

**CIEA**

Congresso Internacional de Engenharia Ambiental  
&

**10ª REA**

Reunião de Estudos Ambientais

**ANAIS**

Artigos Completos

- VOLUME 5 -

**Fontes de Energias Renováveis e  
Novas Possibilidades de Aplicação**

**&**

**Sistemas Sustentáveis e Aplicação Prática**

**&**

**Sistemas de Tratamento de Efluentes Líquidos e Inovação**



***Organizadores***

Cristiano Poletto

Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves

Guilherme Fernandes Marques

José Gilberto Dalfré Filho

**ANAIS do Congresso Internacional de  
Engenharia Ambiental & 10ª Reunião de  
Estudos Ambientais  
Artigos Completos**

- VOLUME 5 -

**Fontes de Energias Renováveis e  
Novas Possibilidades de Aplicação**

**&**

**Sistemas Sustentáveis e Aplicação Prática**

**&**

**Sistemas de Tratamento de Efluentes Líquidos e  
Inovação**



Gráfica & Editora

Toledo – PR

2020

**Copyright © 2020, by Editora GFM.**

Direitos Reservados em 2020 por **Editora GFM.**

**Editoração:** Cristiano Poletto

**Organização Geral da Obra:** Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho

**Diagramação:** Juliane Fagotti

**Revisão Geral:** Espaço Histórico e Ambiental

**Capa:** Eventos Consulting Design Informática

**CIP-Brasil. Catalogação na Fonte**

---

Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho (Organizadores)

ANAIS do Congresso Internacional de Engenharia Ambiental & 10ª Reunião de Estudos Ambientais – Artigos Completos – Volume 5 – Fontes de Energias Renováveis e Novas Possibilidades de Aplicação & Sistemas Sustentáveis e Aplicação Prática & Sistemas de Tratamento de Efluentes Líquidos e Inovação / Cristiano Poletto; Julio Cesar de Souza Inácio Gonçalves; Guilherme Fernandes Marques; José Gilberto Dalfré Filho (Organizadores) – Porto Alegre, RS: Editora GFM, 2020.

817p.: il.;

ISBN 978-65-87570-06-8

CDU 502.3/.7

***É AUTORIZADA a livre reprodução, total ou parcial, por quaisquer meios,  
sem autorização por escrito da Editora ou dos Organizadores.***

---



## REMOÇÃO DE FÓSFORO DE EFLUENTE DOMÉSTICO, BRUTO E TRATADO, UTILIZANDO QUATRO DIFERENTES COAGULANTES: CLORETO FÉRRICO, POLICLORETO DE ALUMÍNIO, SULFATO DE ALUMÍNIO E TANFLOC SG

| ID 15697 |

1Vinícius Duarte Soroka, 2Antônio Carlos De Oliveira Martins Júnior, 3José Carlos Alves Barroso Júnior, 4Maria Cristina de Almeida Silva

1Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: [vinicius.soroka@ufrgs.br](mailto:vinicius.soroka@ufrgs.br); 2Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: [antoniocomjr@gmail.com](mailto:antoniocomjr@gmail.com); 3Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: [jrzenite@gmail.com](mailto:jrzenite@gmail.com); 4Instituto de Pesquisas Hidráulicas, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, e-mail: [maria.almeida@ufrgs.br](mailto:maria.almeida@ufrgs.br)

### | RESUMO |

As estações de tratamento de esgoto doméstico (ETEs) são a maior fonte emissora de fósforo, sendo responsáveis por 30 a 50% da poluição total em decorrência desse elemento. Apesar de indispensável para a manutenção da vida, o excesso de fósforo nos ecossistemas aquáticos promove eutrofização e outros desequilíbrios ecológicos, além de reduzir a qualidade da água. Ademais, esse elemento possui alta tendência à sedimentação e suas reservas são finitas e não renováveis, de modo que o aperfeiçoamento e otimização de técnicas que possibilitem a retenção e reuso do fósforo proveniente de efluentes são de grande valia, tanto do ponto de vista ambiental quanto mercadológico. Um dos métodos mais efetivos e amplamente empregados à remoção de fósforo de efluentes é o de coagulação-floculação, no qual um agente coagulante é adicionado ao efluente sob alta agitação, seguido de etapas de mistura lenta que permitam a formação de coágulos, agregação desses para formação de flocos e finalmente separação sólido-líquido por sedimentação. Apesar da ampla gama de estudos sobre o tema, no cotidiano das estações de tratamento de efluentes, pouca atenção é dispensada a critérios analíticos na escolha do coagulante a ser utilizado e raramente a remoção de fósforo é um deles. Nesse contexto, o presente estudo buscou avaliar o índice de remoção de fósforo utilizando jar tests com quatro diferentes coagulantes, cloreto férrico, policloreto de alumínio (PAC), sulfato de alumínio e Tanfloc SG, variando a dose de 10 a 125 mg/L, utilizando o efluente da ETE São João Navegantes, em Porto Alegre-RS, como modelo. Conjecturando alterações no funcionamento de uma ETE que poderiam ser adotadas para otimizar a remoção de fósforo, pode-se conceber dois cenários para a intervenção: na chegada do efluente bruto, no início do tratamento; e na saída do efluente final, após o tratamento convencional já ter sido concluído. Levando isso em consideração, os coagulantes foram testados para tratamento tanto do efluente bruto quanto do efluente final da ETE. Além da concentração de fósforo total, foram monitorados também os parâmetros pH, turbidez, demanda química de oxigênio (DQO) e formação de lodo. De acordo com nossos resultados, o coagulante Tanfloc SG, por adicionar turbidez e carga orgânica ao efluente, se mostrou inadequado em doses acima de 25 mg/L para efluentes clarificados, nos quais também obteve baixa remoção de fósforo, mas nessa mesma dose foi muito efetivo para remoção de turbidez do efluente bruto, além de ser, entre as substâncias testadas, a que menos perturbou o pH do efluente. Todos os coagulantes testados obtiveram boa remoção de DQO na dose de 10 mg/L, acima da qual o aumento na dosagem não gerou incremento proporcional na remoção de matéria orgânica. Os três coagulantes inorgânicos foram capazes de reduzir a concentração de fósforo do efluente final



da ETE a abaixo dos limites detectáveis, mas obtiveram resultados mistos no efluente bruto. PAC e sulfato de alumínio perturbaram comparavelmente o pH, enquanto o cloreto férrico proporcionou a maior acidificação, especialmente no efluente final da ETE.

**Palavras-chave:** remoção de fósforo; tratamento de efluente; esgoto doméstico.

## | INTRODUÇÃO |

Ao longo das últimas décadas, principalmente em consequência do aumento do uso de fertilizantes, mas também da intensificação de outras atividades agrônômicas, industriais e urbanas, os níveis de nutrientes como nitrogênio e fósforo têm aumentado exacerbadamente em muitos corpos hídricos, inclusive naqueles afastados de áreas povoadas (Mourad, D. e van der Perk, M., 2004). Apesar do fósforo ser um elemento atóxico e essencial à vida, em altas concentrações ele é capaz de induzir rápida reprodução algal (i.e, eutrofização), levando à diminuição dos níveis de oxigênio dissolvido e, portanto, à deterioração da qualidade da água (de Quevedo, C. M. G. e Paganini, W. S., 2017).

As maiores fontes poluentes de fósforo são estações de tratamento de esgoto doméstico, representando de 30 a 50% do total de emissões desse elemento, de forma que o controle de suas liberações é essencial à prevenção da eutrofização de águas de superfície e à manutenção das propriedades da água (Yang, K. et al., 2010). Assim, há mais de 60 anos, processos químicos e biológicos vêm sendo testados para a remoção de fosfatos de efluentes (Sawyer, C. N. e Owen R., apud. Lea, W. L. et al., 1954).

Entretanto, frente ao crescimento econômico exponencial associado ao uso indiscriminado de recursos (Ward, J. D. et al., 2016), uma preocupação é emergente: a possibilidade da escassez de fósforo devido à sua natureza finita, não renovável e de alta dissipação, e o consequente aumento do custo produtivo de alimentos (Scholz, R. W. et al., 2013). Nesse sentido, apesar de, em termos de tratamento, o interesse primário permanecer na remoção do fósforo, tornam-se especialmente atrativas operações que permitam também a sua recuperação e aproveitamento.

Alguns dos processos químicos mais eficientes e bem consolidados para tratamento de efluentes são os de coagulação-floculação. Apesar de geralmente constituírem operações sequenciais e dos termos frequentemente serem utilizados de forma intercambiável, há diferenças importantes: a coagulação diz respeito à redução das forças repulsivas entre as partículas, a partir da neutralização de cargas, o que permite que elas se aglomerem; já a floculação se refere à atração dos coágulos, combinando-os em agregados maiores, macroscópicos, o que facilita consideravelmente a





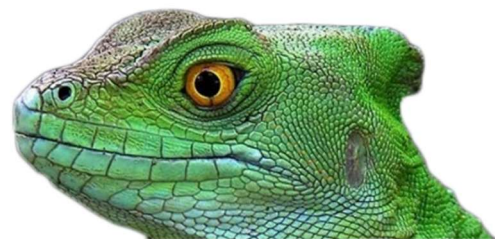
separação desses sólidos (Zhang, R. H. e Lei, F., apud. Krumpelman, B. W. et al., 2005), geralmente através de flotação ou, mais comumente para efluentes domésticos, sedimentação. Na execução desses procedimentos, há duas preocupações fundamentais: desempenho e eficiência. Por um lado, deseja-se atingir elevadas taxas de remoção e, por outro, realizar o processo o mais rapidamente o possível e utilizando a menor quantidade de insumo necessária.

A resolução CONSEMA nº 355/2017, que dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul, estabelece que a concentração de fósforo final para lançamento não pode ser superior a 4 mg/L, para vazões de descarga inferiores a 100 m<sup>3</sup>/dia, e 1 mg/L, para vazões até 10.000 m<sup>3</sup>/dia, ou, alternativamente, deve-se atingir eficiência de remoção de 75%.

Essas concentrações ficam muito aquém das habitualmente obtidas nas etapas adotadas convencionalmente no tratamento de efluentes, mais especificamente esgotos domésticos. O mesmo pode-se dizer da eficiência de 75%, dificilmente obtida nos processos corriqueiros. Isso se deve, em parte, à atualidade da resolução, que implementou os novos padrões há menos de cinco anos, de modo que ainda não foi transcorrido o tempo necessário para adequação universal, mas também aos critérios semiempíricos geralmente adotados nas ETEs: cada estação, de acordo com as características do seu próprio efluente bruto, bem como das instalações e equipamentos especificamente disponíveis, define os procedimentos a serem empregados, coagulantes e doses utilizadas, tempo de retenção hidráulico e assim por diante.

Os métodos analíticos necessários para determinação da concentração de fósforo (Standard Methods, 4500-P Phosphorus, 2017) são delicados, requerendo vidraria apropriadamente tratada em ácido sulfúrico, digestão das amostras e técnicas avançadas como cromatografia, eletroforese capilar ou espectrofotometria, dificultando que ETEs disponham *in situ* de técnicas de análise. Assim, a avaliação dos níveis de fósforo, tanto pré quanto pós-tratamento, tem sido historicamente negligenciada.

A coagulação é uma das operações unitárias mais comumente utilizadas nos processos de tratamento de água e efluentes. Isto se deve, fundamentalmente, à sua elevada efetividade na remoção de matéria orgânica e atrativa relação custo-benefício, entre outras vantagens, que levaram à sua adoção como processo de tratamento de efluentes há mais de um século (Jiang, J., 2015). Entretanto, a seleção do coagulante e dose adequada a cada efluente e planta de tratamento específico não é trivial: doses maiores podem atingir eficiências superiores, mas, ao mesmo tempo, elevar a condutividade do efluente ou a produção de lodo contendo substâncias tóxicas (Aragonés-Beltrán, P. et al., 2008).



Assim, o uso do teste de jarros (*jar test*) tem sido amplamente adotado em bancadas de testes, como alternativa a ensaios mais dispendiosos em escala piloto, para avaliação da operação de plantas de tratamento. Além de rápidos e econômicos, os dados obtidos através de jar tests possuem excelente poder de previsão, possibilitando intervenções no design e operação de estações de tratamento (Hudson Jr., H. E. e Wagner, E. G., 1981). Com esse método, é possível variar parâmetros na coagulação (e.g. diferentes coagulantes em diferentes dosagens) e identificar que tipo de impacto isso terá no tratamento. Pode-se, ainda, utilizá-lo como ferramenta no dimensionamento de estações e ajuste de métodos de tratamento.

Nesse contexto, o presente estudo teve como objetivo principal a avaliação, empregando jar tests, do potencial de remoção de fósforo de quatro diferentes coagulantes, monitorando também os parâmetros pH, turbidez e demanda química de oxigênio.

## | MATERIAL E MÉTODOS |

### **Coagulantes utilizados, dosagem e ensaios preliminares**

Foram utilizados três coagulantes inorgânicos, cloreto férrico, policloreto de alumínio e sulfato de alumínio, além do coagulante orgânico Tanfloc SG (Tanac), todos regularmente empregados em tratamentos convencionais de efluentes. A partir de ensaios preliminares com efluente sintético (fosfato a 5 mg/L em água deionizada, pH = 7), foram delimitadas as doses dos coagulantes: 10, 25, 50, 75, 100 e 125 miligramas de coagulante por litro de efluente.

### **Coleta e processamento do efluente**

O efluente utilizado nos testes é oriundo da Estação de Tratamento de Esgoto São João Navegantes (Alameda Três, 159-263, Farrapos, Porto Alegre-RS), coletado em dois pontos de amostragem, na entrada da estação (denominado “bruto”) e ao final do tratamento (“tratado” ou “efluente final da ETE”). As coletas foram realizadas em cinco diferentes dias, entre janeiro e fevereiro de 2020, e as amostras acondicionadas em bombonas plásticas para análises no mesmo dia. Como o esgoto doméstico é uma matriz complexa (Queiroz, F. B. et al., 2014) cujas características são dinâmicas e variáveis ao longo tempo, as coletas sempre foram efetuadas no início da manhã, para que as análises pudessem ser concluídas preferencialmente até o final do mesmo dia.



## **Teste de jarros**

Três equipamentos agitadores foram utilizados para os jar tests: Velp modelo F.6/S, PoliControl modelo Floc Control e Alfa Tecnoquímica modelo AT – 700. Na etapa de mistura rápida, a velocidade empregada foi de 120 rotações por minuto durante dois minutos, seguida de 70, 50 e 30 rpm, durante 10 minutos em cada rotação. Ao término da agitação, aguardou-se aproximadamente duas horas, para que a mistura sedimentasse, antes de proceder às demais análises.

## **Parâmetros analisados**

Os parâmetros avaliados antes e após o tratamento foram pH (Denver Instrument UB-10), turbidez (Turbidímetro Hach 2100N), demanda química de oxigênio (Standard Methods 5220 C.), fósforo total (Standard Methods 4500-P D.) e taxa de sedimentação (utilizando ensaio em cone Imhoff). As análises de DQO e fósforo foram ensaiadas em duplicata técnica. Devido ao número amostral limitado, os dados ainda não foram avaliados estatisticamente e gráficos de colunas foram utilizados para representação dos resultados parciais. A eficiência de remoção foi calculada como o valor inicial do parâmetro (fósforo, DQO ou turbidez) menos o valor final, após o tratamento, dividido pelo valor final vezes 100, expresso em porcentagem. Um gráfico de radar foi utilizado para comparação qualitativa dos diferentes coagulantes nos quatro parâmetros analisados: para o melhor desempenho, foi atribuída nota quatro e, para o pior, nota um; substâncias com desempenhos semelhantes receberam a mesma nota.

## **| RESULTADOS E DISCUSSÃO |**

### **Turbidez e pH**

Um dos fatores fundamentais na escolha do coagulante a ser empregado é a magnitude da interferência da sua adição no pH do efluente. A tendência geral é que haja acidificação do meio frente à adição da maioria dos coagulantes. Entretanto, o ponto ótimo de coagulação se dá próximo ao pH neutro, de forma que, caso haja perturbação excessiva do pH pela adição do coagulante, pode ser necessária a adição de bases e/ou tampões para manter a eficiência do processo, implicando em aumento de operações e custos do tratamento.





Além disso, com a diminuição do pH, a solubilidade de metais como ferro, cobre e níquel é aumentada (Mukherjee, A., 2004), o que pode favorecer a dispersão de contaminantes. Assim, é interessante a seleção de uma substância que, na faixa de concentração utilizada, altere suficientemente pouco o pH para que não haja a necessidade de correções.

Os resultados de variação do pH e remoção da turbidez após diferentes doses dos coagulantes testados estão representados na Figura 1, para o tratamento feito no esgoto bruto, e na Figura 2, quando o efluente final da ETE que é tratado.

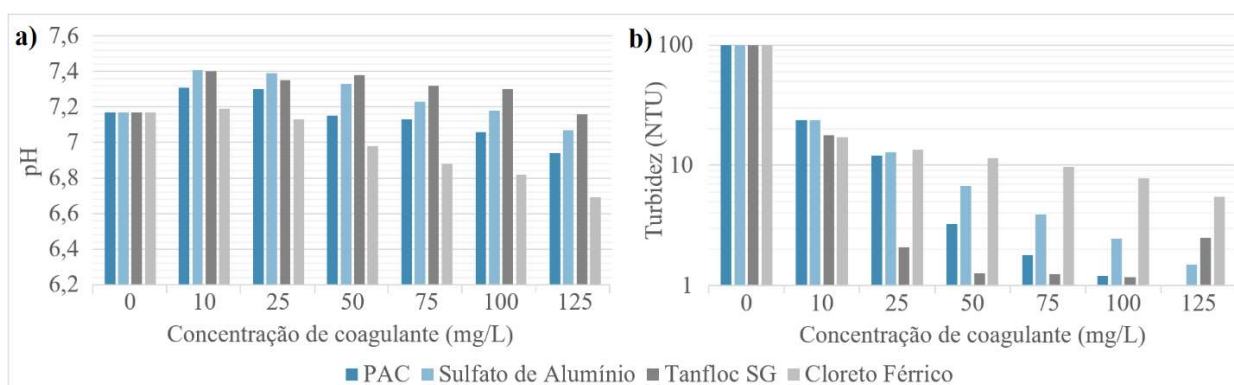


Figura 1: Variação do pH (a) e redução da turbidez (b) do efluente bruto após ser tratado com 10 a 125 mg/L dos diferentes coagulantes testados. Em b), optou-se por representar a escala de turbidez como logarítmica, para facilitar a visualização

Conforme esperado, foi verificada uma tendência geral de acidificação com o aumento da dose dos coagulantes, observada especialmente com a adição de cloreto férrico. A exceção foi o coagulante orgânico, Tanfloc SG, que produziu uma pequena tendência de aumento no pH, sugerindo que, nos contextos em que a correção de pH é impraticável, ele pode ser uma alternativa viável em substituição ou complemento a outras substâncias com maior tendência de acidificação, como é por exemplo o caso do cloreto férrico. Diferente do que é muitas vezes anedoticamente relatado, o PAC não se mostrou superior ao sulfato de alumínio nesse quesito, tendo demonstrado inclusive desempenho um pouco inferior. É possível, entretanto, que o jar test falhe em reproduzir o cenário da ETE no qual tem se observado menor necessidade de correção do pH quando o PAC é utilizado em substituição ao sulfato de alumínio.

Em relação à turbidez, houve semelhante eficiência de remoção quando dosados até 10 mg/L de qualquer um dos coagulantes. Porém, a partir de 25 mg/L, há grande destaque para a ação do Tanfloc SG frente às demais substâncias. À exceção dele na dose de 125 mg/L, para todos os demais produtos se observou redução da turbidez com o aumento da concentração. No caso do cloreto férrico, a dose de 10 mg/L obteve grande eficiência na diminuição da turbidez e, a partir daí, houve



pouco ganho com o incremento da dose. Isso pode ser explicado, pelo menos parcialmente, pelo fato de que ambas as substâncias, cloreto férrico e Tanfloc SG, possuem coloração intensa, de forma que a partir de algum ponto a redução da turbidez no efluente passa a ser inferior ao efeito gerado pela impregnação de cor no mesmo.

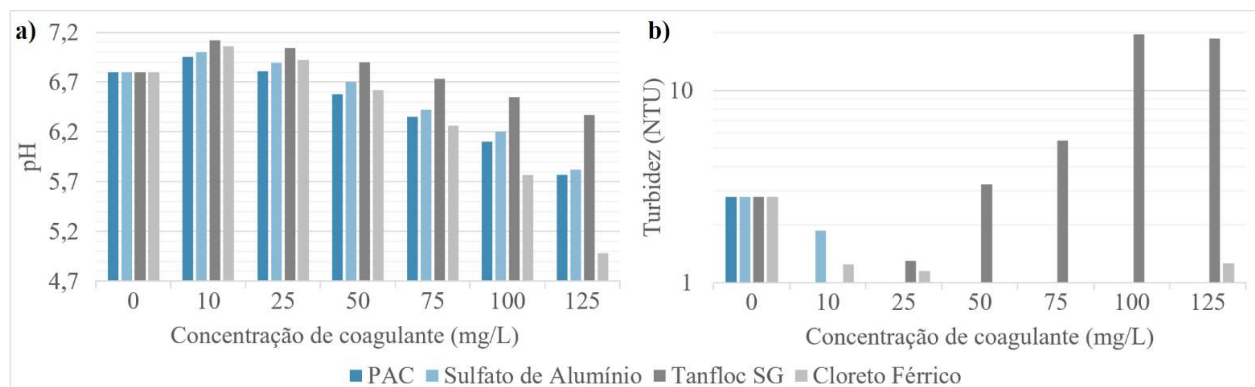


Figura 2: Variação do pH (a) e redução da turbidez (b) do efluente final da ETE tratado com 10 a 125 mg/L dos diferentes coagulantes testados. Em b), optou-se por representar a escala de turbidez como logarítmica, para facilitar a visualização

Quando o tratamento é realizado no efluente final da ETE (Figura 2), notam-se algumas peculiaridades. O efeito de adição de turbidez do Tanfloc SG é pronunciado em doses acima de 75 mg/L, mas não se observa o mesmo para o cloreto férrico, possivelmente porque ele permanece solúvel nessa condição. Entretanto, vale notar que o efluente em questão se trata do efluente bruto após tratamento convencional na ETE, já atendendo ao padrão de potabilidade de turbidez (inferior a 5 NTU). A variação observada no pH foi superior à do efluente bruto, o que já era esperado, uma vez que após o tratamento convencional grande parte da matéria orgânica é removida, reduzindo a capacidade tamponante do meio. Portanto, fica claro que técnicas de coagulação para remoção de fósforo voltadas ao efluente final devem resguardar atenção primordial ao efeito de alteração do pH promovido pelos diversos coagulantes, cenário no qual o Tanfloc SG tem destaque, mas, considerando a adição de turbidez, apenas em doses de até 25-50 mg/L.

### **Demanda Química de Oxigênio (DQO)**

A demanda química de oxigênio tem sido utilizada historicamente como critério fundamental em análises de avaliação da qualidade da água, assim como do nível de poluição em diversos corpos hídricos (Li, J. e He, L. et al., 2018). Esse parâmetro tem significância para a remoção de fósforo, pois a matéria orgânica age como repositório desse elemento químico. Assim como não há matéria



orgânica desprovida de fósforo, é difícil imaginar um método de tratamento que atinja alta remoção de fósforo, mas não de DQO. Neste trabalho, em relação à DQO, verificou-se que as doses mais vantajosas foram as de 10 a 25 mg/L, para todos os coagulantes testados, tanto no efluente bruto quanto no final da ETE (Figura 3.a e Figura 3.b, respectivamente).

Como o Tanfloc SG é uma substância orgânica, era de se esperar um aumento da carga orgânica em decorrência da sua adição, o que de fato foi observado, em especial no efluente final da ETE. Isso sugere que doses elevadas de Tanfloc podem ser pouco indicadas, principalmente nos casos em que a carga orgânica inicial do efluente é baixa, pois sua adição é capaz de elevar consideravelmente o nível da demanda de oxigênio. Considerando que a legislação estadual estipula limites para DQO de 150 mg/L, em empreendimentos com elevado volume de descarga, fica evidente a dificuldade que uma grande estação de tratamento pode ter para atingir essa meta. De acordo com os resultados obtidos, nenhum coagulante foi capaz de reduzir a DQO do esgoto bruto a menos de 150 mg/L, o que só foi atingido no tratamento do efluente final, com Tanfloc SG a 10 ou 25 mg/L, ou os demais coagulantes inorgânicos em qualquer dose.

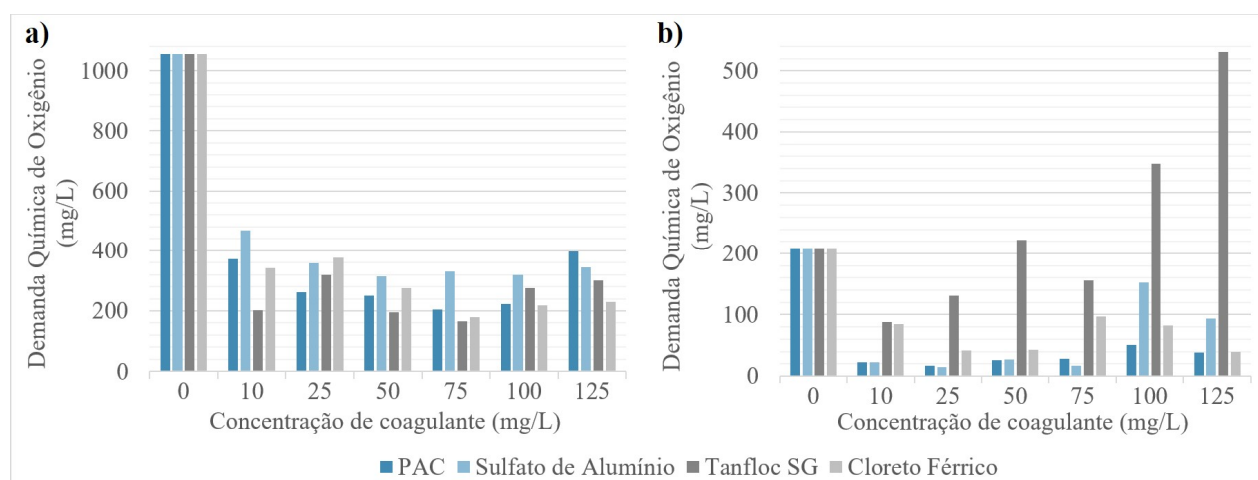


Figura 3: Alteração da DQO do efluente bruto (a) e final da ETE (b) tratados com 10 a 125 mg/L dos diferentes coagulantes testados

### Remoção de fósforo

Para o efluente bruto (Figura 4.a), as maiores taxas de remoção de fósforo foram atingidas com 100 mg/L de PAC e 125 mg/L de sulfato de alumínio. O Tanfloc SG se demonstrou um dos menos eficazes na remoção do fósforo, tendo atingido em torno de 50 a 60% de remoção na sua melhor dose, de 50 mg/L. Não foi atribuída significância à altíssima remoção que o cloreto férrico obteve em 10 mg/L, pois a dose de 25 mg/L não pode ser determinada e, a partir de 50 mg/L, não se observou a mesma tendência. Além disso, no efluente final da ETE (Figura 4.b) e dose de 10 mg/L, o cloreto



férrico obteve baixo desempenho, retirando do efluente menos de 50% do fósforo. Entretanto, a partir de 25 mg/L, todos os coagulantes inorgânicos atingiram remoção superior a 99%.

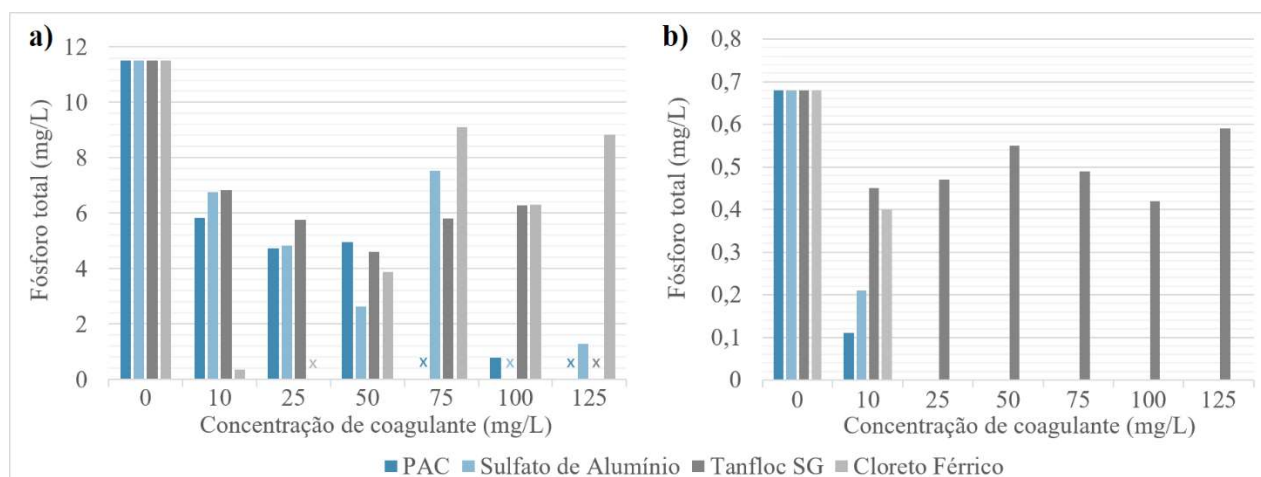


Figura 4: Concentração de fósforo total do efluente bruto (a) e final da ETE (b) tratados com 10 a 125 mg/L dos diferentes coagulantes testados. Os resultados dos pontos assinalados com "x" não puderam ser determinados consistentemente até o momento

Cabe ressaltar que a legislação brasileira, que estipula limites de 1 a 4 mg/L, ainda é muito branda em relação à concentração máxima de fósforo permitida para descarga do efluente. Na China, o máximo tolerado é de 0,5 mg/L (Zou, H. e Wang, Y., 2016), enquanto na Europa e nos Estados Unidos os limites podem chegar a 0,01 e 0,05 mg/L, respectivamente (Keeley, J. et al., 2016). Além disso, mais de 34 milhões de brasileiros não tem acesso à rede coletora de esgoto, sendo cerca de 6,3 milhões apenas na região sul do país (PNSB-IBGE, 2008). Portanto, não só há a tendência do limite de concentração de fósforo nos efluentes se tornar mais rigoroso nos próximos anos, como também o volume que precisará ser tratado pelas ETEs será superior, conforme os serviços de saneamento básico se tornam disponíveis às populações mais vulneráveis, atualmente sem acesso. Nesse contexto, apenas o tratamento do efluente final com coagulantes inorgânicos e em doses a partir de 25 mg/L foi plenamente satisfatório. Em menor grau, pode-se também destacar a atuação do PAC e do sulfato de alumínio, no efluente bruto, nas doses altas de 100 e 125 mg/L, respectivamente.

### Diferenças entre o efluente bruto e o efluente final da ETE

Algumas diferenças fundamentais podem ser destacadas no tratamento do efluente bruto e final da ETE. Enquanto, no efluente final, altas taxas de remoção foram atingidas com todos os coagulantes inorgânicos em dose a partir de 25 mg/L, feito semelhante no esgoto bruto (remoção >90%) só foi





observado aplicando PAC e sulfato de alumínio em doses elevadas. O Tanfloc SG foi o produto com menor eficiência global e performou melhor no efluente bruto, ao qual seu uso é realmente mais indicado. Na Figura 5, os quatro coagulantes foram classificados qualitativamente pelos seus desempenhos nos parâmetros avaliados; quanto maior a área do polígono, mais vantajoso é o coagulante, de forma geral. Entretanto, isso não significa que, em cenários específicos, alguma das substâncias com pior avaliação não possa se mostrar superior às demais.

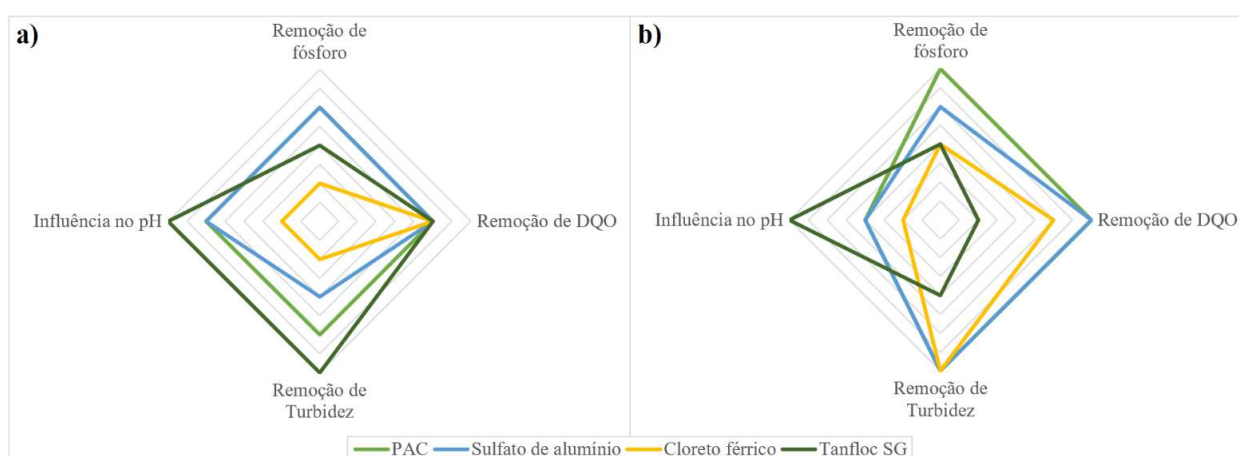


Figura 5: Desempenho de cada coagulante no efluente bruto (a) e final da ETE (b) em cada um dos parâmetros avaliados. Nota maior representa melhor desempenho – no caso da influência no pH, quanto menor a alteração, maior a nota

É evidente o melhor desempenho global, em termos de remoção de fósforo, do tratamento no efluente final da ETE, quando comparado ao bruto, e o destaque geral do PAC e do sulfato de alumínio, ambos vastamente já empregados ao tratamento de efluentes. Entretanto, esses coagulantes adicionam alumínio ao lodo formado, dificultando seu tratamento e disposição final. Isso porque o cátion metálico  $Al^{3+}_{(aq)}$  é muito reativo biologicamente, não essencial e tóxico e, apesar de raramente provocar danos de forma aguda, pouco se sabe sobre sua toxicidade crônica (Exley, C., 2016). Além disso, a segunda causa mais comum de toxicidade em plantas é devido ao excesso de alumínio, perdendo apenas para o excesso de salinidade (Vitorello, V. A., Capaldi, R. C. e Stefanuto, V. A. 2005). Como o alumínio se torna ainda mais tóxico em pH baixo (Yang, M. et al., 2015), o Tanfloc SG pode ser uma interessante alternativa, por ser um polímero orgânico e o que menos influenciou no pH. Apesar de não se destacar na remoção de fósforo, é possível que possa ser utilizado em combinação com outros coagulantes inorgânicos a fim de reduzir o conteúdo metálico remanescente no lodo.



## **Considerações finais e perspectivas**

Até o momento, em decorrência da quarentena de enfrentamento à epidemia de COVID-19, foi necessário suspender temporariamente as coletas, de forma que o número de amostras obtidas impossibilitou a realização de análise estatística apropriada. Entretanto, repetições e novos ensaios serão realizados assim que possível. Planeja-se dar sequência aos experimentos, aumentando o número amostral, para que se possa validar estatisticamente os resultados obtidos; estreitar o intervalo de dosagem nos pontos de maior interesse para cada substância; testar outros coagulantes e misturas de coagulantes; e elaborar planilhas, com o custo de cada composto químico, para auxiliar na escolha de cada tratamento também com base no custo-benefício.

## **Agradecimentos**

Agradecemos ao Departamento Municipal de Água e Esgotos (DMAE) de Porto Alegre, pela colaboração para obtenção das amostras; à Tanac pelo envio, isento de custos, de uma amostra de Tanfloc SG; às agências de fomento, a Fundação de Amparo à pesquisa do Estado do Rio Grande do Sul (FAPERGS), a Fundação de Apoio da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (FAURGS), a Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) e o Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq); e a todos os técnicos e funcionários do Laboratório de Desenvolvimento Tecnológico (LADETEC) e do Instituto de Pesquisas Hidráulicas (IPH) da UFRGS, cujo trabalho foi essencial para viabilizar esta pesquisa.

Os autores declaram ausência de conflito de interesses.

## **| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS |**

- APHA, 1998. Standard Methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association. 4500-P PHOSPHORUS, 2017.
- APHA, 1998. Standard Methods for the examination of water and waste water. American Public Health Association. 5220 CHEMICAL OXYGEN DEMAND (COD), 2017.
- Aragóns-Beltrán, P.; Mendoza-Roca, J. A.; Bes-Piá, A.; García-Melón, M.; Parra-Ruiz, E.; 2009. Application of multicriteria decision analysis to jar-test results for chemicals selection in the physical-chemical treatment of textile wastewater. Journal of Hazardous Materials, vol. 164, p. 288-295.
- CONSEMA, Resolução nº 355/2017, de 13 de julho de 2017, do Conselho Estadual do Meio Ambiente-CONSEMA. "Dispõe sobre os critérios e padrões de emissão de efluentes líquidos para as fontes geradoras





que lancem seus efluentes em águas superficiais no Estado do Rio Grande do Sul". Publicada no Diário Oficial Eletrônico do Estado do Rio Grande do Sul em 19/07/2017, Porto Alegre, RS.

Coordenação de População e Indicadores Sociais; 2010. Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008 (PNSB). Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística, 1ª ed., p. 29.

de Quevedo, C. M. G.; Paganini, W. S.; 2017. Management of phosphorus in water: case study of the Tietê River, Brazil. *Revista Ambiente & Água*, vol. 12, n. 6, p. 902-917.

Exley, C.; 2016. The toxicity of aluminum in humans. *Morphologie*, vol. 100, n. 329, p. 51-55.

Hudson Jr., H. E.; Wagner, E. G.; 1981. Conduct and uses of jar tests. *Journal American Water Works Association*, vol. 73, n. 4, p. 218-223.

Jiang, J.; 2015. The role of coagulation in water treatment. *Current Opinion in Chemical Engineering*, vol. 8, p. 36-44.

Keeley, J.; Smith, A. D.; Judd, S. J.; Jarvis, P.; 2016. Acidified and ultrafiltered recovered coagulants from water treatment works sludge for removal of phosphorus from wastewater. *Water Research*, vol. 88, p. 380-388.

Krumpelman, B. W.; Daniel, T. C.; Edwards, R. W.; McNew, R. W.; Miller, D. M.; 2005. Optimum coagulant and flocculant concentrations for solids and phosphorus removal from pre-screened dairy manure. *Applied Engineering in Agriculture*, vol. 21, n. 1, p. 127-135.

Lea, W. L.; Rohlich, G. A.; Katz, W. J.; 1954. Removal of phosphates from treated sewage. *Sewage and Industrial Wastes*, vol. 26, n. 3, p. 261-275.

Li, J.; Luo, G.; He, L.; Xu, J.; Lyu, J.; 2018. Analytical approaches for determining chemical oxygen demand in water bodies: a review. *Critical Review in Analytical Chemistry*, vol. 48, n. 1, p. 47-65.

Mourad, D.; van der Perk, M.; 2004. Modelling nutrient fluxes from diffuse and point emissions to river loads: the Estonian part of the transboundary Lake Peipsi/Chudskoe drainage basin (Russia/Estonia/Latvia). *Water Science and Technology*, vol. 49, n.3, p. 21-28.

Mukherjee, A.; Raichur, A.; Modak, J. M.; Natarajan, K. A.; 2004. Mechanisms for solubilization of cobalt, copper and nickel from Indian Ocean nodules at near neutral pH by a marine isolate. *Journal of Industrial Microbiology and Biotechnology*, vol. 31, n. 10, p. 462-468.

Queiroz, F. B.; Silva, J. C.; Aquino, S. F.; Coutrim, M. X.; Afonso, R. J. C. F.; 2014. Determination of endocrine disrupters and pharmaceuticals in sewage samples by tandem solid phase clean up/extraction and high performance liquid chromatography-negative and positive electrospray high-resolution mass spectrometry. *Journal of the Brazilian Chemical Society*, vol. 25, n. 2, p. 298-312.

Scholz, R. W.; Ulrich, A. E.; Elittä, M.; Roy, A.; 2013. Sustainable use of phosphorus: A finite resource. *Science of the Total Environment*, vol. 461-462, p. 799-803.

Vitorello, V. A.; Capaldi, F. R.; Stefanuto, V. A.; 2005. Recent advances in aluminum toxicity and resistance in higher plants. *Brazilian Journal of Plant Physiology*, vol. 17, n. 1, p. 129-143.

Ward, J. D.; Sutton, P. C.; Werner, A. D.; Constanza, R.; Mohr, S. H.; Simmons, C. T.; 2016. Is Decoupling GDP Growth from Environmental Impact Possible?. *PLoS One*, vol. 11, n. 10.

Yang, K.; Li, Z.; Zhang, H.; Qian, J.; Chen, G.; 2010. Municipal wastewater phosphorus removal by coagulation. *Environmental Technology*, vol. 31, n. 6, p. 601-609.

Yang, M.; Tan, L.; Xu, Y.; Zhao, Y.; Cheng, F.; Ye, S.; Jiang, W.; 2015. Effect of low pH and aluminum toxicity on the photosynthetic characteristics of different fast-growing Eucalyptus vegetatively propagated clones. *PLOS ONE*, vol. 10, n. 6.



Zou, H.; Wang, Y.; 2016. Phosphorus removal and recovery from domestic wastewater in a novel process of enhanced biological phosphorus removal coupled with crystallization. *Bioresource Technology*, vol. 211, p. 87-92.