e criação a partir do trabalho, para fins não comerciais, desde que sejam atribuídos créditos ao(s) autor(es) e que licenciem as novas criações sob termos idênticos.

Conteúdos elaborados por terceiros, citados e referenciados nesta obra não são cobertos pela licença.

DIOGO EIJI MIYAMOTO

**REMOÇÃO DE *Microcystis aeruginosa* EM ÁGUA DE MANANCIAL DE
ABASTECIMENTO COM A APLICAÇÃO DE COAGULANTES QUÍMICO E
NATURAL**

Trabalho de Conclusão de Curso de Graduação
apresentado como requisito à obtenção do título de
Bacharel em Química, do Departamento
Acadêmico de Química e Biologia da Universidade
Tecnológica Federal do Paraná (UTFPR).

Data de aprovação: 26 de agosto de 2021.

Lucila Adriani de Almeida Coral (Orientadora)
Doutorado em Engenharia Ambiental
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Fatima de Jesus Bassetti
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Roberta Carolina Pelissari Rizzo Domingues
Doutorado em Engenharia Química
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

CURITIBA

2021

Dedico este trabalho, aos meus pais, com todo o carinho e afeto que tiveram ao longo de todos esses anos por mim, como a materialização de mais uma etapa tão importante em minha história.

AGRADECIMENTOS

Foram anos de muitas batalhas, superações, choros e sorrisos, mas acima de tudo, principalmente, de muito aprendizado e amadurecimento pessoal que certamente terá um peso muito influenciador, como já vem tendo, em minha vida daqui em diante. Como dito no trecho da epígrafe, estamos em constante aprendizado e com humildade, isso deve percorrer por toda nossa história.

Mais uma etapa aqui se conclui e novos desafios virão, para isso, gostaria de, não apenas agradecer, mas também de pedir pelas contínuas orientações. À Deus pela saúde e a oportunidade de estar sendo dia a dia vivificado; à minha família por todo apoio e carinho, em especial aos meus pais, que sempre foram meu suporte para todos os momentos; aos amigos que estiveram ao meu lado me fazendo companhia e dando apoio sempre que possível; e à minha orientadora Lucila, que sempre muito atenciosa e paciente contribuiu tanto nos meus trabalhos, quanto em tantos outros momentos tão decisivos e importantes ao longo da graduação.

Fica aqui também a minha gratidão à banca avaliadora deste trabalho, que dispuseram de seus preciosos tempos, para a contribuição na concretização desta minha etapa tão importante. Assim também como à toda estrutura disponibilizada pela Universidade Tecnológica Federal do Paraná - Curitiba; e o meu total respeito a todos os demais servidores desta universidade, incluindo professores, direção, limpeza, segurança, restaurante, biblioteca, recepção, e departamentos, pelo zelo com a instituição e empenho por uma universidade de cada vez mais qualidade.

“Sou uma gota d'água
Sou um grão de areia
Você me diz que seus pais não te entendem
Mas você não entende seus pais
Você culpa seus pais por tudo
Isso é um absurdo
São crianças como você
O que você vai ser
Quando você crescer.”
Legião Urbana.

RESUMO

MIYAMOTO, Diogo Eiji. **Remoção de *Microcystis aeruginosa* em água de manancial de abastecimento com a aplicação de coagulantes químico e natural.** 2021. 61 f. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

O excesso de nutrientes em corpos d'água, principalmente nitrogênio e fósforo, é um fator extremamente importante para o aumento da densidade de algas e cianobactérias em um corpo d'água. A presença desses organismos tende a causar uma redução da eficácia do tratamento de água, sendo necessário, entre outros aspectos, a adoção de uma maior dosagem de coagulante, sendo estes, normalmente, coagulantes químicos. Esta pesquisa consistiu na avaliação do desempenho do coagulante químico policloreto de alumínio (PAC) e de um coagulante natural derivado de tanino (TANFLOC SG), na remoção de células de cianobactérias da espécie *Microcystis aeruginosa*, em águas naturais, quando utilizados isoladamente e em associação. Para isso, amostras contendo uma densidade celular aproximada de $5,0 \times 10^5$ céls/mL foram submetidas ao tratamento empregando-se a flotação por ar dissolvido (FAD) como processo de clarificação seguida de filtração. Para o processo de coagulação/floculação, aplicou-se os coagulantes químico e natural separadamente, cada qual em sua dosagem ótima determinada previamente (PAC, 16 mg/L e Tanfloc, 8 mg/l). Em seguida, foram realizados ensaios utilizando-se os coagulantes associados, nas proporções de 25%, 50% e 75% (Tanfloc:PAC = 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 e 0:100). Como resultados, obteve-se, para a aplicação isolada dos coagulantes, remoções bastante similares, na ordem de 87% para turbidez e 94% para densidade celular, tanto para o PAC (16 mg/L) quanto para o Tanfloc (8 mg/L), se distanciando levemente apenas nas remoções em cor, aproximadamente 91% com PAC (16 mg/L) e 84% com Tanfloc (8 mg/L). Quanto à associação dos coagulantes, identificou-se uma ligeira melhora em relação aos tratamentos com a aplicação isolada do PAC e do Tanfloc, sendo a melhor eficiência obtida na maior proporção do Tanfloc (75%, em 25% de PAC), apresentando remoções de aproximadamente 92% de turbidez, 89% de cor e 97% em relação à densidade celular. Desta forma, a utilização da FAD mostrou-se bastante eficiente no tratamento das amostras contendo células de *M. aeruginosa*, assim como a etapa complementar de filtração que se fez primordial ao final do tratamento, chegando em alguns casos a contribuir com um aumento de 10% no nível de remoção dos parâmetros de qualidade avaliados. Conclui-se desta forma, em função da eficiência de tratamento, a opção por ser utilizar o coagulante natural estudado como substituto parcial ou total ao coagulante químico, no tratamento de água contendo células de *M. aeruginosa* pelos processos de coagulação/floculação/FAD/filtração.

Palavras-chave: Flotação por Ar Dissolvido. Cianobactéria. *Microcystis aeruginosa*. Policloreto de Alumínio. Tanfloc.

ABSTRACT

MIYAMOTO, Diogo Eiji. **Removal of *Microcystis aeruginosa* in water supply with the application of chemical and natural coagulants**. 2021. 61 p. Trabalho de Conclusão de Curso. Bacharelado em Química. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2021.

The excess of nutrients in water bodies, mainly nitrogen and phosphorus, is an extremely important factor for increasing the density of algae and cyanobacteria in a water body. The presence of these organisms tends to reduce the efficiency of water treatment, requiring, among other things, the adoption of a higher dosage of coagulant, which are normally chemical coagulants. This research consisted of evaluating the performance of the polyaluminum chloride (PAC) chemical coagulant and a tannin-derived natural coagulant (TANFLOC SG), in the removal of cyanobacterial cells of the species *Microcystis aeruginosa*, in natural waters, when used alone and in an association. For this, samples with an approximate cell density of $5,0 \times 10^5$ cells/mL were subjected to treatment using dissolved air flotation (DAF) as a clarification process followed by filtration. For the coagulation/flocculation process, chemical and natural coagulants were applied separately, each at its optimal dosage previously determined (PAC, 16 mg/L and Tanfloc SG, 8 mg/L). Then, tests were carried out using the associated coagulants, in proportions of 25%, 50% and 75% (Tanfloc:PAC = 100:0, 75:25, 50:50, 25:75 and 0:100). As a result, for the isolated application of coagulants, very similar removals were obtained, in the order of 87% for turbidity and 94% for cell density, both for PAC (16 mg/L) and for Tanfloc SG (8 mg/L), distancing slightly only in color removals, approximately 91% with PAC (16 mg/L) and 84% with Tanfloc (8 mg/L). As for the association of coagulants, a slight improvement was identified in relation to treatments with the isolated application of PAC and Tanfloc, with the best efficiency being obtained in the highest proportion of Tanfloc (75%, in 25% of PAC), with the removal of approximately 92% turbidity, 89% color and 97% relative to cell density. Thus, the use of DAF proved to be quite efficient in the treatment of samples containing *M. aeruginosa* cells, as well as the complementary filtration step, which was essential at the end of the treatment, in some cases contributing to an increase of 10 % in the removal level of the evaluated quality parameters. Therefore, depending on the efficiency of the treatment, the option is to use the natural coagulant studied as a partial or total substitute for the chemical coagulant, in the treatment of water containing *M. aeruginosa* cells by the processes of coagulation/flocculation/DAF/filtration.

Keywords: Dissolved Air Flotation. Cyanobacteria. *Microcystis aeruginosa*. Polyaluminum chloride. Tanfloc.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Imagem representativa da <i>Microcystis aeruginosa</i> (Moza Maria Lasmina, 04/2014).....	17
Figura 2 - Estrutura química do tanino modificado, que compõe o coagulante Tanfloc (Tanac). Tanino extraído da Acácia Negra.....	25
Figura 3 - Esquema genérico de um sistema de flotação	26
Figura 4 - Sala de cultivo de cianobactérias (LTPA)	31
Figura 5 - Localização do ponto de coleta no manancial Passaúna, com indicação da UTFPR Curitiba - Sede Ecoville	32
Figura 6 - Imagem representativa do jarro de Jarrest preenchido com a amostra a ser tratada	34
Figura 7 - Representação das etapas da metodologia.....	35
Figura 8 – Imagem representativa do equipamento completo utilizado nos ensaios para as operações de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido	36
Figura 9 - Gráfico da curva de calibração para a determinação das dosagens ideais dos coagulantes PAC e Tanfloc SG	39
Figura 10 - Gráfico representando a variação em pH, comparando-se as amostras iniciais, pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração	40
Figura 11 - Gráfico da variação em pH, numa escala de 0 à 14	41
Figura 12 - Gráfico comparativo em valores de turbidez residual, no pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração	43
Figura 13 - Gráfico comparativo em valores de cor residual, no pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração.....	44
Figura 14 - Gráfico comparativo em valores de densidade celular residual, no pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração	45
Figura 15 - Gráfico comparativo de densidade celular residual entre os coagulantes, no pós-tratamento e pós filtração	46

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Determinação das dosagens de coagulantes em função da turbidez da água do Passaúna	38
Tabela 2A - Relação dos valores de medição da Água do Passaúna, Água do Passaúna contendo células de <i>M. aeruginosa</i> , e média dos resultados referentes às triplicatas	61

LISTA DE QUADROS

Quadro 1 - Relação das cianotoxinas, sua classe química, organismos produtores, mecanismo de ação, toxicidade e sintomatologia da exposição aguda	19
Quadro 2 - Parâmetros, métodos de análise e equipamentos utilizados para a análise de amostras.....	37

LISTA DE SIGLAS E ABREVIATURAS

μm	Micrômetro
cm	Centímetro
cels/mL	Células por mililitro
C/F/FAD	Coagulação/floculação/flotação por ar dissolvido
ETA	Estação de tratamento de água
FAD	Flotação por ar dissolvido
G_{ml}	Gradiente de mistura lenta
G_{mr}	Gradiente de mistura rápida
kg	Quilograma
kgf	Quilograma força
mg/L	Miligrama por litro
PAC	Policloreto de alumínio
pH	Potencial hidrogeniônico
mm	Milímetro
T_{ml}	Tempo de mistura lenta
T_{mr}	Potencial hidrogeniônico
uH	Unidade Hazen
uT	Unidades de turbidez
UV	Ultravioleta

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	13
2 OBJETIVOS	15
2.1 OBJETIVO GERAL	15
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	15
3 REFERENCIAL TEÓRICO	16
3.1 CIANOBACTÉRIAS	16
<u>3.1.1</u> Cianotoxinas.....	17
3.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA.....	20
<u>3.2.1</u> Coagulação e Floculação	20
3.3 FLOTAÇÃO.....	26
<u>3.3.1</u> Flotação por Ar Dissolvido (FAD).....	27
3.4 FILTRAÇÃO, DESINFECÇÃO E FLUORETAÇÃO	28
4 METODOLOGIA.....	30
4.1 CULTIVO DAS CIANOBACTÉRIAS.....	30
4.2 COLETA E PREPARO DA ÁGUA DE ESTUDO	31
4.3 COAGULANTES	33
4.4 ENSAIOS	33
4.5 FILTRAÇÃO.....	36
4.6 ANÁLISES DAS AMOSTRAS	37
5 RESULTADOS E DISCUSSÕES	38
5.1 DETERMINAÇÃO DAS DOSAGENS DOS COAGULANTES	38
5.2 TRATAMENTO DA ÁGUA CONTENDO <i>Microcystis aeruginosa</i>	40
6 CONCLUSÕES	50
7 SUGESTÕES	51
APÊNDICE A.....	61

1 INTRODUÇÃO

Dentre alguns danos causados ao meio ambiente por influência antrópica, está o fenômeno da eutrofização, representando um dos mais graves problemas quanto à conservação de reservas hídricas. Este, é caracterizado pelo desenvolvimento de um ecossistema que tende a se tornar cada vez mais produtivo devido ao enriquecimento do meio por nutrientes, principalmente o fósforo e o nitrogênio. São diversas as fontes destes nutrientes, provindo não apenas de resíduos urbanos e industriais, como também da drenagem de insumos aplicados na agricultura (COSTA *et al.*, 2018).

Como consequência, os produtores primários são estimulados, gerando-se o crescimento excessivo dos organismos, como macrófitas, algas planctônicas e cianobactérias. Dentre os impactos gerados pela eutrofização, os principais são: diminuição do oxigênio dissolvido; mortandade da biota aquática; decréscimo na diversidade da comunidade fitoplanctônica; e a contaminação dos corpos hídricos por toxinas produzidas por algumas espécies de cianobactérias (WIEGAND *et al.*, 2016), dentre elas, as dos gêneros *Microcystis*, *Plankthotrix* (*Oscillatoria*), *Anabaena* e *Nostoc* (GUERRA *et al.*, 2015).

As cianotoxinas são consideradas metabólitos secundários das cianobactérias. Sua função ainda é objeto de estudo, porém, levam-se a hipóteses de que esses compostos podem atuar como mecanismo de defesa; auxiliar na melhor captação de luz; ou até mesmo como moléculas de sinalização, colaborando na comunicação entre as células (BORTOLI; PINTO, 2015).

Embora o controle no despejo irregular de nutrientes reduza o enriquecimento dos ecossistemas aquáticos (BORTOLI; PINTO, 2015), este não é o suficiente para a reversão do fenômeno da eutrofização, já que os sedimentos presentes no ambiente podem possuir acúmulo de fósforo, levando ao fornecimento gradativo do nutriente para a coluna d'água ao longo do tempo, conforme as condições de oxigenação e pH da água, por exemplo (SØNDERGAARD *et al.*, 2013; TU *et al.*, 2019).

Assim, faz-se necessária a remoção desses microrganismos no meio, em especial para mananciais de abastecimento. O procedimento usual adotado pelas estações de tratamento de água (ETA's) no Brasil é feito via ciclo completo (coagulação, floculação, sedimentação/flotação e filtração rápida). Uma vez que a

coagulação é a primeira operação unitária realizada no tratamento, o processo e os coagulantes aplicados recebem constante atenção e estudos (SENEDA *et al.*, 2021).

Devido a boa eficiência, coagulantes à base de sais de alumínio são amplamente utilizados. Porém, quando se faz seu uso, é necessário o controle do residual de alumínio, já que residuais do metal podem permanecer na água pós-tratada, algo preocupante, uma vez que o acúmulo de alumínio no organismo pode levar a doenças neurodegenerativas, como a Doença de Alzheimer (FERREIRA *et al.*, 2008). Além disso, o metal não é biodegradável, ocasionando problemas na disposição e tratamento do lodo gerado (BONGIOVANI *et al.*, 2015).

Desta forma, surge a demanda por coagulantes alternativos, preferencialmente de origem natural. Os coagulantes orgânicos são uma alternativa para o tratamento de água, apresentam disponibilidade de insumos em abundância, baixo custo, atoxicidade, e também um comportamento multifuncional (aplicação em águas residuárias, de abastecimento, entre outros) (VALVERDE *et al.*, 2018).

Após as etapas de coagulação/floculação, num sistema convencional de tratamento de águas de abastecimento, realiza-se a sedimentação das partículas. Em alternativa a essa etapa, há o processo de flotação por ar dissolvido (FAD), que apresenta como vantagem uma grande abrangência e alta eficiência no tratamento de águas (LOPES *et al.*, 2020), dentre elas a eficiência também quanto a remoção de células intactas de cianobactérias (AMARAL, 2011).

Assim, este trabalho buscou, a partir de simulações e replicação laboratorial, avaliar a remoção de células da cianobactéria *Microcystis aeruginosa* presentes na água, tal qual em estações de tratamento de água (ETA) abastecida por manancial, utilizando-se dos métodos de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido (FAD) como método de clarificação, comparando-se o efeito do tratamento nas diferentes aplicações dos coagulantes químico (policloreto de alumínio) e natural (Tanfloc SG).

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar a remoção de *Microcystis aeruginosa* em água natural a partir de tratamento constituído pelas etapas de coagulação, floculação, flotação por ar dissolvido e filtração aplicando-se como coagulantes o policloreto de alumínio (PAC) e o Tanfloc.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- A partir de parâmetros operacionais pré-definidos, determinar as melhores dosagens individuais dos coagulantes metálico e orgânico para a espécie presente na água;
- Avaliar o desempenho dos coagulantes químico e natural quando associados, verificando-se a viabilidade da utilização do coagulante natural de modo a substituir parcialmente, ou mesmo totalmente, o coagulante químico.

3 REFERENCIAL TEÓRICO

Vale salientar sobre a escassez de trabalhos com similaridade a este. Embora haja diversos estudos realizados, por diversos autores que trabalhem com diferentes tipos de coagulantes, sejam metálicos ou naturais; que utilizem a FAD como processo de remoção; assim como a adoção de diversas espécies de cianobactérias; raros foram os trabalhos encontrados que tenham associado todos os elementos neste adotados. Dessa forma, muitas das referências tiveram de ser adaptadas a este trabalho para que houvesse a possibilidade de uma discussão comparativa, tanto com parâmetros aplicados, como também em resultados obtidos ao longo dos ensaios.

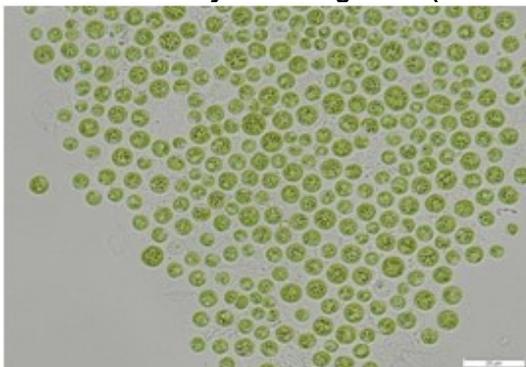
3.1 CIANOBACTÉRIAS

O abastecimento de água para o consumo humano é proveniente de mananciais superficiais na maioria das regiões do planeta, sendo tais fontes passíveis de contaminação por diversos agentes. Dentre eles estão as cianobactérias, que são encontrados em grande parte das águas de superfície e potencialmente produtoras de metabólitos secundários, composto pelas toxinas e os espécimes que atribuem sabor e odor, MIB e geosmina (OLIVEIRA *et al.*, 2021).

As cianobactérias são microrganismos procariontes (unicelulares), aeróbios (necessitam de oxigênio para a respiração) e fotoautotróficos (capazes de produzir o próprio alimento a partir da luz). Ao estarem presentes num meio hídrico rico em nutrientes, principalmente nitrogenados e fosforados, comumente produtos de ação antrópica, sua taxa de crescimento é acelerada, levando à ocorrência de florações (*blooms*) (AZEVEDO; BRANDÃO, 2003), o que resulta em graves problemas ambientais, com conseqüente desregulação do ecossistema.

No Brasil, várias cianobactérias já foram relatadas como potenciais produtoras de toxinas, como as espécies dos gêneros *Microcystis*, *Raphidiopsis* (previamente conhecida como *Cylindrospermopsis*), *Dolichospermum* (previamente conhecida como *Anabaena*), *Planktothrix*, *Aphanizomenon*, entre outras (CARVALHO *et al.*, 2013). Justifica-se assim, pela popularidade, o uso da *Microcystis aeruginosa* como objeto de estudo deste trabalho (Figura 1).

Figura 1 - Imagem ilustrativa da *Microcystis aeruginosa* (Moza Maria Lasmina, 04/2014)



Fonte: Adaptado de: Fish and Wildlife Research Institute (07/06/2011)

O gênero *Microcystis* é um dos gêneros de cianobactérias mais comuns, sendo a *Microcystis aeruginosa* com o maior número de ocorrências nos mananciais de abastecimento pelo mundo e a primeira espécie produtora de toxina a ser isolada, cultivada e estudada em laboratório (CARMICHAEL, 1996). Apresenta células unicelulares esféricas; aglomeradas irregularmente numa mucilagem comum, onde, a partir da formação de volumosas colônias oferecem proteção contra a predação, diminuindo significativamente as taxas de herbivoria; não estratificada; e apresenta coloração esverdeada com variações dependentes das concentrações de clorofila-a e ficocianinas produzidas (KOMARÉK; KOMÁRKOVÁ, 2002; FALCONER, 2005). Sua popularidade também se relaciona à sua adaptabilidade ao ambiente, já que possuem a característica de gerarem vacúolos gasosos em seu interior, permitindo às células o controle da profundidade na coluna d'água na busca por um melhor posicionamento na captação de luz e nutrientes (CALIJURI *et al.*, 2006).

3.1.1 Cianotoxinas

Dentre os produtos do metabolismo secundário das cianobactérias encontram-se as cianotoxinas. Embora não sejam fundamentais para o metabolismo básico destes organismos (como crescimento e reprodução), são essenciais para o seu desenvolvimento. Podem ser classificadas de acordo com seu mecanismo de ação como (Quadro 1): (i) hepatotóxicas, representada pelas microcistinas e nodularinas; (ii) neurotóxicas, representadas pela anatoxina-a, homoanatoxina-a, anatoxina-a(s) e saxitoxinas; (iii) citotóxica, representada pela cilindrospermopsina; e

(iv) dermatotóxicas (CHORUS; BARTRAM, 1998; VAN APELDOORN *et al.*, 2007), entre outras, como a aplysiatoxina, debromoaplysiatoxina e a lyngbiatoxina-a¹. As toxinas encontram-se principalmente intracelulares (TEIXEIRA; ROSA, 2006a), sendo então liberadas ao meio externo quando do rompimento (lise) da parede celular do microrganismo, quando sob certas condições de estresse² (CARVALHO *et al.*, 2013). Sendo assim, quando se faz o tratamento destes meios contaminados, a remoção das células de cianobactérias intactas deve ser priorizada, levando-se em consideração a redução significativa destas concentrações de toxinas, e precursores de sabor e odor na água tratada (GUERRA *et al.*, 2015).

O contato humano que leve à possíveis intoxicações por cianotoxinas são maiores quanto maior a proliferação e lise das células. Esta exposição pode ocorrer por: ingestão da água contaminada; uso recreativo das reservas hídricas, principalmente quando há a floração, com o contato da pele e/ou também na ingestão não intencional da água; inalação de partículas em aerossol, quando em duchas e na prática de esportes aquáticos, por exemplo; consumo de alimentos expostos à uma floração de cianobactérias, sejam peixes, frutos do mar ou semelhante; e por hemodiálise, a partir de uma água indevidamente tratada (CHORUS; BARTRAM, 1998).

¹ § 9º Quando detectada a presença de cianotoxinas na água tratada, na saída do tratamento, será obrigatória a comunicação imediata à autoridade de saúde pública, às clínicas de hemodiálise e às indústrias de injetáveis. (Origem: PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021; Art. 43; § 9º).

² § 7º Em função dos riscos à saúde associados às cianotoxinas, é vedado o uso de algicidas para o controle do crescimento de microalgas e cianobactérias no manancial de abastecimento ou qualquer intervenção que provoque a lise das células. (Origem: PORTARIA GM/MS Nº 888, DE 4 DE MAIO DE 2021; Art. 43; § 7º)

Quadro 1 - Relação das cianotoxinas, sua classe química, organismos produtores, mecanismo de ação, toxicidade e sintomatologia da exposição aguda

Toxina	Organismos Produtores (gêneros)	Mecanismo de ação	DL50*	Sintomatologia a exposição aguda
Microcistinas	<i>Microcystis</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Planktothrix</i> , <i>Nortoc</i> , <i>Hapalosiphon</i> , <i>Synechocystis</i> , <i>Aphanocapsa</i> , <i>Oscillatoria</i>	Inibição das proteínas fosfatases 1 e 2A	50 - > 1200 µg/kg i.p. ratos	Prostração, pilo ereção, anorexia, vômitos, dor abdominal, diarreia, choque hipovolêmico e hemorragia intra-hepática.
Nodularinas	<i>Nodularia</i>	Inibição das proteínas fosfatases 1 e 2A	30 - 50 µg/kg i.p. ratos	Prostração, pilo ereção, anorexia, vômitos, dor abdominal, diarreia, choque hipovolêmico e hemorragia intra-hepática.
Saxitoxinas (PSPs)	<i>Aphanizomenon</i> , <i>Anabaena</i> , <i>Lyngbya</i> , <i>Cylindrospermopsis</i> e também algumas espécies de dinoflagelados	Bloqueio dos canais de sódio	10 µg/kg i.p. ratos	Paralisia progressiva dos músculos, diminuição dos movimentos, exagerada respiração abdominal, cianose, convulsão, parada respiratória e morte.
Anatoxina-a	<i>Anabaena</i> , <i>Oscillatoria</i> , <i>Cylindrospermum</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Microcystis</i>	Agonista nicotínico irreversível	200 - 250 µg/kg i.p. ratos	Paralisia progressiva, forte respiração abdominal, cianose, convulsão, morte por asfixia.
Anatoxina-a (S)	<i>Anabena</i>	Inibição da acetilcolinesterase	20 µg/kg i.p. ratos	Paralisia progressiva, fraqueza muscular, diminuição da frequência respiratória e convulsões. Salivação intensa. Morte ocorre por falência respiratória.
Cilindrospermopsina	<i>Cylindrospermopsis raciborskii</i> , <i>Umezakia</i> , <i>Aphanizomenon</i> , <i>Raphidiopsis</i> , <i>Anabaena</i>	Inibição da síntese proteica	2100 µg/kg i.p. ratos em 24h; e 200 µg/kg i.p. ratos em 72h	Desestruturação e necrose do fígado, danos em células renais, cardíacas, pulmonares e também da mucosa gástrica.
Dermatotoxinas	Cianobactérias em geral	Induz inflamação e também resposta imune do tipo IgE	-	Dermatites em geral e prurido. Irritação nos olhos, pele, febre, tontura, fadiga e gastroenterite.
Lyngbyatoxina	<i>Lyngbya majuscula</i>	Efeitos gastrointestinais	250 µg/kg i.p. ratos	Aumento da secreção gástrica, promove a inflamação, edema pulmonar, irritação gastrointestinal e promoção de tumor dérmico.
Aplysiatoxina	<i>Stylocheilus longicauda</i> , <i>Lyngbya majuscula</i>	Potentes promotores de tumor e ativa a proteína quinase C	-	Irritação gastrointestinal.
Debromoaplysiatoxina	<i>Schizotrix calcicola</i> , <i>Oscillatoria nigroviridis</i>	Potentes promotores de tumor e ativa a proteína quinase C	-	Irritação gastrointestinal.

*DL₅₀: valor da dose de toxina letal a 50% dos animais expostos. Representada por µg de toxina/kg de peso corpóreo. (i.p. – via de administração intraperitoneal).

Fonte: Adaptado de Bortoli e Pinto (2015)

3.2 TRATAMENTO CONVENCIONAL DE ÁGUA

Para um sistema convencional de tratamento de água, são consideradas três fases, a clarificação, seguida da filtração e então, por fim, a desinfecção. Em seu início, a água passa pelas etapas de coagulação, floculação e decantação, visando à remoção e/ou redução dos sólidos suspensos e dissolvidos. A etapa de filtração faz assim a remoção das demais partículas sólidas restantes. Por fim, a desinfecção consistirá na eliminação dos microrganismos remanescentes das etapas anteriores, com a aplicação de agentes desinfetantes (LIBÂNIO, 2010).

3.2.1 Coagulação e Floculação

A primeira etapa do tratamento é a coagulação, em que um coagulante, geralmente um sal inorgânico metálico, é adicionado à água. Após a adição faz-se uma mistura rápida para a sua homogeneização com o meio, dando início à desestabilização dos coloides (partículas suspensas no meio, que possuem superfície carregada negativamente), pela reação de hidrólise, e pela adsorção dessas espécies hidrolisadas à superfície das partículas coloidais (BARTIKO; DE JULIO, 2015).

Após a coagulação, tem-se a etapa de floculação, que consiste na aglutinação das partículas coaguladas ou desestabilizadas, para assim gerar maiores massas ou flocos, possibilitando sua posterior separação da água. Trata-se do processo mais utilizado para a remoção de substâncias que produzem cor e turbidez na água. Este processo de agregação é dependente da duração e da quantidade de energia aplicada (gradiente de velocidade). A energia aplicada para a floculação pode ser empregada, como na mistura rápida, por meios hidráulicos, mecânicos e/ou pneumáticos, diferenciando-se pela intensidade, que na floculação é menor, uma vez que a agitação deve propiciar a agregação das partículas em flocos e o seu não rompimento após esta formação (RICHTER, 2009).

O processo tem como influência o pH da água bruta e das espécies iônicas presentes na solução, a concentração e o tipo dos coloides, o tipo e dose de coagulante aplicado, e quanto ao mecanismo, o gradiente de velocidade e o tempo de agitação. A partir das condições adotadas, este processo pode ser classificado em

quatro principais mecanismos: a varredura; a compressão da dupla camada elétrica; a adsorção e neutralização de cargas; e a adsorção e formação de pontes.

Nas estações de tratamento de água (ETAs), o mecanismo de varredura é priorizado, em que, embora haja maior adição de coagulante ao meio, há uma maior formação de precipitados com relação aos demais mecanismos, o que leva à uma maior velocidade de sedimentação (DI BERNARDO; DANTAS, 2005; LIBÂNIO, 2010).

Como definição, Santiago (2008) descreve sobre tais aplicações:

- Varredura: ao se utilizar uma elevada dose do coagulante, o limite de solubilidade dos hidróxidos metálicos é ultrapassado, resultando na formação de um precipitado, que envolve as partículas em suspensão e leva à formação dos flocos;
- Compressão da dupla camada elétrica: ocorre com o estabelecimento de uma grande força iônica do meio. A partir da introdução de eletrólitos, a camada difusa reduz a sua espessura para restabelecer o seu equilíbrio, isto faz com que se elimine a estabilização eletrostática e, quando ambas se juntam, se favorece a coagulação;
- Adsorção e neutralização de cargas: os íons positivos que surgem da hidrólise do coagulante são adsorvidos à superfície das partículas até que a carga eletrostática das partículas seja neutralizada, isto leva ao fim da repulsão entre as partículas e à formação de flocos. Se a partícula adsorver uma carga maior do que a necessária para neutralizar a sua superfície, a coagulação falha ocorrendo o fenômeno da reestabilização da carga da partícula;
- Adsorção e formação de pontes: ao se utilizar coagulantes poliméricos, devido ao seu tamanho (cadeias longas), os polímeros podem adsorver mais de uma partícula em suspensão, servindo como ponte entre elas. É por este motivo que muitas vezes se utilizam polímeros como auxiliares de coagulação/floculação (C/F), o que leva à formação de flocos maiores facilitando então o processo de remoção posteriormente.

3.2.1.1 Coagulante metálico: policloreto de alumínio (PAC)

Dentre os coagulantes químicos à base de sais metálicos, está o policloreto de alumínio (PAC). Este consiste num composto polimérico inorgânico à base de alumínio, cuja obtenção a partir da bauxita é dada pela parcial neutralização da solução de alumínio por uma base forte, geralmente NaOH. Ao se adicionar os íons OH^- a solução, se favorece a hidrólise do íon $\text{Al}^{3+}_{(\text{aq})}$, gerando como produtos as espécies monoméricas e poliméricas (MATILAINEM *et al.*, 2010).

A identificação do coagulante é dada por seu grau de neutralização (r) ou basicidade, podendo ser encontrado no mercado na faixa de 0 a 3 e basicidade entre 0 e 100%. A basicidade normalmente situa-se entre 15 e 85%, sendo acima de 60%, considerada como basicidade alta (PAC-AB) e, abaixo deste nível, considerada como basicidade média à baixa (PAC-BB). O consumo de alcalinidade pelo coagulante é proporcional à sua basicidade, onde, quanto maior seu nível, menor então o consumo de alcalinidade pelo coagulante (PERNITSKY; EDZWALD, 2003; 2006).

O mecanismo de atuação predominante para o PAC, na faixa de pH 7 - 9 e dosagem entre 1,9 - 32 mg/L, faixas estas utilizadas neste trabalho, é o de adsorção e neutralização de cargas (WEI *et al.*, 2015).

Os coagulantes de sais de alumínio tendem a liberar certa quantidade de íons H^+ no meio em sua aplicação. Para o PAC, esta quantidade é menor, com isso, consequentemente, o pH é pouco afetado, levando à menor utilização de alcalinizantes, ou até mesmo a exclusão da etapa de ajuste de pH (WEI *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2017).

Além disso, a presença da espécie de alumínio Al^{3+} , com maior tamanho e carga frente aos demais coagulantes, faz com que tenha uma rápida ação, favorecendo a formação de flocos mais volumosos, o que facilita a etapa de clarificação, no tratamento da água (MATILAINEM *et al.*, 2010).

O PAC também apresenta vantagens em comparação aos demais sais de alumínio utilizados, devido às características de sua estrutura molecular condensada com ligações de oxigênio entre os átomos de alumínio, e maior concentração de elemento ativo (Al_2O_3) (PAVANELLI, 2001).

Como desvantagem, tem-se que as espécies de alumínio pré-formadas possuem um limite para a sua hidrólise, devido a sua estabilidade, limitando-a durante o processo de coagulação; possui baixa eficiência quanto à remoção de matéria

orgânica de características hidrofóbicas ou de alta massa molecular. Apesar do tratamento com o PAC gerar menos lodo, deve-se levar em consideração o fato de que residuais de alumínio podem estar contidos na água ao final do tratamento, representando assim outra desvantagem (MATILAINEM *et al.*, 2010).

Estudos realizados com o PAC, associado à diatomita para o tratamento de água contendo cianobactérias, mostraram a capacidade de remoção de células de *M. aeruginosa* sem seu rompimento celular (WU *et al.*, 2011), evitando-se assim a liberação de toxinas ao meio. Já Yuheng *et al.* (2011) obtiveram remoções em seus ensaios com a utilização isolada do PAC, na faixa de 80 a 89% em densidade celular de *M. aeruginosa*. Entretanto, deve-se ressaltar que, apesar da boa eficiência, e mesmo que em comparação a outros coagulantes metálicos, gere menos lodo, esta formação não é nula, podendo levar as células contidas neste à sua lise, quando na permanência por longos períodos no sistema (ARAÚJO, 2006).

3.2.1.2 Coagulante orgânico: Tanfloc SG

Os coagulantes orgânicos podem ser encontrados na forma natural, ou comercial (com maior grau de pureza) a partir da extração de vegetais, por exemplo. Dentre os principais coagulantes naturais estudados atualmente, encontram-se (LIMA JÚNIOR; ABREU, 2018):

- A *Moringa oleifera*, através do uso de suas sementes *in natura*, trituradas ou pulverizadas, ou em soluções aquosas previamente preparadas;
- Os taninos vegetais, que se trata de metabólitos secundários das plantas, sendo encontrados em folhas, frutos, raízes e cascas;
- A quitosana, proveniente da quitina, presente na parede celular de fungos e nos exoesqueletos e carapaças de crustáceos marinhos; Entre outros, como o alginato de algas, e a *Prosopis juliflora*, *Cactus latifaria*, *Margaritarea discoidea*, e *Jatropha curcas*.

Estes coagulantes de origem vegetal consistem em polímeros de cadeias suficientemente longas para que a carga negativa dos coloides seja superada de tal forma que ocorra a adsorção das partículas em sua superfície, pela formação de

ligações químicas, havendo a neutralização das cargas e conseqüentemente a formação dos flocos (LIBÂNIO, 2010). Desta forma, a sua eficiência no mecanismo de coagulação ocorre não só por sua capacidade de adsorção e neutralização de cargas, mas também em função do tamanho de sua cadeia, caracterizando o maior número de sítios de adsorção livres (YIN, 2010).

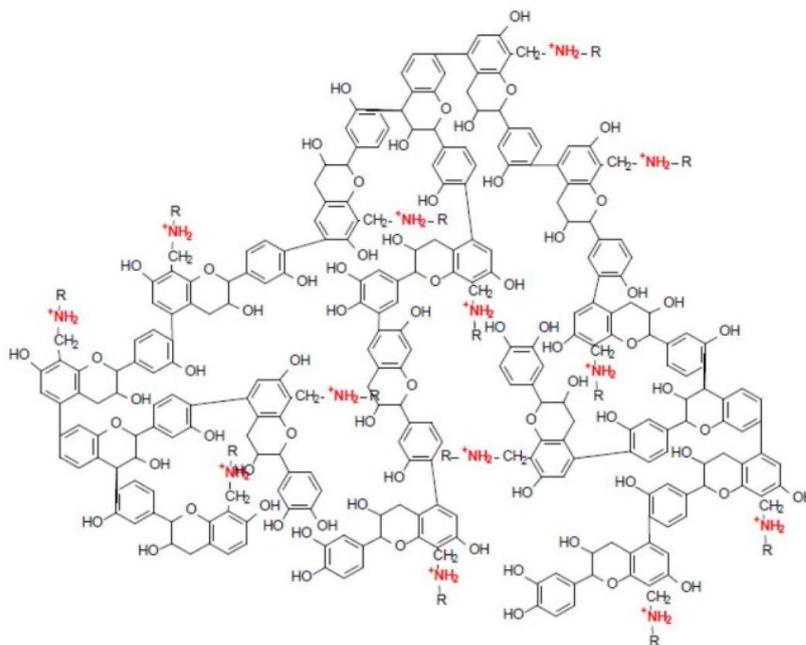
Dentre as suas vantagens, têm-se principalmente que: por se tratar de componentes biodegradáveis e não tóxicos, seus riscos ao meio ambiente são mínimos frente aos coagulantes metálicos; além disso, possuem a propriedade de produzirem lodo em menor quantidade e com menores teores de metais, quando associado a coagulantes químicos (GRAHAM *et al.*, 2008). Embora a utilização de extratos naturais de origem vegetal traga vantagens ecológicas, pode, entretanto, apresentar como desvantagem o aumento da concentração de matéria orgânica na água tratada (CHOY *et al.*, 2014), a partir da presença de biomoléculas como lipídios, que não participam do processo de coagulação (GHEBREMICHAEL, 2007), podendo estas posteriormente reagir com o cloro, na etapa de desinfecção e resultar na formação de compostos organoclorados, nocivos à saúde.

O coagulante natural adotado no trabalho foi o Tanfloc SG, à base de tanino. Os taninos são compostos fenólicos hidrossolúveis com capacidade de formar complexos com proteínas e outras macromoléculas e minerais. São provenientes de espécies vegetais, como *Acacia mearnsii*, *Castanea sativa* e *Schinopsis balansae* (BELTRÁN-HEREDIA *et al.*, 2012). Tradicionalmente, são utilizados para curtir peles de animais e também como coagulantes para o tratamento de água residuária e de abastecimento (SÁNCHEZ-MÁRTIN *et al.*, 2009).

As moléculas de tanino apresentam propriedades coagulantes, e agem desestabilizando os coloides através da eliminação da camada de solvatação. Com a diminuição do potencial zeta durante o processo de coagulação, leva-se assim à formação de flocos. A partir destas características, podem ser aplicados no tratamento de águas residuárias e de abastecimento para o processo de coagulação e floculação (DA SILVA, 1999). Para o coagulante ser produzido, em sua versão comercial (Figura 2), o tanino condensado reage com o cloreto de imínio (obtido pela reação do cloreto de amônio, por exemplo, com aldeído fórmico), através da reação de Mannich, relatada sob patente, de tal forma então que se obtenha como produto um polímero orgânico catiônico (LAMB; DECUSATI, 2002; MANGRICH *et al.*, 2014).

O mecanismo de ação predominante do Tanfloc é o de neutralização de cargas e formação de pontes entre as partículas (TANAC, 2021).

**Figura 2 - Estrutura química do tanino modificado, que compõe o coagulante Tanfloc (Tanac).
Tanino extraído da Acácia Negra**



Fonte: Mangrich et al. (2014)

Quanto ao tratamento de águas contendo cianobactérias no meio, o tanino vem se apresentando também eficiente em remoções. Oliveira (2016), utilizando-se de uma solução de tanino a 20 mg/L, associado à C/F/FAD, e em pH de coagulação de 7,5, obteve em seus melhores resultados, remoções na faixa de 95,7% de células da espécie *Dolichospermum cylindrica*.

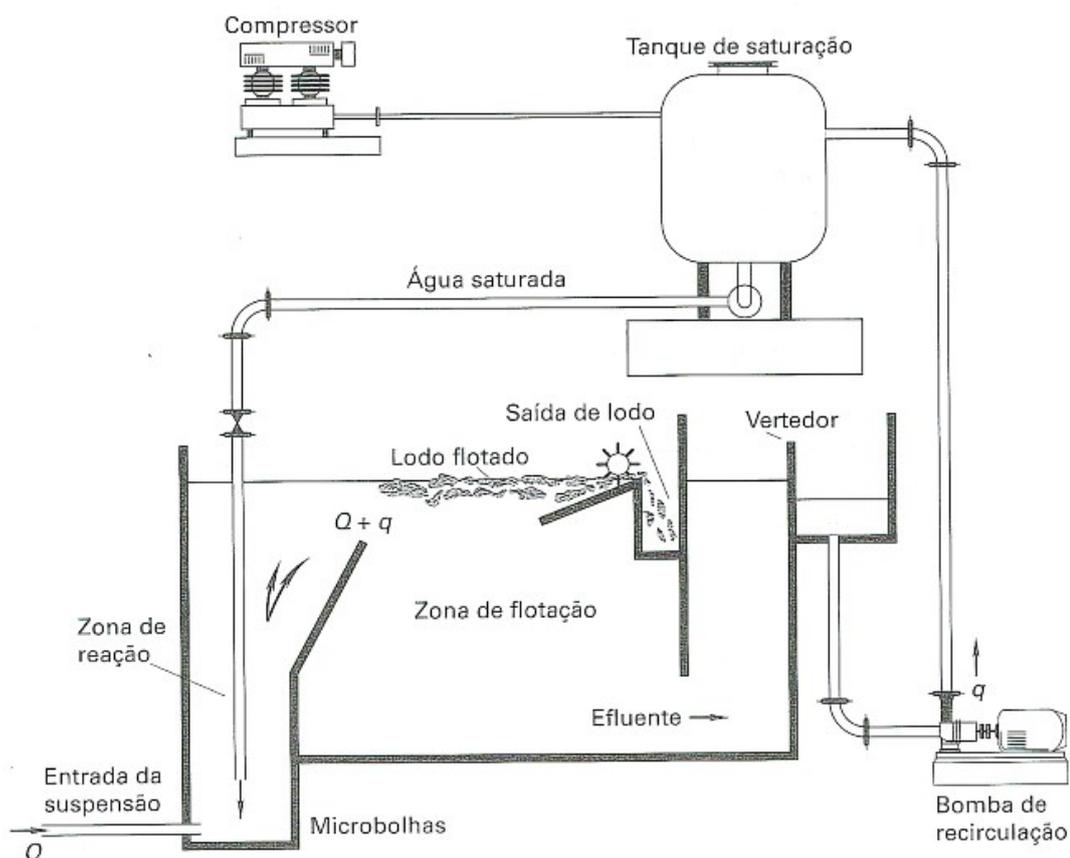
Mezzari et al. (2014), apresentaram a recuperação de *Chlorella vulgaris* na ordem de 95%, utilizando-se de ácido tânico, em sua melhor dosagem de 11 mg/L em pH 5 - 7.

Wang et al. (2013), utilizando um coagulante derivado de tanino, denominado Q-TN, obtiveram seus melhores resultados em valores de pH abaixo de 9,0, com dosagens de 0,5 - 20 mg/L e remoções acima de 90% nas faixas de densidades celulares entre 1×10^8 e 5×10^9 cel/L.

3.3 FLOTAÇÃO

O processo de flotação caracteriza-se como um processo físico de separação de fases (sólido-líquido e líquido-líquido), na qual microbolhas de gás são introduzidas ao meio líquido em tratamento. Em contato com as bolhas de ar, as partículas em suspensão do meio se aderem levando à formação de aglomerados com densidade menor que a do líquido, promovendo então a sua ascensão à superfície, para posterior remoção (LUNDH, 2000) (Figura 3). Sua ocorrência dar-se-á então pela tensão superficial do meio de dispersão e ao ângulo de contato formado entre as bolhas e as partículas (SOUSA *et al.*, 2003).

Figura 3 - Esquema genérico de um sistema de flotação



Fonte: Richter (2009)

Estudos sobre a flotação vêm recebendo atenção desde o final do Século 19. Sua utilização deu início no processamento de minérios, e posteriormente passou a ser aplicada em outras operações industriais como separação de sementes,

recuperação de fibras na indústria de papel, remoção de óleos e gorduras, entre outros (TESSELE; ROSA; RUBIO, 2004; CARÍSSIMI; RUBIO, 2005).

Atualmente, além da aplicação na separação de minerais, a popularidade da técnica é seguida pelo uso na recuperação de corantes em indústrias de papel e tratamento de água e esgoto. Contudo, a ampliação dos estudos leva também ao uso da flotação em processos tais como despoluição de rios, separação de plástico e separação de microrganismos (MASSI *et al.*, 2008).

3.3.1 Flotação por Ar Dissolvido (FAD)

Dentre as técnicas envolvendo a flotação, a flotação por ar dissolvido (FAD) recebe grande atenção no estudo do tratamento de águas residuárias e águas de abastecimento, principalmente na aplicação em águas com elevada densidade algal, que resultam em cor e turbidez elevadas (ASSIS, 2006).

Pode ser considerada como uma alternativa à sedimentação em estações de tratamento de água (ETA), pois têm a vantagem de reduzir a carga de material suspenso, elevando a eficiência na etapa posterior de filtração (EDZWALD, 2010).

Para o caso das cianobactérias, em métodos convencionais de tratamento de água, após os processos de coagulação e floculação, as partículas são sedimentadas no fundo dos decantadores para posterior coleta da água clarificada. Entretanto, a permanência do lodo nos decantadores por longos períodos, pode acarretar na consequente ruptura celular das cianobactérias ali presentes, causando a liberação de toxinas intracelulares (OLIVEIRA, 2005; SANTIAGO, 2008). Assim, têm-se empregado a FAD ao final do processo de clarificação por apresentar uma melhor eficiência na remoção de cianobactérias, em função do baixo peso das células, o que favorece a flutuabilidade dos organismos, além do menor tempo em que o lodo fica retido no sistema (EDZWALD *et al.*, 2003).

No estudo de Teixeira e Rosa (2007), comparando a FAD com a sedimentação, mostraram que ambos os mecanismos foram efetivos para a remoção de células de *M. aeruginosa*; entretanto a FAD apresentou como vantagem maior remoção de clorofila-a, e com a aplicação de cerca de metade da dosagem de coagulante (PAC) exigida na sedimentação.

O principal fator para a contribuição na eficiência do uso da FAD deve-se à baixa densidade específica, motilidade e outras características morfológicas das cianobactérias, as quais favorecem a formação de flocos de menor densidade, com melhor capacidade de aderência às bolhas de ar geradas no sistema de FAD (SCHMIDT *et al.*, 1998).

O uso da FAD pode favorecer a retirada de células intactas, evitando a sua lise e conseqüente liberação de toxinas na água, como descrito por Teixeira e Rosa (2006b), que, em seu trabalho não observaram um aumento da concentração de microcistinas na água após o uso da FAD, porém, a remoção da toxina dissolvida na água apresentou-se insignificante (faixa de 5%). Desta forma, investe-se muito na melhora em eficiência, estudando-se sobre os parâmetros operacionais, tal como a aplicação de novos coagulantes (SHEN *et al.*, 2011; BONDELIND *et al.*, 2013; OMETTO *et al.*, 2014; ROZAINY *et al.*, 2014).

3.4 FILTRAÇÃO, DESINFECÇÃO E FLUORETAÇÃO

Após a fase de clarificação, realiza-se a filtração. A partir das necessidades das ETA's, são utilizados filtros de areia com diferentes granulometrias, sendo, filtros lentos com grãos de 0,25 - 0,35 mm, filtros rápidos de granulometria 0,4 - 1,0 mm e os filtros de alta taxa com granulometria 0,8 - 2,0 mm, retendo-se assim partículas na água na faixa de 5 a 25 micra (μm). Esta etapa contribui complementarmente para a remoção de turbidez, particulados e pequena quantidade de material emulsionado na forma coloidal ou emulsão (SNATURAL, 2021).

Como fase final, o tratamento segue para a desinfecção e fluoretação da água. Para a desinfecção de águas de abastecimento utiliza-se um agente desinfetante físico ou químico, com a finalidade de destruição de microrganismos patogênicos, sendo utilizados os seguintes agentes desinfetantes, em ordem de frequência: cloro, ozônio, luz ultravioleta e íons de prata (CAESB, 2021).

A fluoretação da água de abastecimento público é efetuada através de compostos à base de fluor. A aplicação destes compostos na água de abastecimento público contribui para a redução da incidência de cárie dentária em até 60%, se as

crianças ingerirem desde o seu nascimento quantidades adequadas de Íon fluoreto (CAESB, 2021).

4 METODOLOGIA

A realização dos ensaios teve como início o cultivo das cianobactérias, seguida do preparo das amostras, e então a realização do tratamento, sendo este dividido em três etapas:

- Na primeira, foram feitos testes para a determinação das dosagens dos coagulantes que apresentassem melhor eficiência;
- Em seguida, foram feitos ensaios de tratamento com as amostras contendo células de *Microcystis aeruginosa* em triplicata, primeiramente com as aplicações isoladas do PAC, em seguida do Tanfloc, e então com ambos os coagulantes em associação Tanfloc:PAC, nas proporções em porcentagem (considerando a dosagem ótima específica de cada coagulante), de 25:75, 50:50 e 75:25. Após a etapa de clarificação, as amostras foram submetidas à filtração;
- Por fim, foram realizadas as análises destas amostras para a determinação da eficiência no tratamento aplicado.

4.1 CULTIVO DAS CIANOBACTÉRIAS

Para o cultivo da espécie *Microcystis aeruginosa* (BCCUSP232 - Coleção Brasileira de Cianobactérias da Universidade de São Paulo), foram utilizados erlenmeyers de 250 e 500 mL, previamente esterilizados em autoclave e luz ultravioleta (UV). Após a transferência de volumes de 20 e 40 mL (sucessivamente, aos erlenmeyers de 250 e 500 mL), a partir de cultivos anteriores, e mais 180 e 360 mL de meio inorgânico ASM-1, devidamente lacrados com papel crepado, elástico e Parafilm®, os frascos foram mantidos em sala de cultivo com temperatura controlada, aproximadamente 26 ± 1 °C, em regime de fotoperíodo 16:8 (16 horas sob iluminação e mais 8 horas sem iluminação). Os cultivos foram mantidos em período de crescimento entre 20 e 25 dias, até a sua utilização nos ensaios (Figura 4).

Figura 4 - Sala de cultivo de cianobactérias (LTPA)

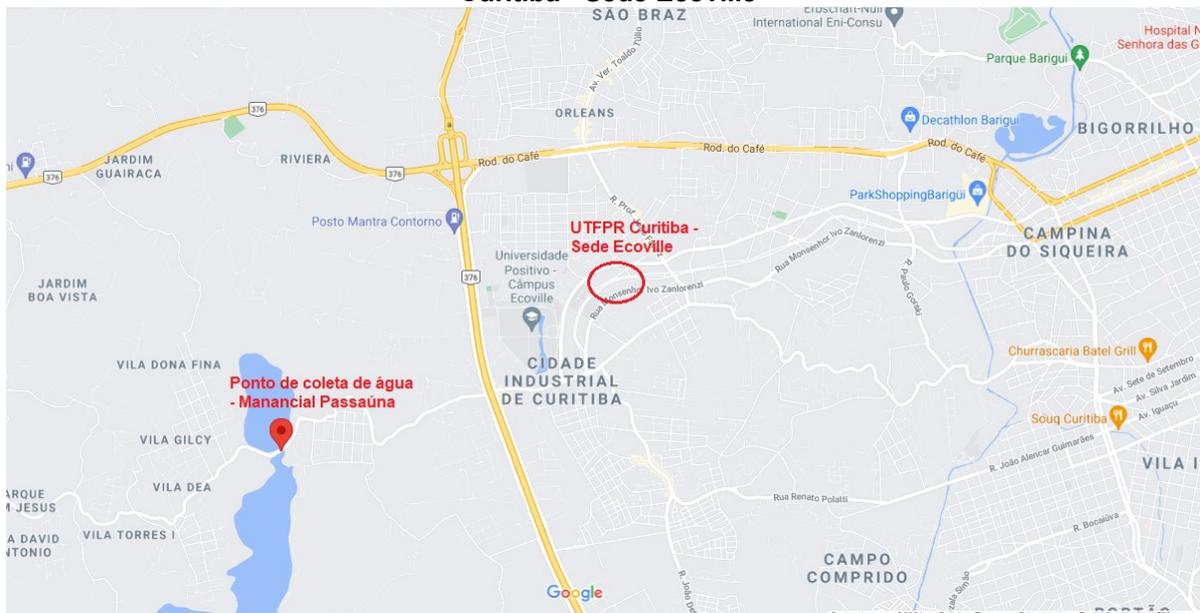


Fonte: Autoria própria

4.2 COLETA E PREPARO DA ÁGUA DE ESTUDO

Para a realização dos ensaios, foram feitas coletas de água natural proveniente do Rio Passaúna. Optou-se como ponto de captação o Parque do Passaúna, localizado no bairro Augusta, Curitiba-PR (Figura 5), para que se mantivesse a estabilidade em qualidade de água, e maior facilidade em sua obtenção (logística). As coletas foram realizadas utilizando-se galões de 10 e 20 litros, antes da execução dos ensaios, adotando-se como padrão de validade para a utilização dessas amostras, um período de até 15 dias após a sua coleta.

Figura 5 - Localização do ponto de coleta no manancial Passaúna, com indicação da UTFPR Curitiba - Sede Ecoville



Fonte: Google Maps (adaptado), 18/08/21

A fim de simular as características de um manancial com a presença de floração de cianobactérias, volumes de cultivo de *Microcystis aeruginosa* foram adicionados à água coletada. Para garantir uma menor variedade nos ensaios, foi utilizada a água de uma mesma coleta para o preparo destas, assim como um mesmo cultivo das cianobactérias, e então, após homogeneizados foram particionados em três (para a realização das triplicatas). Os ensaios foram realizados em diferentes dias, porém consecutivos, sendo feito o preparo da amostra pouco antes de suas realizações, com cerca de 8 L para cada dia (visto pela capacidade dos jarros do *Jartest*, de 2 L). Para esta padronização, foram utilizados os parâmetros turbidez e densidade celular inicialmente em seu preparo, dosando os volumes utilizados, conforme as condições iniciais da água de estudo e cultivo das cianobactérias, de modo que se atingisse uma média de turbidez de 40 uT e densidade celular de $5,0 \times 10^5$ cels/mL, com base em outros estudos já realizados no laboratório (LTPA – UTFPR, Curitiba) e de outros autores (BAPTISTA *et al.*, 2017; BELÓ, 2015; DRIKAS *et al.*, 2001). Não foram feitos ajustes de pH sobre as amostras, tanto da água natural (utilizada nos ensaios para a determinação das dosagens), quanto nas amostras contendo o cultivo de cianobactérias, assim como durante o tratamento. Finalizados os ensaios, os volumes de água preparada não utilizadas ou obtidas após tratamento, foram assim despejados em galões contendo hipoclorito de sódio [2,5%] para a descontaminação (mínimo de 48 h) e posterior descarte.

4.3 COAGULANTES

O coagulante químico, policloreto de alumínio (PAC), foi cedido pela Companhia de Saneamento do Paraná (SANEPAR), na forma líquida, com basicidade de 64,25% e teor de alumínio entre 10,50 e 12,00%.

Já nos ensaios com o coagulante orgânico, foi utilizado um coagulante natural à base de tanino, em forma líquida, de nome comercial Tanfloc SG, cedido pela empresa Tanac (empresa produtora de extratos vegetais), com teor de sólidos totais de 30 - 34% e densidade de 1,12 g/cm³.

Para ambos os coagulantes, tanto químico, quanto orgânico, preparou-se inicialmente soluções estoque dos coagulantes na concentração de 10 g/L, obtendo-se a partir desta, as diluições de estudo, como em trabalhos já realizados no laboratório (CARVALHO, 2015; BALBINOTI, 2018; BEGHETTO, 2018).

Quanto à determinação das dosagens dos coagulantes a serem aplicadas no tratamento, foram realizados ensaios experimentais prévios utilizando-se amostras de água do Passaúna, via coagulação/floculação/FAD (C/F/FAD). Embora não tenha sido representada com total fidelidade quanto a posterior aplicação aos tratamentos das amostras contendo as células de cianobactéria, optou-se por adotar apenas a água do Passaúna como referência, por limitações em volumes de cultivo, visto também pela baixa variação em turbidez, parâmetro de definição utilizado, que o cultivo acrescentava na amostra total. Para a construção da curva de calibração, testou-se as dosagens dentro das faixas já utilizadas anteriormente (CARVALHO, 2015; BALBINOTI, 2018; BEGHETTO, 2018), sendo as seguintes variações aplicadas: 8; 10; 12; 16; 20 e 24 mg/L, para o PAC; e 4; 6; 8 e 10 mg/L para o Tanfloc (BOMFIM, 2015).

4.4 ENSAIOS

Todos os ensaios foram realizados em triplicatas, tanto nos de determinação da dosagem dos coagulantes (em todas as dosagens testadas, para ambos os coagulantes, PAC e Tanfloc), como no tratamento das amostras contendo as células de *M. aeruginosa*, para o uso individual e então em proporções, dos coagulantes.

Os jarros foram preenchidos com a amostra de água contendo as células de *M. aeruginosa* em volume de 2 litros, demarcado na posição 0% (Figura 6), atentando-se à ausência de bolhas na base destes (para evitar a ocorrência de erros). Feita a preparação dos jarros, e acomodados no equipamento, foram conectados a mangueira por onde a água saturada com ar é conduzida, e as hélices agitadoras abaixadas. Dadas as preparações, é assim feita a adição do coagulante, seguida da agitação rápida (Figura 6).

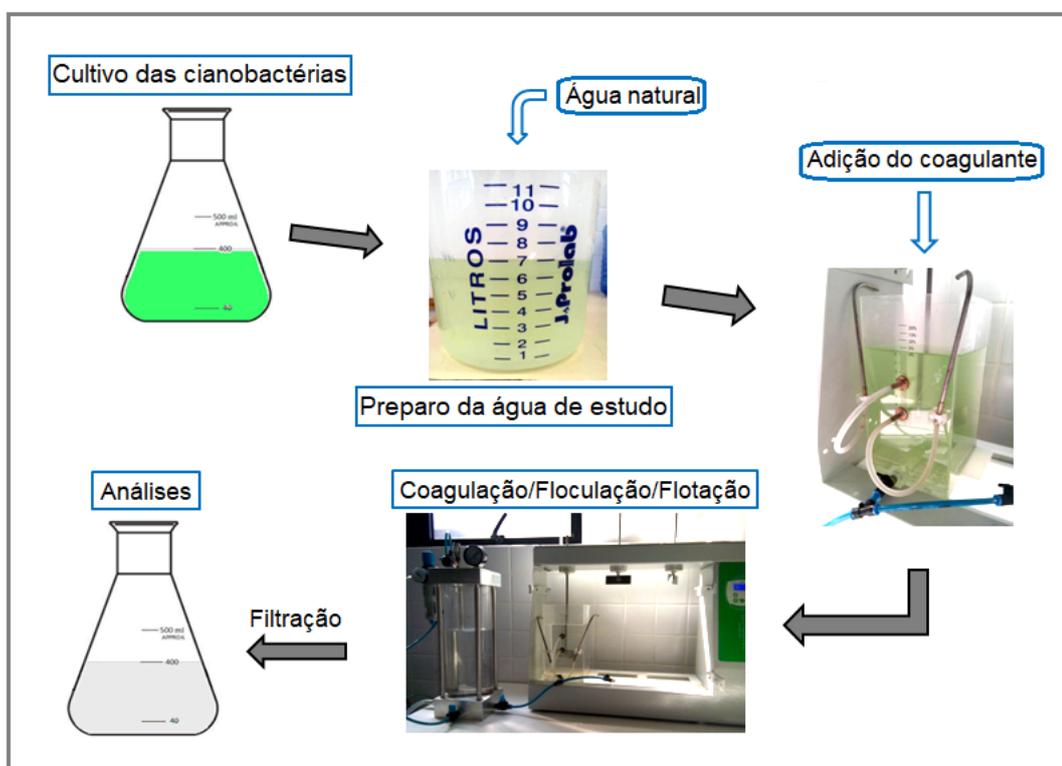
Figura 6 - Imagem representativa do jarro de Jarrest preenchido com a amostra a ser tratada



Nota: identificação das taxas de recirculação (R 0%, abaixo; R 10%, acima)

Fonte: Autoria própria

Figura 7 - Representação das etapas da metodologia

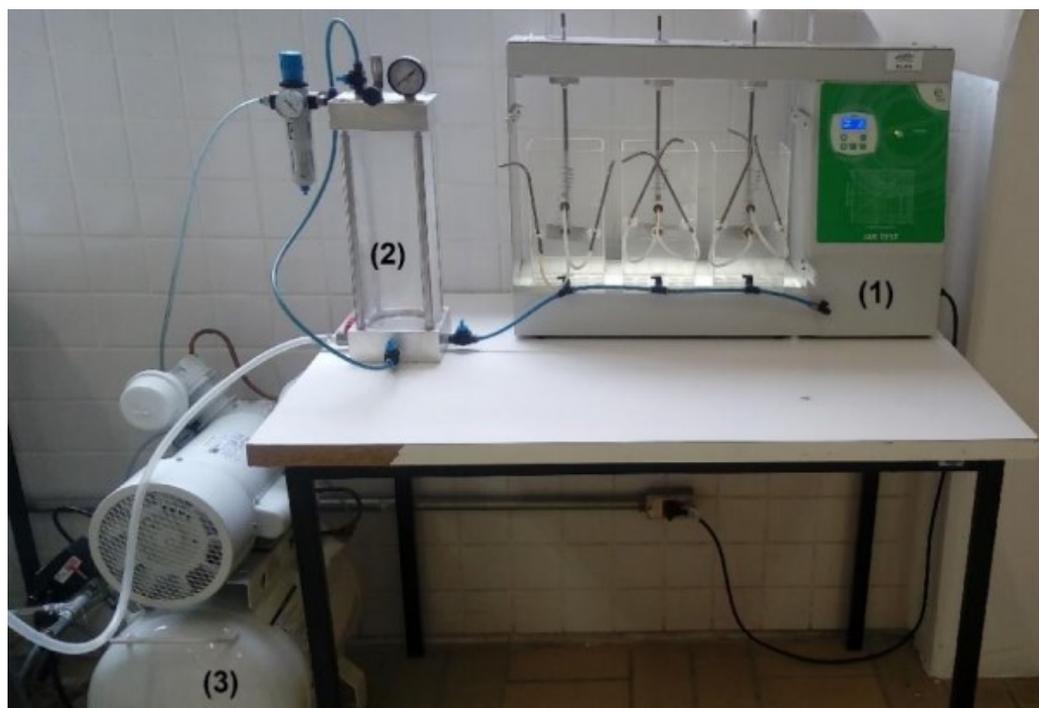


Fonte: Autoria própria

Os parâmetros operacionais adotados, para coagulação e floculação, são os indicados por Centurione Filho (2002) e Centurione Filho e Di Bernardo (2003), sendo: coagulação, agitação rápida com gradiente de velocidade (G_{mr}) de 1000 s^{-1} , por 10 s (T_{mr}); floculação, agitação lenta com gradiente de velocidade (G_{ml}) de 15 s^{-1} , por 15 min (T_{ml}).

Simultaneamente ao processo de floculação, a câmara de saturação também era preparada, sendo abastecida com água destilada e então saturada com o auxílio de um compressor de ar numa pressão de $4,2 \text{ kgf/cm}^2$, por 8 minutos (Figura 8). Dados os tempos de floculação e saturação da água, através das mangueiras conectadas entre os jarros e a câmara, injetou-se a água saturada com ar até a marcação do jarro em 10% (Figura 6), representada por sua taxa de recirculação ($R\%$), e em velocidade de flotação (V_f) de $5 \text{ cm} \cdot \text{min}^{-1}$ ($72 \text{ m}^3/\text{m}^2 \cdot \text{dia}$). Após o tempo de flotação, 2 min e 24 s, uma pequena alíquota era inicialmente descartada, evitando-se que um volume de amostra sem tratamento, presente nas mangueiras de saída, fosse recolhida, e então posteriormente, para a análise de qualidade, uma nova alíquota de amostra tratada era reservada.

Figura 8 – Imagem representativa do equipamento completo utilizado nos ensaios para as operações de coagulação, floculação e flotação por ar dissolvido



Nota: (1) Jar test; (2) Câmara de saturação de água; (3) Compressor de ar.

Fonte: Beghetto (2018)

4.5 FILTRAÇÃO

Para uma última fase de tratamento, após a etapa de FAD, realizou-se ensaios complementares de filtração das amostras, com a utilização de sistema a vácuo, funil de Büchner e filtro Whatman 40 (retenção em água de partículas com tamanho médio de 8 μm , segundo especificações do fabricante), de modo a simular um filtro de areia (retenção de 5 a 25 μm) em sistemas convencionais de tratamento, removendo resquícios de partículas sólidas ainda presentes na água tratada.

Por ter se tratado de uma fase complementar, não sendo objeto principal de estudo, não foi levado em consideração maior fidelidade quanto à taxa de fluxo na filtração, ou impacto quanto à retenção das células de cianobactéria, por exemplo, mas sim apenas quanto à simulação em filtrações realizadas em ETA's.

4.6 ANÁLISES DAS AMOSTRAS

Tanto para caracterização inicial da água como para verificar a eficiência dos tratamentos em todas as condições estudadas, foram feitas as seguintes análises de qualidade da água, conforme procedimentos recomendados no *Standard Methods* (APHA, 2005) (Quadro 2): pH, turbidez, cor e densidade celular.

Quadro 2 – Parâmetros, métodos de análise e equipamentos utilizados para a análise de amostras

Parâmetro	Método de análise	Equipamento
Contagem de células (cels/mL)	Contagem microscópica utilizando câmara de Neubauer	Microscópio óptico (Biotika – Série B20)
Cor (uH)	Redução da intensidade da luz ao atravessar a amostra	Espectrofotômetro UV-Vis (Global Trade Technology)
pH	Potenciométrico	pHmetro MS (Tecnopon® - mPA210)
Turbidez (uT)	Nefelométrico	Turbidímetro (Lovibond® Turbichcek)

Fonte: Autoria própria

5 RESULTADOS E DISCUSSÕES

5.1 DETERMINAÇÃO DAS DOSAGENS DOS COAGULANTES

A partir das variações testadas nos ensaios prévios dos coagulantes, levando-se em consideração as condições da água natural, obteve-se como menores dosagens, em função das melhores remoções em níveis de turbidez, as seguintes (Tabela 1): 16 mg/L para o PAC (atingindo 2,1 uT, frente aos 30,3 uT iniciais), na qual a partir de 20 mg/L o nível de remoção passou a decair e o valor de turbidez residual a aumentar (4,0 uT), em comparação à dosagem anterior testada, até atingir 24 mg/L (última dosagem aplicada), em que se atingiu o ponto de saturação não sendo evidenciado qualquer tipo de coagulação do meio; e 8 mg/L (atingindo 4,0 uT) para o Tanfloc, na qual a partir de 10 mg/L o nível de remoção de turbidez também passou a decair (4,5 uT), pela queda em eficiência da dosagem superior aplicada (Figura 9).

Tabela 1 - Determinação das dosagens de coagulantes em função da turbidez da água do Passaúna

(continua)

Teste de dosagem: PAC em água Passaúna	pH	Turbidez (uT) - média (triplicatas)	Remoção (%)	Desvio padrão
Água Passaúna	8,06	30,3	-	-
8 mg/L	8,00	6,0	80,8	0,14
10 mg/L	7,90	5,3	82,5	0,25
12 mg/L	7,86	4,8	83,6	0,23
16 mg/L	8,01	2,1	93,1	0,16
20 mg/L	7,90	4,0	87,7	0,29
24 mg/L	7,95	não houve coagulação	-	-

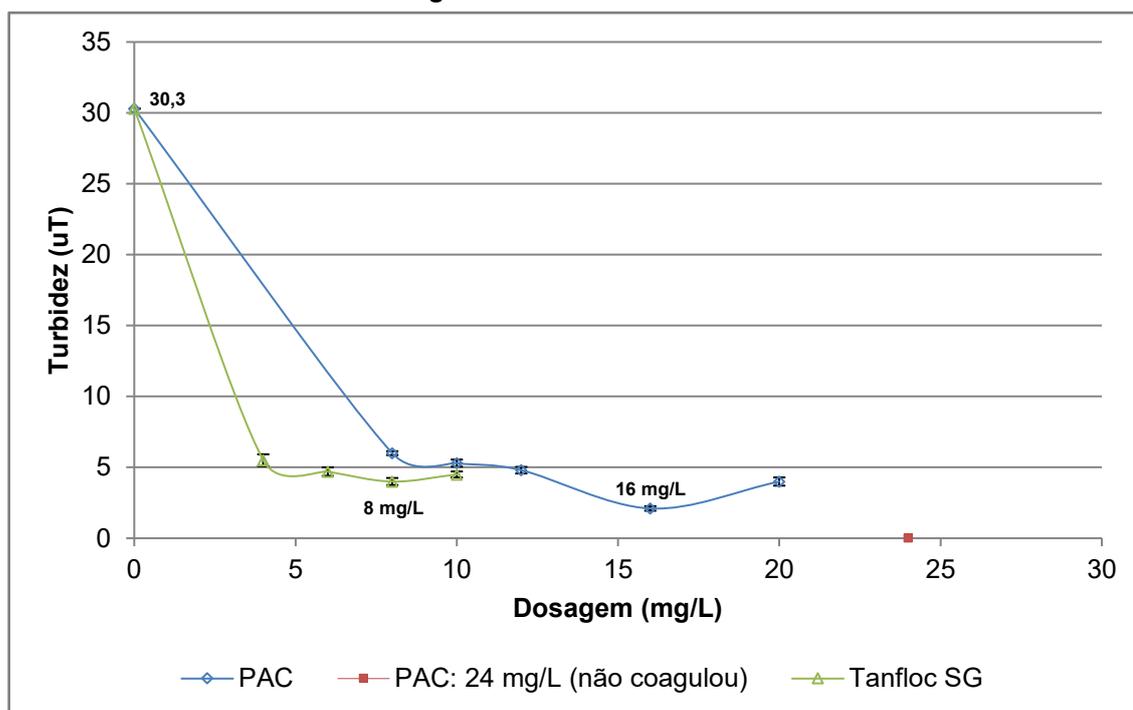
Tabela 1 - Determinação das dosagens de coagulantes em função da turbidez da água do Passaúna

Teste de dosagem: Tanfloc em água Passaúna	pH	Turbidez (uT) - média (triplicatas)	Remoção (%)	Desvio padrão
4 mg/L	8,03	5,5	82,2	0,42
6 mg/L	8,05	4,7	84,6	0,30
8 mg/L	7,92	4,0	86,8	0,25
10 mg/L	8,01	4,5	86,1	0,21

(conclusão)

Fonte: Autoria própria

Figura 9 - Gráfico da curva de calibração para a determinação das dosagens ideais dos coagulantes PAC e Tanfloc SG



Fonte: Autoria própria

Definidas as melhores dosagens de cada coagulante, determinou-se então as proporções a serem aplicadas nos ensaios:

- PAC: 25%, equivalente a 4 mg/L; 50%, 8 mg/L; 75%, 12 mg/L; 100%, 16 mg/L;
- Tanfloc: 25%, 2 mg/L; 50%, 4 mg/L; 75%, 6 mg/L; 100%, 8 mg/L.

5.2 TRATAMENTO DA ÁGUA CONTENDO *Microcystis aeruginosa*

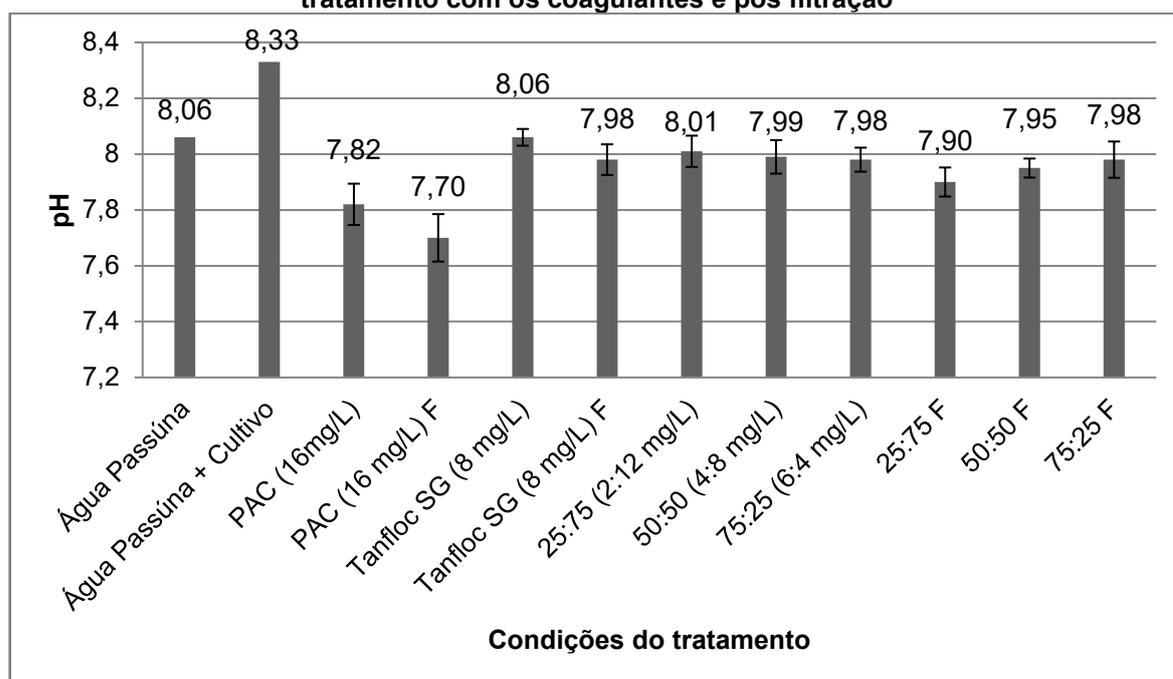
As médias, referentes aos resultados obtidos (pH, turbidez, cor e densidade celular) nos ensaios, assim como das amostras iniciais, encontram-se apresentados no Apêndice A.

Ressalta-se que os ensaios foram realizados em diferentes dias, contudo, amostras de uma mesma água de coleta (acondicionada adequadamente), assim como cultivos em mesmo período de crescimento, foram utilizados, mantendo-se o equilíbrio da qualidade da amostra estudada.

Com relação às dosagens utilizadas, para as suas determinações, os ensaios foram realizados apenas utilizando-se a água natural; entretanto, mesmo com a adição das células ao meio, levando a alterações nas condições iniciais da água natural, ainda assim, na faixa operada se comportaram eficientemente no tratamento, mostrando a eficiência dos coagulantes a pequenas variações.

Para isto, inicia-se analisando as variações de pH (Tabela 1; Figura 10). Como apresentado, uma baixa variação nos níveis de pH pôde ser vista ao longo dos tratamentos, concentrando-se prioritariamente na faixa entre 7,9 - 8,0.

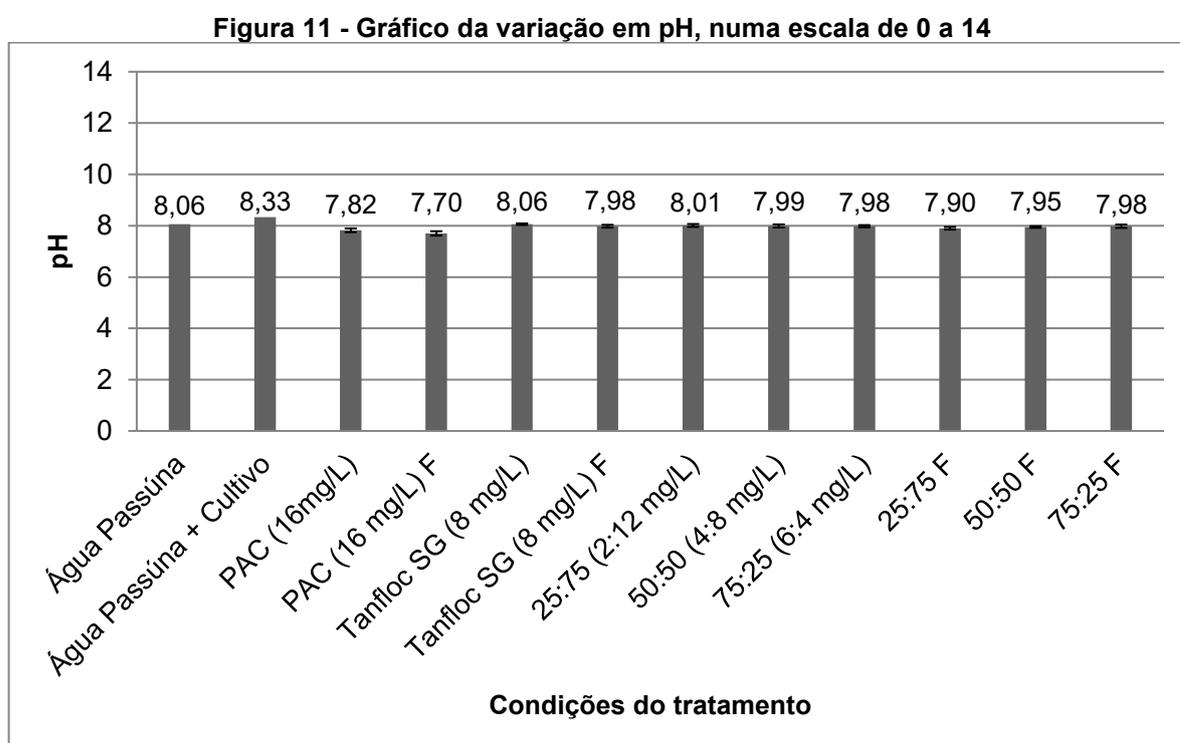
Figura 10 - Gráfico representando a variação em pH, comparando-se as amostras iniciais, pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração



Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação dos coagulantes em proporção Tanfloc:PAC [ex. 25% (2 mg/L): 75% (12 mg/L)], pós filtração (representada pela sigla 'F')

Fonte: Autoria própria

A partir disto, levando-se em consideração que não foram feitos ajustes no pH, pôde-se observar a característica de ambos os coagulantes, quanto à sua capacidade de baixo (ou não) consumo em alcalinidade, para as condições da amostra e parâmetros do tratamento utilizados (BOMFIM, 2015; WEI *et al.*, 2015; ZHANG *et al.*, 2017). Algo positivo, uma vez que alterações bruscas no pH do meio poderiam levar à ineficiência do tratamento ao interferir nos processos de coagulação/floculação (WEI *et al.*, 2015). Embora pareçam grandes as variações, ao analisar por uma outra escala (0 – 14), estas apresentam-se mínimas (Figura 11).



Fonte: Autoria própria

Outro ponto que se pode observar, é o ligeiro aumento do pH, quando se fez a adição do cultivo de cianobactérias à água natural, elevando-se de 8,06 para 8,33 (Figura 10). Tal fato pode estar ligado ao incremento de alcalinidade por conta do meio de cultivo, uma vez que este é preparado conforme a necessidade das células, pois a maioria das espécies de cianobactérias, além da alta concentração de nutrientes, tende a se desenvolver melhor em águas neutro-alcalinas, de pH entre 6,5 e 9 (WOJCIECHOWSKI, 2013); ou então até mesmo pela contribuição por parte das células, já que organismos fotossintetizantes aquáticos podem contribuir com a precipitação de carbonatos no meio (BRANCO, 1986). Apesar desse aumento no pH,

após o tratamento, estes valores voltam a reduzir, inclusive, levemente até mesmo após a filtração.

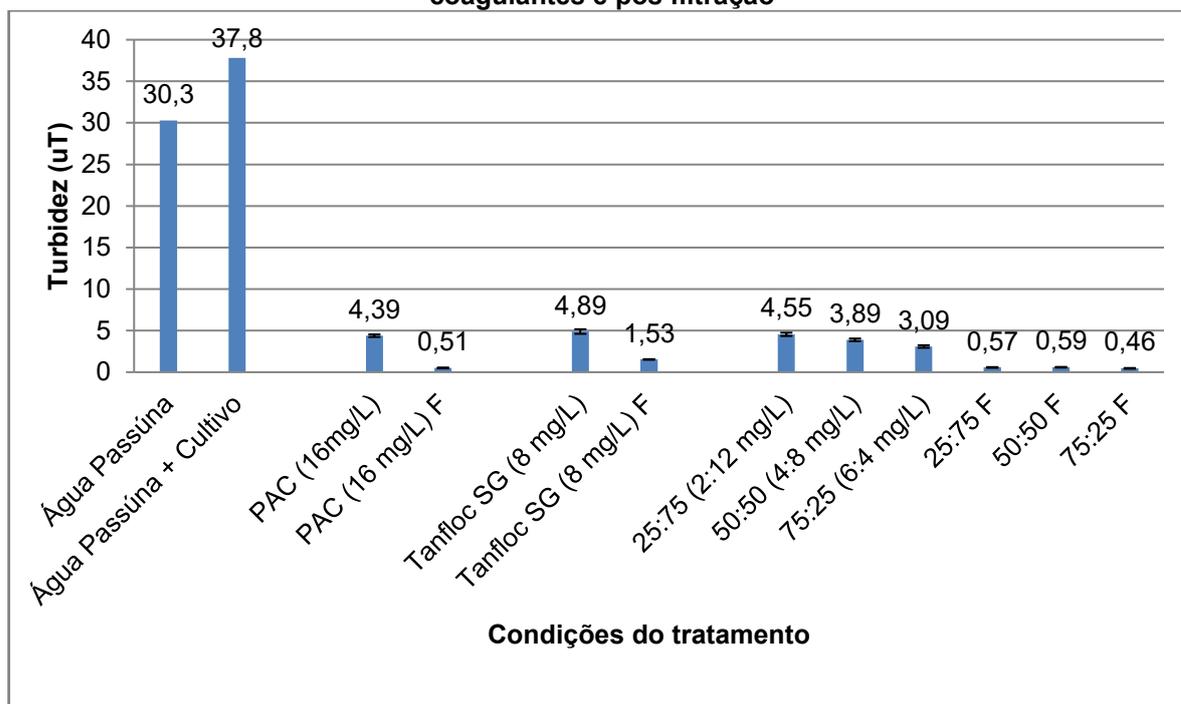
Embora ainda quanto à análise do pH mostrava-se um equilíbrio durante os tratamentos, sem variações bruscas perceptíveis, tal como as remoções de turbidez, que apresentaram linearidade comparando-se os desempenhos dos coagulantes isoladamente, a partir da aplicação dos coagulantes em proporções, puderam ser vistas algumas peculiaridades, tornando ainda mais visível quando analisados os parâmetros cor e densidade celular.

Para o parâmetro turbidez, foram vistas as contribuições da adição do cultivo de cianobactérias à água natural, observando-se o incremento em turbidez de 24,8% à amostra, comparada à água natural (30,3 uT), levando à faixa de aproximadamente 40,0 uT (37,8 uT) que se esperava da amostra final. Seguindo-se aos tratamentos, foram obtidas remoções muito similares quando da aplicação isolada dos coagulantes, sendo 87,1% para o PAC e 88,4% para o caso do Tanfloc (Figura 12), mostrando assim a capacidade de ambos os coagulantes em atuarem em turbidez, na remoção das partículas sólidas em suspensão, dentre elas os coloides, e principalmente a cultura de *M. aeruginosa*.

As diferenças começaram a ser notadas a partir de sua associação, elevando-se os níveis de remoção (pós FAD) quanto maior a proporção do Tanfloc na mistura (Tanfloc:PAC): 25:75 - 88,0%; 50:50 - 89,7%; e 75:25 - 91,8% (Figura 12).

Assim, mesmo após a FAD, o maior valor residual de turbidez obtido foi de 4,89 uT, respeitando-se os limites definidos pela Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021), de 5 uT, com margem, já que as amostras ainda passaram por filtração, levando-se os níveis ainda mais abaixo do valor máximo permitido pela legislação.

Figura 12 - Gráfico comparativo em valores de turbidez residual, no pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração



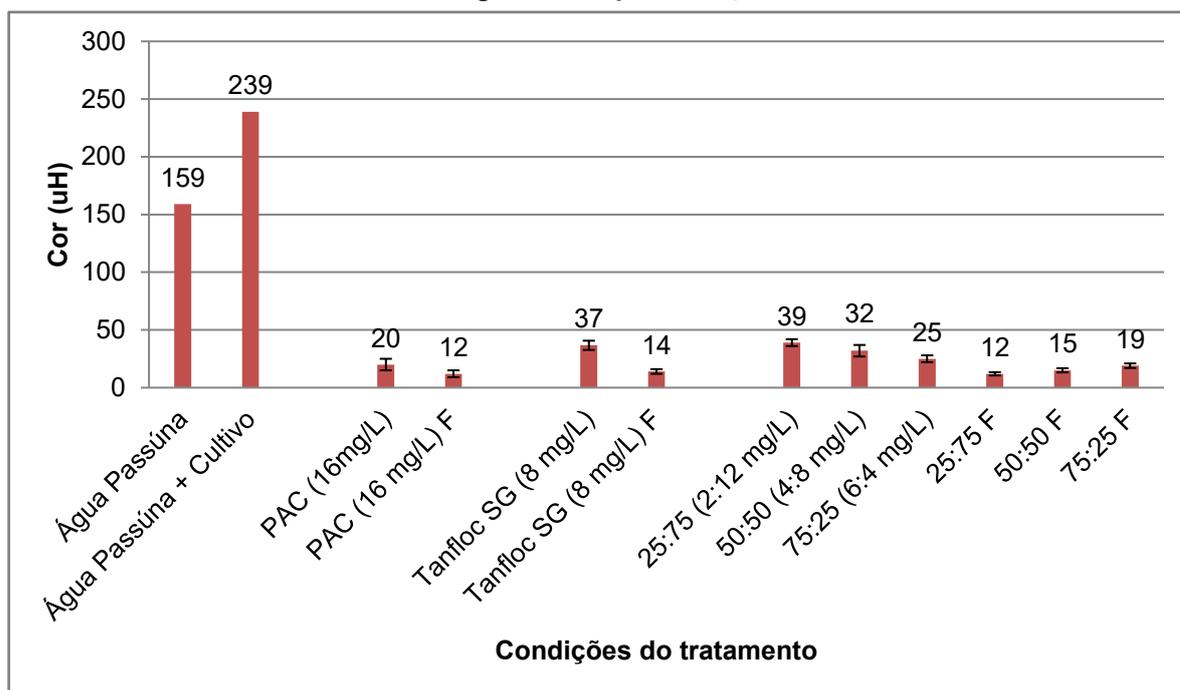
Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação dos coagulantes em proporção
Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação Tanfloc:PAC [25% (2 mg/L):75% (12 mg/L)], pós filtração (representada pela sigla 'F').

Fonte: Autoria própria

Um fenômeno presenciado na realização dos ensaios que se deve salientar aqui, foi a diferença visual notada nas características dos flocos formados durante o processo de tratamento, na etapa de floculação, onde, para o Tanfloc, estes apresentavam-se mais dispersos, sendo os produzidos pelo PAC mais uniformemente distribuídos pelo jarro (*Jartest*). Tal fenômeno, conseqüentemente refletiu-se nos resultados, a começar pela diferença entre as remoções em cor, apresentando-se nas faixas de 91,6% para o PAC, e 84,7% para o Tanfloc, pós FAD e com aplicações isoladas, levando uma ligeira vantagem o PAC (Figura 13).

Evidentemente alguns acréscimos em unidade de cor foram observados, como na adição do cultivo à água natural (que foi de 159 uH, para 239 uH), mas também, identifica-se o incremento causado pelo Tanfloc, em relação aos ensaios com o PAC, não apenas comparativamente no uso isolado dos coagulantes, mas também na interferência vista ao longo dos ensaios em proporções, onde, embora a melhor remoção na aplicação associada tenha sido na maior proporção do Tanfloc (75:25), o valor ainda encontra-se acima do atingido pelo PAC isoladamente.

Figura 13 - Gráfico comparativo em valores de cor residual, no pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração



Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação dos coagulantes em proporção
Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação Tanfloc:PAC [25% (2 mg/L) : 75% (12 mg/L)], pós filtração (representada pela sigla 'F').

Fonte: Autoria própria

Entretanto, apesar de parecer contraditório sobre a questão da maior remoção de cor, quando na associação dos coagulantes, a de melhor desempenho ter ocorrido na maior porcentagem do Tanfloc (75:25), na pós filtração por sua vez, foi o que apresentou menor índice de remoção, quando comparada aos demais, e sendo o de menor remoção pós FAD (25:75), o responsável por apresentar maior remoção na pós filtração (Figura 13).

Para o parâmetro cor, apesar de mesmo após a filtração apresentar valores entre 12 e 15 uH, a Portaria GM/MS Nº 888 (BRASIL, 2021) define como limite máximo permitido valor igual a 15 uH, na qual considera-se que para este parâmetro deve-se ter atenção, uma vez que no tratamento pós FAD, assim como em 75:25 F, se excedeu o limite.

Como nos parâmetros anteriores, boas remoções também foram obtidas em termos de densidade celular (Figura 14), apresentando-se resultados similares quando isoladas as aplicações dos coagulantes, na faixa de 94,3% para o PAC, e 94,2% para o Tanfloc, reduzindo-se de $5,50 \times 10^5$ cels/mL, para $3,12 \times 10^4$ cels/mL e $3,17 \times 10^4$ cels/mL, respectivamente, pós FAD. Assim como para os demais

parâmetros, o aumento gradativo na proporção de Tanfloc resultou no decaimento dos níveis de residuais.

Figura 14 - Gráfico comparativo em valores de densidade celular residual, no pós-tratamento com os coagulantes e pós filtração

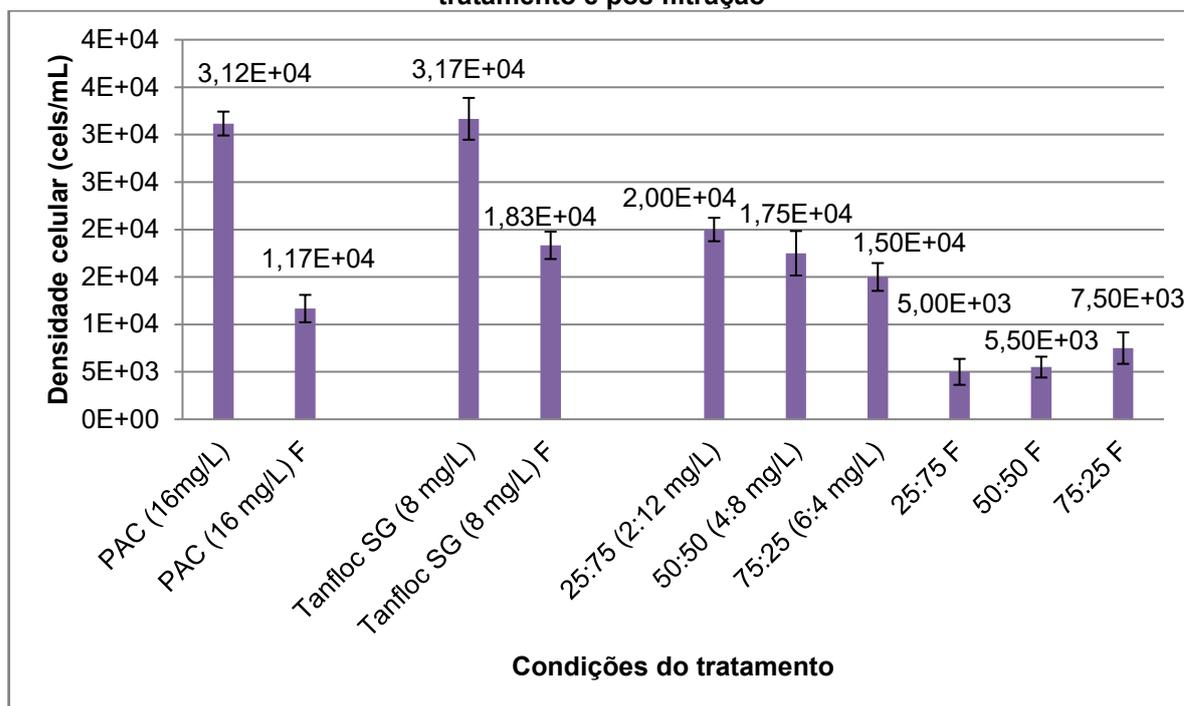


Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação dos coagulantes em proporção
Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação Tanfloc:PAC [25% (2 mg/L):75% (12 mg/L)], pós filtração (representada pela sigla 'F').

Fonte: Autoria própria

Comparando-se ao parâmetro cor, no caso da densidade celular, embora tenha-se observado maiores remoções quando aplicadas as dosagens em proporção, evidenciou-se também o aumento inversamente proporcional de células residuais, possuindo a maior concentração residual em cels/mL, pós filtração, na de melhor remoção pós FAD (75:25) (Figura 15).

Figura 15 - Gráfico comparativo de densidade celular residual entre os coagulantes, no pós-tratamento e pós filtração



Nota: a descrição, exemplo: 25:75 F, representa a aplicação dos coagulantes em proporção Tanfloc:PAC [25% (2 mg/L) : 75% (12 mg/L)], pós filtração (representada pela sigla 'F').

Fonte: Autoria própria

Ao se ter realizado um ciclo completo de tratamento, tal qual em ETA's, reforça-se sobre a preocupação também quanto ao despejo de nutrientes nas reservas hídricas, visando o controle do desenvolvimento das cianobactérias (BORTOLI; PINTO, 2015), visto que mesmo após o tratamento, residuais celulares ainda se encontravam presentes na amostra (Figura 15). Justifica-se que, apesar da retenção significativa obtida a partir do uso do filtro, sua eficiência é dada às partículas de até 8 μm (conforme especificação do fabricante), o que permite a passagem das células de *M. aeruginosa*, visto que apresentam em média tamanho entre 3 e 6 μm (medição realizada em laboratório).

Para as cianobactérias, a Portaria GM/MS Nº 888 (2021) não delimita um valor máximo permitido na saída do tratamento, sendo assim, não foram considerados para comparação os valores residuais obtidos dos tratamentos.

Reunindo-se as observações identificadas ao longo dos ensaios, que posteriormente refletiram nos resultados coletados, alguns pontos cruciais podem ser levados em consideração.

Na primeira hipótese, para a questão das etapas de coagulação/floculação, onde observou-se (visualmente) a diferença na produção dos flocos entre ambos os

coagulantes, De Oliveira (2019) trata em seu trabalho sobre a característica de agregação das partículas dada pelo Tanfloc, na qual tende à formação de flocos maiores e em formato irregular, o que passa a favorecer a sua sedimentação; por sua vez, diferentemente do Tanfloc, o PAC tende à formação de estruturas mais leves e uniformes. Assim, tal característica pode ter tido influência no mecanismo adotado neste trabalho, uma vez que na injeção de água saturada em ar, parte destes flocos formados pelo Tanfloc possa ter sido comprometida, levando à fragmentação e então dispersão destas partículas pelo meio. O que pode ser justificado pelo fenômeno observado nas remoções em densidade celular, apresentando resultados inversamente proporcionais ao esperado, quando em associação dos coagulantes, na pós FAD e pós filtração (tendo, na maior proporção de Tanfloc a melhor remoção pós FAD, porém, pior remoção na pós filtração, em comparação com as demais).

Como pôde-se ver, houve um contraste entre os resultados de remoções de cor e turbidez. Para isto, deve-se levar em consideração as suas diferenças.

Por definição, a turbidez dá-se pela presença de materiais sólidos em suspensão, sejam elas pela presença de substâncias minerais, coloides, matéria orgânica e microrganismos, como neste caso, cianobactérias. Diferentemente do outro parâmetro analisado, cor, este por sua vez é representado por substâncias que conferem tonalidade à água, gerada por partículas (mais finamente dividida) que por muitas vezes apresentam-se em dissolução no meio, como o tanino, por exemplo (BRASIL, 2013). A compreensão entre a diferença de ambos os parâmetros (cor e turbidez), faz com que se elucide melhor a análise dos resultados obtidos, levando-se assim ao questionamento levantado na segunda hipótese.

Como visto nos parâmetros cor e densidade celular, houve uma pequena influência do Tanfloc sobre o PAC quando em associação, na qual aparentou-se a formação de flocos mais dispersos à medida em que se dava o aumento na concentração do Tanfloc.

A mesma característica também é descrita por Nicolau *et al.* (2018), ao associar o Tanfloc ao PAC como auxiliar de coagulação, na qual passou a conferir mais cor às amostras tratadas, ao passo em que as dosagens ministradas de Tanfloc eram elevadas.

Trevisan (2014) sugere para tal fenômeno, que embora tenha contribuído para a diminuição da quantidade de sólidos totais suspensos na água (visto pela redução em turbidez), que a adição do Tanfloc leve à sua dissolução parcial no meio,

aumentando assim a quantidade de sólidos dissolvidos nesta; algo plausível com relação ao parâmetro cor, tendo-se em vista a diferença residual em comparação à pós FAD realizado com o PAC (Figura 12), que apresentou residual igual a 20 uH, frente aos 37 uH com o Tanfloc.

Embora não tenha sido utilizado o mesmo coagulante orgânico, Carvalho (2015) sugere a possibilidade de quando ministrados em associação, de o PAC neutralizar os próprios compostos orgânicos do coagulante natural levando à redução da quantidade de sítios ativos disponíveis para a remoção de outros compostos dissolvidos no meio, responsáveis por conferir cor ao meio.

A partir destas premissas, é possível reforçar assim sobre a possibilidade do incremento em cor ter sido gerada pelo Tanfloc, visto pela coloração marrom densa que o coagulante possui, ou também pela dispersão dos flocos e redissolução quando acontece a flotação. Além disso, também, sobre a possibilidade de o PAC ter sua eficiência reduzida, uma vez que parte de seus sítios ativos podem estar sofrendo reação com o próprio Tanfloc.

Ambos os coagulantes forneceram boas remoções nos tratamentos. Identificou-se que, quando isolados, o PAC apresentou remoções levemente superiores às do Tanfloc; entretanto, quando em associação, foram obtidas remoções ainda mais superiores do que quando isolados, principalmente em termos de densidade celular.

Além disso, outro ponto que se deve destacar é em relação às concentrações totais aplicadas na associação, sendo: em 25:75, 2 mg/L (Tanfloc) e 12 mg/L (PAC), numa concentração total de 14 mg/L; 50:50, 4 mg/L e 8 mg/L, totalizando 12 mg/L; e para 75:25, 6 mg/L e 4 mg/L, num total de 10 mg/L. Ou seja, embora ainda o PAC tenha a sua contribuição, identificou-se que dentre os resultados, a melhor remoção pós FAD foi obtida na associação dos coagulantes com a maior proporção de Tanfloc, na qual foi a de menor concentração total entre as utilizadas, conferindo-se assim a capacidade da redução do coagulante metálico, durante o tratamento.

Contudo, deve-se considerar também os demais aspectos envolvidos no trabalho: como a contribuição da FAD no processo de clarificação, que resultou na boa eficiência do tratamento com a *M. aeruginosa*. A etapa complementar de filtração, mostrando-se fundamental, uma vez que, além da retenção dos sólidos residuais suspensos pós FAD, principalmente quanto às células da *M. aeruginosa*, contribuiu para a redução a níveis dentro dos valores máximos permitidos pela Portaria GM/MS

Nº 888 (BRASIL, 2021). Além disso, deve-se também levar em consideração a morfologia da espécie de cianobactéria estudada, uma vez que Bernhardt e Clasen (1991) relatam sobre a característica das células (cocóide de superfície lisa) levam à predominância na coagulação pelo mecanismo de adsorção e neutralização de cargas, de forma a se atingir boas remoções a partir da aplicação de menores concentrações de coagulantes, quando comparadas à outras morfologias de cianobactérias.

6 CONCLUSÕES

A escassez de trabalhos similares ao apresentado, como a utilização da FAD em conjunto à aplicação de PAC e Tanfloc, no tratamento de águas contendo cianobactérias, por exemplo, tende a dificultar a base de referência. Entretanto, a partir dos ensaios efetuados foram obtidos bons resultados para estudo, cumprindo-se com os objetivos principais estipulados inicialmente.

Viu-se que ambos os coagulantes apresentaram bons rendimentos, sendo individualmente muito próximos em questão de remoções. Como discutido anteriormente, obteve-se também sucesso quanto ao tratamento aplicando-se os coagulantes em associação; embora, para alguns parâmetros os resultados de filtração não tenham seguido como o esperado, ainda assim apresentaram-se em níveis mais baixos quando em associação, desta forma, pôde-se confirmar a possibilidade quanto à utilização do Tanfloc para o tratamento em águas contendo florações de *M. aeruginosa*, confirmando-se assim a opção (em função da eficiência em tratamento) de poder substituir parcial ou totalmente o coagulante metálico, conforme a determinação ou condições que se espera.

A associação da flotação por ar dissolvido as etapas de coagulação/floculação no tratamento mostraram-se também satisfatória, mostrando-se eficiente na contribuição para o tratamento de amostras contendo *M. aeruginosa*.

A etapa complementar de filtração pós FAD também se mostrou necessária, uma vez que ofereceu remoções ainda superiores, retendo partículas residuais ainda suspensas no meio; só não apresentando-se melhor, como esperava-se, na associação dos coagulantes, onde para maiores proporções de Tanfloc a amostra tendeu a gerar partículas mais finamente dispersas/diluídas ao meio, dificultando a posterior retenção pelos filtros.

Ressalta-se que o presente trabalho se concentrou apenas em levantar dados prévios, abrindo-se margem para o aprimoramento de futuros trabalhos, com o possível ajuste de parâmetros e condições de experimentos, levando à uma maior fidelidade e equilíbrio quanto a redução de possíveis variações ao longo das etapas de tratamento, e que também leve à obtenção de melhores resultados.

7 SUGESTÕES

A partir deste trabalho, como opções para estudos futuros a fim de se buscar por alternativas que venham a contribuir com a melhora dos resultados, sugere-se:

- Análises pós tratamento, complementares aos já realizados, como de residuais de alumínio, para quantificar os residuais do metal e fazer a análise quanto aos níveis toleráveis em águas para consumo humano; análises de cianotoxinas, para a possível identificação ou não, de lise celular, e caso haja a presença de altos níveis, a investigação das etapas; análises de carbono orgânico total e dissolvidos, para a identificação de residuais orgânicos, provenientes da adição do coagulante natural, ou mesmo proveniente das cianobactérias;
- Considerar a adição do Tanfloc como agente floculante, complementar à coagulação realizada pelo PAC, e vice e versa, e não apenas como auxiliar de coagulação, a fim de se identificar variações e melhores eficiências;
- Realizar ensaios com outras espécies e morfologias de cianobactérias, a fim de se identificar limitações em parâmetros de tratamento;
- Realizar ensaios comparativos entre FAD e sedimentação, para a determinação do melhor método segundo as especificidades da amostra e coagulantes em questão;
- Testar outros parâmetros, como a elevação da taxa de recirculação, a fim de promover uma maior probabilidade de remoção das partículas suspensas;
- Realizar filtrações utilizando-se filtros de areia de forma convencional, comparando-se a eficiência com o método utilizado neste trabalho.

REFERÊNCIAS

AMARAL, Pauline Aparecida Pera do. **Utilização da flotação por ar dissolvido associada a microfiltração para remoção de cianobactérias em águas de abastecimento**. 2011. 137 f. Dissertação (Programa de Pós-graduação em Engenharia Ambiental) - Departamento de Engenharia Sanitária e Ambiental - Universidade Federal de Santa Catarina. Florianópolis, 2011.

APHA. American Public Health Association. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 21st ed. Washington, 2005.

ARAÚJO, A.P.M. **Avaliação operacional e caracterização do lodo gerado na indústria de água do litoral sul de Pernambuco**. 2006. 149 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Centro de Ciência e Tecnologia, Universidade Federal de Pernambuco. Recife, Pernambuco, 2006.

ASSIS, Renata S. S. **Remoção de *Microcystis aeruginosa* e microcistinas por flotação por ar dissolvido – estudo em escala de bancada utilizando sulfato de alumínio e cloreto férrico como coagulantes**. 2006. 137 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia, Universidade de Brasília. Brasília, 2006.

AZEVEDO, S. M. F. O.; BRANDÃO, C. C. S. **Cianobactérias tóxicas na água para consumo humano na saúde pública e processos de remoção na água para consumo humano**. FUNASA/MS. Brasília, 2003.

BARTIKO, D; DE JULIO, M. Construção e emprego de diagramas de coagulação como ferramenta para o monitoramento contínuo da floculação em águas de abastecimento. **Revista Ambiente & Água**, v. 10, n. 1, p. 71-81. 2015.

BALBINOTI, J. R. **Aplicação de extrato de sementes de *Moringa oleifera* na remoção de matéria orgânica por flotação por ar dissolvido**. 2018. 96 f. Dissertação de mestrado. Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

BEGHETTO, C. L. **Aplicação do extrato salino de *Moringa oleifera* e policloreto de alumínio para remoção de cianobactérias em água de abastecimento**. 2018. 95 f. Dissertação. Programa de Pós-graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental. Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2018.

BELTRÁN-HEREDIA, J.; SÁNCHEZ-MARTÍN, J.; MUNOZ-SERRANO, A.; PERES, J. A. Towards overcoming TOC increase in wastewater treated with *Moringa oleifera* seed extract. **Chemical Engineering Journal**, v. 188, p. 40-46. 2012.

BERNHARDT, H.; CLASEN, J. Flocculation of micro-organisms. **Journal Water SRT-Aqua**, vol.40, ed.2, p.76-81. 1991.

BOMFIM, A. P. S. **Avaliação dos coagulantes Tanfloc em comparação aos coagulantes inorgânicos a base de alumínio no tratamento de água**. 2015. 192 f. Dissertação (Mestrado). Universidade de Ribeirão Preto, UNAERP, Tecnologia Ambiental. Ribeirão Preto, 2015.

BONGIOVANI, M.; CAMACHO, F. P.; VALVERDE, K. C.; SANTOS, T. R. T. dos.; NISHI, L.; BERGAMASCO, R. Evaluation of Trihalomethanes Formation Using Combined Process Coagulation/flocculation/membranes in Water Treatment. **Chemical Engineering Transactions**, v. 43, p. 2323-2328. 2015.

BONDELIND, M.; SASIC, S.; BERGDAHL, L. A model to estimate the size of aggregates formed in a Dissolved Air Flotation unit. **Appl. Math. Model.**, v. 37, n. 5, p. 3036-3047. 2013.

BORTOLI, S. & PINTO, E. 2015. Cianotoxinas: características gerais, histórico, legislação e métodos de análises In: POMPÊO *et al.* (Orgs.) **Ecologia de reservatórios e interfaces**. São Paulo: Instituto de Biociências da Universidade de São Paulo, Cap. 21, p. 321-329. 2015.

BRANCO, S. M. Hidrobiologia Aplicada à Engenharia Sanitária. 3. ed. p. 616. São Paulo. **Cetesb / Ascetesb**. 1986.

BRASIL. Ministério da Saúde: Fundação Nacional de Saúde. **Manual prático de análise de água**. 4. ed. 150 p. Brasília - Funasa. 2013.

BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888/2021**. Publicação no Diário Oficial da União em 07 de maio de 2021, Ed. 85, Seção 1, página 127. Anexo XX à Portaria de Consolidação nº 5/GM/MS, de 28 de setembro de 2017.

CALIJURI, M. C.; ALVES, M. S.; SANTOS, A. C. **Cianobactérias e cianotoxinas em águas continentais**. 1ª ed. Rima. São Paulo, 2006.

CARÍSSIMI, E.; RUBIO, J. Advances in particulates aggregation–flotation separation. **Proceedings in Centenary of Flotation Symposium**. Brisbane, Australia, p. 415-423. 2005.

CARVALHO, M. C.; AGUJARO, L. F.; PIRES, D. A.; PICOLI, C. (Eds.) **Manual de cianobactérias planctônicas: legislação, orientações para o monitoramento e aspectos ambientais**. São Paulo, CETESB, p. 15-47. 2013.

CARVALHO, M. S. **Aplicação da *Moringa oleifera* na remoção de células de *Microcystis aeruginosa* e metabólitos por flotação por ar dissolvido e filtração**. 2015. 102 f. Dissertação, Programa de Pós-Graduação em Ciência e Tecnologia Ambiental, Universidade Tecnológica Federal do Paraná. Curitiba, 2015.

CARMICHAEL, W. W. Toxic Microcystis and the Environment. In: WATANABE, M. F.; HARADA, K.; CARMICHAEL, W. W.; FUJIKI, H. Toxic Microcystis. **CRC Press**. 262 p. Boca Raton, 1996.

CENTURIONE FILHO, P. L. **Desenvolvimento e operação de uma instalação de flotação de bancada para águas de abastecimento**. 2002. 313 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) – Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. São Carlos, 2002.

CENTURIONE FILHO, P. L.; DI BERNARDO, L. Procedimento para execução de ensaios de flotação/filtração em equipamento de bancada. **Revista Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 8, n. 1, p. 39-44. 2003.

CHORUS, I.; BARTRAM, J. **Toxic cyanobacteria in water: a guide to their public health consequences, monitoring and management**. 3. ed. Geneva: WHO - World Health Organization. 1998.

CHOY, S. Y.; NAGENDRA, K. M. P.; WU, T. Y.; RAGHUNANDAN, M. E.; RAMANAN, R. N. Utilization of plant-based natural coagulants as future alternatives towards sustainable water clarification. **Journal of Environmental Sciences**, v. 26, n. 11, p. 2178-2189. 2014.

COMO a água é tratada. **Companhia de Saneamento Ambiental do Distrito Federal, CAESB**, 2021. Disponível em: <https://www.caesb.df.gov.br/como-a-agua-e-tratada.html>. Acesso em: 29 de agosto de 2021.

COSTA, J.A.; SOUZA, J. P.; TEIXEIRA, A. P.; NABOUT, J. C.; CERNEIRO, F. M. Eutrophication in aquatic ecosystems: a scientometric study. **Acta Limnologica Brasiliensia**, v. 30, n.2, 11 f. 2018.

DA SILVA, T. S. S. **Estudo de tratabilidade físico-química com uso de taninos vegetais em água de abastecimento e de esgoto**. Rio de Janeiro: Fundação Oswaldo Cruz; Escola Nacional de Saúde Pública. 1999.

DE OLIVEIRA, C. **Avaliação operacional da aplicação de tanino vegetal no tratamentode água do Rio Caveiras**. 2019. 88 f. Dissertação. Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciências Ambientais. Centro de Ciências Agroveterinárias. Universidade do Estado de Santa Catarina. Lages, 2019.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. **Métodos e técnicas de tratamento de água**. 2. ed. São Carlos: RIMA. 792 p. v. 1. 2005.

EDZWALD, J. K.; TOBIASON, J. E.; UDDEN, C. T.; KAMINSKI, G. S.; DUNN, H. J.; GALANT, P. B.; KELLEY, M. B. Algae, bubbles, coagulants and dissolved air flotation. **J. Wat. Supp.**, v. 52, n. 1, p. 243-258. 2003.

EDZWALD, J. K. Dissolved air flotation and me. A review. **Water research**, v. 44, p. 2077-2106. 2010

Falconer, I. R. Cyanobacterial toxins of drinking water supplies. **CRC Press**. Boca Raton, USA, 2005.

FERREIRA, P. C.; PIAI, K. dA.; TAKAYANAGUI, A. M. M.; SEGURA-MUÑOZ, S. I. Aluminum as a risk factor for Alzheimer's disease. Review Articles. **Rev. Latino-Am. Enfermagem**, v. 16, n.1, p. 151-157. 2008.

FILTROS e Filtração de Água – Areia Especial Para Filtros de Água. Grupo Síntese Natural Ambiente, SNATURAL Ambiente, 2021. Disponível em: <<https://www.snatural.com.br/filtracao-agua-areia/>>. Acesso em: 29 de agosto de 2021.

GHEBREMICHAEL, K. Overcoming the drawbacks of natural coagulants for drinking water treatment. **Water Sci. Technol. Water Supply**, v. 7, n. 4, p. 87-93. 2007.

GRAHAM, N.; GANG, F.; FOWLER, G.; WATTS, M. Characterization and coagulation performance of a tannin based cationic polymer: a preliminary assessment. **Colloids and Surface A: Physicochemical and Engineering Aspects**, v. 327, n. 1-3, p. 9-16. 2008.

GUERRA, A. B.; TONUCCI, M. C.; CEBALLOS, B. S. O.; GUIMARÃES, H. R. C.; LOPES, W.S.; AQUINO, S. F.; LIBÂNIO, M. Remoção de microcistina-LR de águas eutrofizadas por clarificação e filtração seguidas de adsorção em carvão ativado granular. Artigo Técnico. **Engenharia Sanitária e Ambiental**. v. 20, p. 603-612. 2015.

KOMARÉK, J.; KOMÁRKOVÁ, J. Review of the European *Microcystis* morphospecies (Cyanoprokaryotes) from nature. **Fottea**, v. 2, n. 1, p. 1-24. 2002.

LAMB, L. H.; DECUSATI, O. G. **Manufacturing process for quaternary ammonium tannate, a vegetable coagulating and flocculating agente**. US Patent 6,478, 986 B1. 2002.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. Campinas, SP: Editora Átomo, 3ª Ed. cap. 7 p. 158; 162; 209. 2010.

LOPES, V. S.; SILVA, L. M. A.; MORUZZI, R. B.; OLIVEIRA, A. L. Estudo da coagulação/floculação de água com turbidez moderada na sedimentação e flotação por ar dissolvido. Artigo Técnico. **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 25, n. 4, p. 567-572. 2020.

LUNDH, M. **Flow structures in Dissolved Air Flotation**. Licentiate thesis, Lund University. Lund Sweden, 2000.

LIMA JÚNIOR, R. N.; ABREU, F. O. M. S. Produtos Naturais Utilizados como Coagulantes e Flocculantes para Tratamento de Águas: Uma Revisão sobre Benefícios e Potencialidades. **Revista Virtual de Química.**, v. 10, n. 3, p. 709-735. 2018.

MANGRICH, A. S.; DOUMER, M. E.; MALLMANN, A. S.; WOLF, C. R. Química verde no tratamento de águas: uso de coagulante derivado de tanino de *Acacia mearnsii*. **Revista Virtual de Química**, v. 6, p. 2-15. 2014.

MASSI, L.; SOUSA, S. R.; LALUCE, C.; JAFELICCI, M. Jr. Fundamentos e Aplicação da Flotação como Técnica de Separação de Misturas. **Revista Química Nova na Escola**. N° 28, p. 20-23. 2008.

MATILAINEN, A.; VEPSÄLÄINEN, M.; SILLANPÄÄ, M.; Natural organic matter removal by coagulation during drinking water treatment: a review. **Advances in Colloid and Interface Science**, v. 159, n. 2, p. 189-197. 2010.

MEZZARI, M. P.; SILVA, M. L. B.; PIROLI, M.; PERAZZOLI, S.; STEINMETZ, R. L. R.; NUNES, E. O.; SOARES, H. M. Assessment of a tannin-based organic polymer to harvest *Chlorella vulgaris* biomass from phycoremediation process treating swine wastewater digestate. **Water Science & Technology**, v. 70, n. 5, p. 888-894. 2014.

NICOLAU, R. H. G.; FURUYA, D. E. G.; SILVA L. M. S. e.; PAZ, G. J. da. Utilização do Tanfloc SG como auxiliar de coagulação do policloreto de alumínio no tratamento de água bruta do Rio Santo Anastácio. **Colloquium Exactarum**, v. 10, n.4, p.77-83. 2018.

OLIVEIRA, A. M. B. M.; COELHO, L. F. O.; ALMEIDA, E. B. L.; ALMEIDA, A. S. O.; ARAGÃO, M. C.; NETO, J. C. O potencial do processo de fotocatalise heterogênea consorciado à adsorção para o tratamento de água com *Microcystis aeruginosa* e seus metabólitos. Artigo técnico. **Revista DAE**, v. 69, n. 228, p. 76-88. 2021.

OLIVEIRA, G. A. **Remoção de cianobactérias de águas por processo de flotação por ar dissolvido**. 2016. 78 p. Dissertação. Curso de Pós-graduação em Engenharia Ambiental. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2016.

OLIVEIRA, J. M. B. **Remoção de *Cylindrospermopsis raciborskii* por meio de sedimentação e flotação: avaliação em escala de bancada**. 2005. 141 f. Dissertação (Mestrado em Tecnologia Ambiental e Recursos Hídricos) – Faculdade de Tecnologia. Universidade de Brasília. Brasília, 2005.

OMETTO, F.; POZZA, C.; WHITTON, R.; SMYTH, B.; TORRES, A.G.; HENDERSON, R.K.; JARVIS, P.; JEFFERSON, B.; VILLA, R. The impacts of replacing air bubbles with microspheres for the clarification of algae from low cell density culture. **Water Research**, v. 53, p. 168-179. 2014.

PAVANELLI, G. **Eficiência de diferentes tipos de coagulantes na coagulação, floculação e sedimentação de água com cor ou turbidez elevada**. 2001. 216 f. Dissertação (Mestrado em Hidráulica e Saneamento) - Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de Paulo. São Carlos, 2001.

PERNITSKY, D.; EDZWALD, J. Selection of alum and polyaluminum coagulants: principles and applications. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, v. 55, n. 2, p. 121-141. 2006.

PERNITSKY, D.; EDZWALD, J. Solubility of polyaluminium coagulants. *Journal of Water Supply: Research and Technology - AQUA*, v. 52, n. 6, p. 395-406. 2003.

RICHTER, CARLOS A. **Água: Métodos e Tecnologia de Tratamento. 1ª ed.** Blucher. p. 100-149. São Paulo, 2009.

ROZAINYA, M. R.; HASIFA, M.; SYAFALNYB, P.; PUGANESHWARYA, A. A. Combination of Chitosan and Bentonite as Coagulant Agents in Dissolved Air Flotation. *APCBEE Proc.*, v. 10, p. 229-234. 2014.

SÁNCHEZ-MARTÍN J.; GONZÁLEZ-VELASCO M.; BELTRÁN-HEREDIA, J. *Acacia mearnsii* de wild tannin-based flocculant in surface water treatment. *Journal of Wood Chemistry and Technology*, v. 29, n. 2, p. 119-135. 2009.

SANTIAGO, L. M. **Remoção de células de cianobactérias por processos de sedimentação e flotação por ar dissolvido: avaliação em escala de bancada.** 2008. 183 f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) – Universidade Federal de Minas Gerais. Belo Horizonte, 2008.

SCHMIDT, W.; HAMBSCH, B.; PETZOLDT, H. Classification of algogenic organic matter concerning its contribution to the bacterial regrowth potential and by-products formation, *Water Science and Technology*, v. 37, n. 2, pp. 91-96. 1998.

SENEDA, R. M.; GARCIA, G. F.; REIS, A. G. Cinética da floculação: um estudo comparativo no uso do cloreto de polialumínio com alta e baixa basicidade e o sulfato de alumínio. Artigo Técnico. *Eng. Sanit. Ambiental*, v. 26, n. 2, p. 283-290. 2021.

SHEN, Q.; ZHU, J.; CHENG, L.; ZHANG, J.; ZHANG, Z.; XU, X. Enhanced algae removal by drinking water treatment of chlorination coupled with coagulation. *Desal.*, v. 271, n. 1-3, pp. 236-240. 2011

SØNDERGAARD, M.; BJERRING, R.; JEPPESEN, E. Persistent internal phosphorus loading during summer in shallow eutrophic lakes. *Hydrobiology*, v. 710, n. 1, p. 95-107. 2013.

SOUSA, S. R.; OLIVEIRA, K. F.; SOUZA, C. S.; KILIKIAN, B. V.; LALUCE, C. Yeast flotation viewed as the result of the interplay of supernatant composition and cell-wall hydrophobicity. **Colloid and Surfaces B: Biointerfaces**, v. 29, p. 309-319. 2003.

TEIXEIRA, M. R., ROSA, M. J. Integration of dissolved gas flotation and nanofiltration for *M. aeruginosa* and associated microcystins removal. **Water Research**, v. 40, p. 3612- 3620. 2006a.

TEIXEIRA, M. R., ROSA, M. J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa* Part I: The key operating conditions. **Sep. Purif. Technol.**, v. 52, p. 84-94. 2006b.

TEIXEIRA, M. R., ROSA, M. J. Comparing dissolved air flotation and conventional sedimentation to remove cyanobacterial cells of *Microcystis aeruginosa* Part II: The effect of water background organics. **Sep. Purif. Technol.**, v. 53, p. 126-134. 2007.

TESSELE, F.; ROSA, J. J.; RUBIO, J. Os avanços da flotação no tratamento de águas, esgotos e efluentes. **Saneamento Ambiental**, n. 102, p. 30-36. 2004.

TU, L.; JAROSCH, K. A.; SCHNEIDER, T.; GROSJEAN, M. Phosphorus fractions in sediments and their relevance for historical lake eutrophication in the Ponte Tresa basin (Lake Lugano, Switzerland) since 1959. **The Science of the Total Environment**, v. 685, p. 806-817. 2019.

VALVERDE, K. C.; PACCOLA, E. A. S.; POMINI, A. M.; YAMAGUCHI, N. U.; BERGAMASCO, R. Combined water treatment with extract of natural *Moringa oleifera* Lam and synthetic coagulant. Articles. **Rev. Ambient. Água**, v. 13, n. 3, e2135. 2018.

VAN APELDOORN, M. E.; VAN EGMOND, H. P.; SPEIJERS, G. J.; BAKKER, G. J. Toxins of cyanobacteria. **Mol. Nutr. Food Res.**, v. 51, n. 1, p. 7-60. 2007.

WEI, N.; ZHANG, Z.; LIU, D.; WU, Y.; WANG, J.; WANG, Q. Coagulation behavior of polyaluminum chloride: Effects of pH and coagulant dosage. **Chinese Journal of Chemical Engineering**, v. 23, n. 6, p. 1041-1046. 2015.

WIEGAND, M. C.; PIEDRA, J. I. G.; ARAÚJO, J. C. Vulnerabilidade à eutrofização de dois lagos tropicais de climas úmido (Cuba) e semiárido (Brasil). **Eng. Sanit. Ambient.**, v. 21, n. 2, p. 415-424. 2016.

WOJCIECHOWSKI, J. **Efeitos da Temperatura, Fósforo e Luz no crescimento da cianobactéria *Cylindrospermopsis raciborskii* (Woloszynska) Seenayya et Subba Raju do reservatório de Alagados, Paraná.** 2013. 111 f. Dissertação (Mestrado em Botânica). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2013.

WU, C.D.; XU, X.J.; LIANG, J.L.; WANG, Q.; DONG, Q.; LIANG, W.L. Enhanced coagulation for treating slightly polluted algae-containing surface water combining polyaluminum chloride (PAC) with diatomite. **Desal.**, v. 279, pp. 140–145. 2011.

YIN, C. Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, v. 45, p. 1437-1444. 2010.

YUHENG, W.; SHENGGUANG, Z.; NA, L.; YIXIN, W. Influences of various aluminum coagulants on algae floc structure, strength and flotation effect. **Proc. Envir. Sci.**, v. 8, pp. 75–80. 2011.

ZHANG, Z. *et al.* Hydrolysis of polyaluminum chloride prior to coagulation: Effects on coagulation behavior and implications for improving coagulation performance. **Journal of Environmental Sciences**, v. 57, p. 162-169. 2017.

APÊNDICE A

Tabela 2A - Relação dos valores de medição da Água do Passaúna, Água do Passaúna contendo células de *M. aeruginosa*, e média dos resultados referentes às triplicatas

Ensaio: triplicata PAC (16 mg/L) – média										
	pH	T. (uT)	R. (%)	D. pad.	Cor (uH)	R. (%)	D. pad.	D. Cel. (cél/mL)	R. (%)	D. pad.
Água Passúna	8,06	30,3	-	-	159	-	-	-	-	-
Água Passúna + Cultivo	8,33	37,8	-	-	239	-	-	5,50×10 ⁵	-	-
Pós-tratamento	7,82	4,39	87,1	0,155	20	91,6	5	3,12×10 ⁴	94,3	0,13×10 ⁴
Pós filtração	7,70	0,51	96,0	0,049	12	95,0	3	1,17×10 ⁴	96,7	0,14×10 ⁴
Ensaio: triplicata Tanfloc SG (8 mg/L) - média										
Pós-tratamento	8,06	4,89	88,4	0,278	37	84,7	4	3,17×10 ⁴	94,2	0,13×10 ⁴
Pós filtração	7,98	1,53	98,7	0,038	14	94,1	2	1,83×10 ⁴	97,9	0,14×10 ⁴
Ensaio: triplicata Tanfloc:PAC - média										
25:75 (2:12 mg/L)	8,01	4,55	88,0	0,200	39	83,7	3	2,00×10 ⁴	96,4	0,12×10 ⁴
50:50 (4:8 mg/L)	7,99	3,89	89,7	0,160	32	86,6	5	1,75×10 ⁴	96,8	0,23×10 ⁴
75:25 (6:4 mg/L)	7,98	3,09	91,8	0,154	25	89,5	3	1,50×10 ⁴	97,3	0,15×10 ⁴
25:75 F	7,90	0,57	98,5	0,045	12	95,0	1,4	0,50×10 ⁴	99,1	0,14×10 ⁴
50:50 F	7,95	0,59	98,4	0,040	15	93,7	1,8	0,55×10 ⁴	99,5	0,11×10 ⁴
75:25 F	7,98	0,46	98,8	0,043	19	92,1	2	0,75×10 ⁴	98,6	0,17×10 ⁴

Nota: T. (uH), representação de turbidez (uH); R. (%), remoção percentual; D. pad., desvio padrão; D. cel. (cels/mL), densidade celular; F, pós filtração.

Fonte: Autoria própria