



Avaliação da eficácia de coagulantes na tratabilidade da água de rio após evento de precipitação: um estudo comparativo com coagulante recuperado do lodo do decantador *Evaluation of coagulants effectiveness in treating river water after precipitation events: a comparative study with recovered clarifier sludge coagulant*

Guilherme Gavlak¹, Andressa de Andrade¹, Gabriele Monique de Andrade Setnarski¹, Lucas Eduardo Müller¹, Kely Viviane de Souza¹

¹ Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, Paraná, Brasil

Contato: eng.guilhermegavlak@gmail.com

Palavras-chave

resíduo de ETA
regeneração de coagulante
via ácida
tratamento de água
eventos pluviométricos

RESUMO

Em decorrência do avanço populacional desordenado, a qualidade da água dos mananciais tem decaído, principalmente em eventos pluviométricos, o que torna necessário realizar diversos estudos de tratabilidade. Este estudo buscou avaliar a aplicação de diferentes dosagens do coagulante recuperado do lodo do decantador na remoção de cor aparente, turbidez e pH remanescente, em comparação a outros coagulantes. Inicialmente, foi realizada a recuperação do coagulante presente no lodo por via ácida de uma estação de tratamento de água que utiliza PAC como coagulante. Posteriormente, foram testados os coagulantes PAC, sulfato de alumínio, cloreto férrico e tanino, além do coagulante recuperado, no tratamento por coagulação, floculação e sedimentação da água de um corpo hídrico após um evento pluviométrico, em equipamento Jar Test, testando as dosagens de 10, 40 e 60 mg/L. Os parâmetros avaliados foram cor aparente, turbidez e pH. O coagulante recuperado mostrou uma eficiência equivalente à do coagulante PAC na remoção da cor aparente, especialmente na dosagem de 60 mg/L, alcançando a maior eficiência entre as condições testadas. Além disso, o coagulante recuperado, na dosagem de 60 mg/L, foi tão eficaz quanto os demais coagulantes na mesma dosagem, e o sulfato de alumínio, a 40 mg/L, também mostrou eficiência equivalente, ambas sendo as condições mais eficazes para a remoção de turbidez. O pH das amostras diminuiu com o aumento da concentração de sais de alumínio e ferro como coagulantes, enquanto o uso de tanino vegetal manteve o pH da água tratada estável. Portanto, o coagulante recuperado do lodo do decantador por via ácida é eficaz no tratamento de água bruta com alta cor e turbidez, proporcionando uma aplicação útil para resíduos das ETAs.

Keywords

WTP wastes
coagulant regeneration
acid pathway
water Treatment
rainfall Events

ABSTRACT

Due to uncontrolled population growth, the quality of water from water sources has declined, especially during rainfall events, necessitating the conduct of various treatability studies. This study aimed to evaluate the application of different dosages of coagulant recovered from clarifier sludge in the removal of apparent color, turbidity, and residual pH, compared to other coagulants. Initially, the recovery of the coagulant present in the sludge was carried out via acidification from a water treatment plant that uses PAC as a coagulant. Subsequently, PAC, aluminum sulfate, ferric chloride, and tannin coagulants, along with the recovered coagulant, were tested for coagulation, flocculation, and sedimentation treatment of water from a water body after a rainfall event, using Jar Test equipment and testing dosages of 10, 40, and 60 mg/L. The parameters evaluated were apparent color, turbidity, and pH. The recovered coagulant showed efficiency equivalent to PAC in apparent color removal, especially at the dosage of 60 mg/L, achieving the highest efficiency among the tested conditions. Additionally, the recovered coagulant, at the dosage of 60 mg/L, was as effective as other coagulants at the same dosage, and aluminum sulfate, at 40 mg/L, also showed equivalent efficiency, both being the most effective conditions for turbidity removal. The pH of the samples decreased with the increase in aluminum and iron salts concentration as coagulants, while the use of tannin kept the pH of the treated water stable. Therefore, the coagulant recovered from clarifier sludge via acidification is effective in treating raw water with high color and turbidity, providing a useful application for wastewater treatment plant residues.

Informações do artigo

Recebido: 02 de junho, 2024
Aceito: 09 de novembro, 2024
Publicado: 30 de dezembro, 2024

Introdução

A concepção mais comumente utilizada nas estações de tratamento de água (ETAs) para abastecimento público no território brasileiro, é a do ciclo completo. Este processo envolve várias operações unitárias sequenciais: tratamento preliminar, coagulação, floculação, sedimentação (ou flotação), seguida por filtração. Após estas etapas físicas e químicas, a água passa por processos de desinfecção, fluoretação e estabilização final. Essas etapas são essenciais para garantir a potabilidade da água e atender aos padrões de qualidade estabelecidos (DI BERNARDO; DANTAS, 2005). No entanto, essa concepção de tratamento gera uma grande gama de resíduos, como por exemplo, o lodo proveniente dos decantadores. A literatura indica que o volume de resíduos gerados nas estações de tratamento de água (ETA) varia entre 3% e 10% do volume de água tratada no sistema (CHEN *et al.*, 2011). Esse percentual é especialmente significativo em estações que operam com grandes vazões, ou quando se considera a perda em uma escala global (JUNG *et al.*, 2016).

Devido à elevada produção de lodo nas ETAs e à frequente disposição inadequada desse resíduo em corpos d'água sem o tratamento adequado, surgem diversos problemas ambientais. Essa prática resulta em significativa poluição devido à alta concentração de sólidos e alumínio presentes no lodo (CORDEIRO, 1999). Em resposta a essa problemática, vários processos de regeneração do coagulante presente no lodo têm sido estudados. De acordo com Piotto *et al.* (1999), esses processos visam a recuperação e reutilização do coagulante, reduzindo assim a quantidade de resíduos gerados e mitigando os impactos ambientais associados.

Nas estações de tratamento de ciclo completo, os agentes coagulantes predominantemente utilizados incluem polímeros orgânicos e inorgânicos. Dentre esses, o cloreto de polialumínio (PAC) destaca-se como o mais comum. Este coagulante demonstra eficiências significativas após sua aplicação, contribuindo para a remoção de diversas impurezas presentes na água e é caracterizado pela sua maior flexibilidade operacional (HOWE *et al.*, 2016; RIBEIRO; ANDRADE; REIS, 2019).

Porém, devido à existência de diversas atividades humanas em áreas de mananciais, florestas ripárias e aluviais, bem como nas proximidades dos corpos hídricos, ocorre uma significativa degradação da qualidade dessas águas e da diversidade biológica. Essa degradação resulta de modificações nos componentes físicos, químicos e biológicos do ambiente (OKUMURA *et al.*, 2020). No entanto, as estações de tratamento de água (ETAs), independentemente da condição da água bruta, são obrigadas a atender aos padrões de potabilidade estabelecidos pela legislação brasileira (BRASIL, 2021). Portanto, é essencial realizar estudos em diversas condições de água bruta, assim como de tipos de coagulantes e dosagens para que seja possível garantir de forma satisfatória a qualidade da água fornecida ao consumidor final.

Para facilitar tais estudos, é comum a utilização do equipamento *Jar Test*, que permite a realização controlada dos processos e operações de coagulação, floculação e sedimentação em escala de laboratório. Este método simula as condições de tratamento de água em uma estação de tratamento, possibilitando a avaliação da eficiência de

diferentes coagulantes e parâmetros operacionais (FERRARI *et al.*, 2012).

Neste contexto, o presente estudo teve como objetivo avaliar a recuperação do coagulante por via ácida do lodo proveniente dos decantadores de uma estação de tratamento de água e aplicar no tratamento de água bruta após evento pluviométrico comparando suas eficiências com outros diferentes tipos de coagulantes e dosagens.

Materiais e métodos

Coleta e caracterização da água do rio

As amostras de água submetidas aos ensaios de tratabilidade foram coletadas no Rio Riozinho, localizado no município de Irati-PR, bairro Riozinho, sendo um dos afluentes da Bacia Hidrográfica do Tibagi. O rio é classificado como Classe 2 segundo a Resolução CONAMA nº 357/2005, cabe destacar que essa classificação é adotada quando os rios não são classificados de maneira direta, uma vez que essa alternativa favorece a sua preservação.

A coleta foi realizada em frasco previamente esterilizado em autoclave, logo em seguida a finalização de um evento pluviométrico de 40mm/dia segundo os dados disponíveis pelo Instituto Nacional de Meteorologia (INMET).

Tal condição foi adotada com o intuito de averiguar a eficiência dos coagulantes com amostras de menores qualidades, uma vez que a precipitação contribui para a perda de qualidade da água principalmente em função da carga sedimentar carregada pelo escoamento superficial até o mesmo, todavia, influenciando principalmente nos teores de cor e turbidez.

Cabe destacar que as coletas foram realizadas em três seções diferentes do rio, sendo duas nas laterais e uma no centro, posteriormente homogeneizadas, resultando em uma amostra composta e mais representativa.

Os parâmetros utilizados para a caracterização das amostras foram: cor aparente, turbidez e pH. Ressalta-se que para a realização das análises, foram seguidas as metodologias dispostas no *Standart Methods for the Examination of Water and Wastewater*, Ed. 23rd (APHA, 2017).

Recuperação do coagulante

Para a realização do processo de regeneração do coagulante presente no lodo da estação de tratamento de água, foram coletadas amostras de lodo de uma estação a qual possui um sistema convencional de tratamento, de ciclo completo, que utiliza do Cloreto de Poli Alumínio como coagulante no processo.

Após a coleta, o lodo foi adensado por gravimetria em Cone Imhoff, sendo retirado o sobrenadante a cada duas horas até que visualmente restassem apenas os sólidos. Posteriormente ao adensamento, empregou-se o processo de regeneração do coagulante por via ácida seguindo a metodologia de Fulton (1974). As condições operacionais utilizadas para realização desse processo estão apresentadas na Tabela 1.

Tabela 1. Condições operacionais utilizadas para recuperação do coagulante do LETA

| Parâmetros operacionais | Condição adotada |
|---|------------------|
| pH do lodo | 2 |
| Gradiente de mistura (s ⁻¹) | 150 |
| Tempo de mistura (min) | 120 |
| Ácido para correção do pH | Ácido sulfúrico |
| Velocidade de sedimentação (cm/min) | 0,2 |
| Tempo de sedimentação (min) | 35 |

Três recipientes de volume igual a 2 litros do equipamento *Jar Test* foram preenchidos com o lodo, e o experimento foi realizado em triplicata para assegurar a robustez dos resultados. Posteriormente, o pH do lodo foi ajustado para 2 por meio da adição de um agente acidificante conforme o método de Fulton. Após a acidificação, a agitação foi iniciada e mantida por duas horas, conforme delineado na metodologia mencionada anteriormente.

Em seguida à agitação, um período de sedimentação de 35 minutos foi estabelecido para permitir a deposição das partículas sólidas e coloidais no fundo dos recipientes, enquanto o coagulante descomplexado permanecia solubilizado e se acumulava na superfície, formando o sobrenadante, devido às diferenças de densidade entre as fases. Em seguida, o sobrenadante, contendo o coagulante recuperado, foi coletado de cada recipiente. Para avaliar a eficiência da recuperação do coagulante, amostras do sobrenadante de cada recipiente foram submetidas a análises de alumínio, a fim de quantificar a concentração recuperada deste metal em cada uma das repetições do ensaio.

Condições operacionais no tratamento da água e análises de monitoramento da eficiência

Para realização dos ensaios de tratamento da água por coagulação, floculação e sedimentação, utilizou-se dos seguintes tipos de coagulantes:

- Coagulante recuperado do lodo da ETA;
- Cloreto de Poli Alumínio (PAC);
- Cloreto Férrico;
- Sulfato de Alumínio;
- Tanino vegetal.

Os ensaios foram desenvolvidos em equipamento *Jar Test* seguindo as condições operacionais apresentadas na Tabela 2. Cabe destacar que os experimentos foram realizados em triplicata conforme a metodologia apresentada por Di Bernardo L., Di Bernardo A. e Centurione Filho (2002).

Tabela 2. Condições operacionais do tratamento água utilizando diferentes tipos de coagulantes

| Parâmetro | Condições operacionais |
|--|------------------------|
| Dosagens de coagulantes (mg L ⁻¹) | 10, 40, 60 |
| pH de coagulação | 7,0 (pH natural) |
| Gradiente de mistura rápida (s ⁻¹) | 700 |
| Tempo de mistura rápida (s) | 30 |
| Gradiente de mistura lenta (s ⁻¹) | 40 |
| Tempo de mistura lenta (min) | 20 |
| Velocidade de sedimentação (cm/min) | 0,2 |
| Tempo de sedimentação (min) | 35 |

Após a realização dos ensaios de tratabilidade, coletou-se o sobrenadante de cada um dos ensaios com seus respectivos agentes coagulantes e dosagens.

As amostras obtidas após o tratamento foram submetidas a caracterização por meio das análises de turbidez, cor aparente e pH realizadas de acordo com as metodologias já citadas anteriormente.

Análise estatística dos dados

Posteriormente a caracterização das amostras e a obtenção dos dados de turbidez, cor aparente e pH após o tratamento, estes foram submetidos à análise estatística. O tratamento estatístico dos dados foi realizado na versão *free trial* do software STATISTICA 7. Para uma interpretação mais precisa dos dados experimentais, visando determinar a condição operacional ótima em relação aos parâmetros avaliados (tipo de coagulante e dosagem), foi empregada a análise de variância (ANOVA) com um nível de significância de 5%, precedida pelo teste de Bartlett para verificar a homogeneidade das variâncias, seguida da aplicação do teste de Tukey HSD, com um nível de significância de $\alpha=0,05$.

Resultados e discussão

Caracterização da água bruta do rio

Por meio da caracterização da água coletada do rio, foram obtidos os valores médios apresentados na Tabela 3 em função dos parâmetros avaliados.

Tabela 3. Caracterização da água do rio após evento pluviométrico em função dos parâmetros avaliados

| Parâmetros | Valores médios |
|-------------------|----------------|
| Turbidez (NTU) | 113 |
| Cor aparente (uC) | 1445 |
| pH | 7,2 |

Com base nos dados apresentados na Tabela 3, é possível observar elevados teores de turbidez e de cor aparente nas amostras de água analisadas. Este fenômeno é atribuído principalmente ao incremento nos níveis de sólidos em suspensão, conforme discutido por Oliveira-Filho *et al.* (2007). Os valores elevados registrados refletem o transporte de material sólido e coloidal presente nos solos através do escoamento superficial durante eventos de precipitação, os quais arrastam consigo uma variedade de poluentes. Esse fenômeno pode ser atribuído à localização do corpo hídrico. Na área circundante a montante do ponto de coleta, houve a implantação de novos loteamentos e um aumento na urbanização. Como resultado, várias áreas de solo exposto foram identificadas. A investigação desse possível motivo foi conduzida por meio de uma visita *in loco*.

A qualidade da água bruta, ou seja, a qualidade da água antes de passar pelo processo de tratamento, desempenha um papel fundamental na eficácia das estações de tratamento de água. Águas brutas de baixa qualidade, caracterizadas por altos níveis de turbidez, presença de contaminantes orgânicos e inorgânicos, bem como microrganismos patogênicos, podem representar desafios significativos para as ETAs. A presença desses contaminantes pode exigir processos de tratamento mais intensivos, como coagulação, floculação, sedimentação, filtração e desinfecção, para garantir a produção de água potável segura e de qualidade.

Além disso, águas brutas de baixa qualidade também podem aumentar os custos operacionais das ETAs, devido à necessidade de utilizar maiores quantidades de produtos químicos e energia para tratar a água.

Em decorrência do avanço antropogênico nas áreas ripárias, onde a natureza deveria ser conservada e protegida, faz com que a qualidade da água esteja sob ameaça constante. A topografia do solo assimilada a presença de áreas agricultáveis e urbanizadas e ao lançamento de esgotos domésticos sem seu devido tratamento, estão gradualmente comprometendo a composição da água. É crucial ressaltar que esses fatores têm o poder de desencadear mudanças drásticas nos atributos dos recursos hídricos, representando uma perda de sua qualidade (AMINUL ISLAM *et al.* 2018; Mello *et al.* 2018).

Destaca-se que tais parâmetros avaliados são de extrema importância a serem monitorados nas estações de tratamento de água, pois, a deficiência na remoção dos sólidos e coloides resultam na perda de eficiência no processo de desinfecção, pois, esse tipo de material serve de “escudo” para proteção das bactérias patogênicas as quais não são afetadas pelo agente desinfectante. Destaca-se ainda que a desinfecção por meio da utilização de cloro em águas contendo sólidos orgânicos podem gerar a formação de subprodutos indesejáveis, em alguns casos, compostos cancerígenos como os trihalometanos, ácidos haloacéticos, haloacetonitrilas, entre outros. (ROOK, 1974 *apud* MACEDO, 2001; YOON *et al.*, 2003; WHITE *et al.*, 2003;).

Tendo em vista esse problema, as estações de tratamento de água devem estar aptas a gerirem de forma eficiente o tratamento e potabilidade da água bruta para população, suprimindo tais necessidades e condições. Portanto, a aplicação de diversos tipos de coagulantes e dosagens para obter a melhor condição operacional de tratamento é de extrema importância, haja vista que esses testes podem fazer com que haja a redução dos custos de operação, assim como o decréscimo na geração de resíduos por meio do seu reaproveitamento.

Recuperação do coagulante

Quando realizado o adensamento do lodo proveniente da estação de tratamento de água, foi obtida a concentração de sólidos totais do mesmo de 10g/L e a partir deste, durante o processo de regeneração por via ácida do coagulante presente no Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), foi alcançada uma concentração média de alumínio no sobrenadante de 489 ± 10 mg/L, resultando em aproximadamente 1,25 litros de sobrenadante a partir de cada 2 litros de LETA utilizados. É importante ressaltar que conforme o pH se desloca para valores mais ácidos, sendo inferiores a 6, valores mais aproximados a 2, ocorre um aumento na solubilidade dos metais, podendo chegar a 100% (USEPA, 2011; DI BERNARDO, DANTAS, VOLTAN, 2012).

É relevante observar que o coagulante obtido a partir do LETA não passou por nenhum processo de purificação antes de ser aplicado no tratamento da água bruta. No entanto, é notável que várias pesquisas estão sendo desenvolvidas para aprimorar técnicas que permitam a remoção de impurezas do coagulante recuperado.

Isso visa garantir a obtenção de uma solução com um teor de alumínio mais elevado, além de uma baixa concentração de compostos orgânicos, como discutido por Keeley, Jarvis e Judd (2014).

O valor obtido para a concentração de alumínio solubilizado no processo de recuperação do coagulante do LETA é inferior ao registrado por Filipaki (2020), que alcançou uma concentração de 793,7 mg/L ao recuperar o coagulante de uma estação de tratamento que emprega PAC como agente coagulante. Em contraste, Gavlak, Vidal e Machado (2021) observaram uma concentração de alumínio solubilizado de 562 mg/L ao avaliar a recuperação do coagulante por via ácida do LETA em um período de reação de 10 minutos. Já em um estudo avaliando a recuperação do coagulante de um lodo gerado em uma ETA a qual utiliza de sulfato de alumínio no processo de tratamento, realizado por Pedretti e Medeiros (2022), os autores, após realizarem o processo de filtração do coagulante recuperado obtiveram uma concentração de sulfato de alumínio de 681,31 mg/L. O valor obtido no presente estudo representa uma redução em relação aos resultados citados e indica variações na eficiência do processo de recuperação conforme as condições experimentais e de pureza do coagulante recuperado, assim como, possivelmente as características dos LETA's utilizados e das próprias ETAs podem ter influenciado em tal valor reduzido.

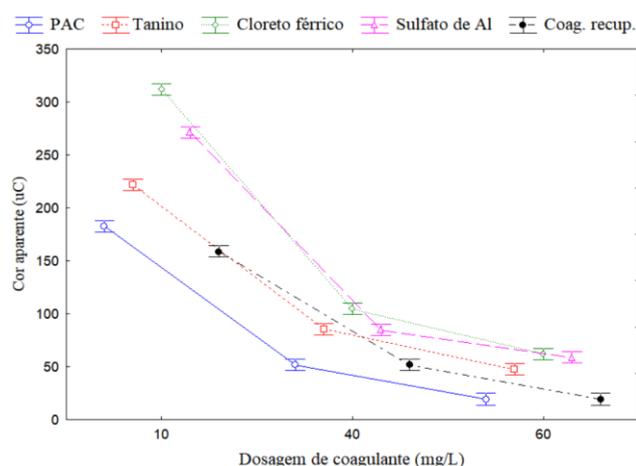
É importante ressaltar que a conformidade com a legislação estabelecida pela NBR 15784 de 2017 não foi avaliada. Esta norma determina que nenhum produto químico empregado no tratamento de água para consumo humano pode introduzir impurezas em concentrações que ultrapassem a Concentração de Impureza Permissível por Produto (CIPP), mesmo quando utilizado até a dosagem máxima recomendada.

Além disso, em relação aos produtos gerados no local de aplicação, a concentração de impurezas provenientes de cada produto químico utilizado em sua geração não deve exceder os limites estabelecidos por essa legislação (ABNT, 2017).

Ensaio de tratamento da água bruta

A partir dos ensaios de tratabilidade utilizando cada um dos coagulantes em suas respectivas dosagens, gerou-se as Figuras 1, 2 e 3 em função dos parâmetros avaliados.

Figura 1. Avaliação na remoção de cor aparente da água bruta por meio do tratamento por coagulação floculação e sedimentação utilizando diferentes coagulantes e dosagens.



*Sulfato de Al: sulfato de alumínio

*Coag. Recup: coagulante recuperado

Quando avaliada a remoção de cor aparente da água bruta, a qual possuía um teor de 1445 uC, nota-se expressiva eficiência de remoção em todas as condições operacionais testadas, onde foram obtidos valores superiores a 78 %. Por meio da utilização do coagulante PAC, após aos processos de tratamento por coagulação, floculação e sedimentação, foram obtidos valores médios de cor aparente de 182,7 uC, 51,7 uC e 18,6 uC, para as dosagens de 10, 40 e 60 mg/L, resultando em eficiências de remoção de 79,3 %, 93,4 % e 98,7 %, respectivamente.

Ao analisar a eficácia do coagulante tanino, constatou-se que os níveis médios remanescentes de cor aparente nas amostras de água tratada, em relação às dosagens avaliadas, foram de 221,7 uC com uma eficiência de remoção de 84,7% (para 10 mg/L), 85,7 uC com uma eficiência de 94% (para 40 mg/L) e 47,3 uC (para 60 mg/L), demonstrando uma eficiência de 96,7%.

O uso de cloreto férrico resultou em eficiências de remoção de 65,7%, 90% e 94%, produzindo níveis de cor aparente na água tratada de 312 uC, 104,7 uC e 62 uC para as dosagens de 10, 40 e 60 mg/L, respectivamente. Já aplicação do sulfato de alumínio utilizando das mesmas dosagens, culminou em eficiências de 67,8 %, 88 % e 96,4 %, gerando teores de 271,4 uC, 84,7 uC e 58,7 uC. O coagulante recuperado quando empregado nas respectivas dosagens avaliadas originou teores de cor aparente na água tratada de 158,7 uC, 51,7uC e 19,33 uC as quais resultaram em eficiências de 89 %, 96,4 % e 98,7 %, respectivamente.

Quando avaliados estatisticamente os tratamentos em função da cor aparente, é verificada diferença estatística significativa entre os mesmos ($p < 0,05$) por meio da análise de variância.

De acordo com o teste de Tukey, foi constatado que os teores de cor aparente na amostra de água após o tratamento com uma concentração de 60 mg/L, tanto com o coagulante recuperado quanto com o PAC, foram estatisticamente iguais. Essas foram consideradas as melhores opções para a redução desse parâmetro, obtendo os menores valores remanescentes. Porém, segundo o padrão de potabilidade brasileiro (BRASIL, 2021), os teores de cor aparente na água tratada após os processos de coagulação, floculação e sedimentação, devem ser menores que 15 uC, não obedecido por nenhuma das condições adotadas. Mas, valores muito próximos foram obtidos tanto para o coagulante recuperado, quanto ao PAC em dosagem de 60 mg/L (18,4 uC e 19,33 uC) que possivelmente, após o processo de filtração (ciclo completo) tal valor será atingido e/ou minimizado.

A superioridade do PAC e do coagulante recuperado do lodo com PAC na remoção de cor aparente, possivelmente, se deve à sua estrutura química polimerizada, mecanismos de ação mais eficientes (como adsorção e varredura), maior estabilidade em diferentes condições de pH, e capacidade de formar flocos maiores e mais densos, resultando em uma coagulação mais eficaz e sedimentação mais eficiente em comparação com os coagulantes tanino, cloreto férrico e sulfato de alumínio (DI BERNARDO, 2011).

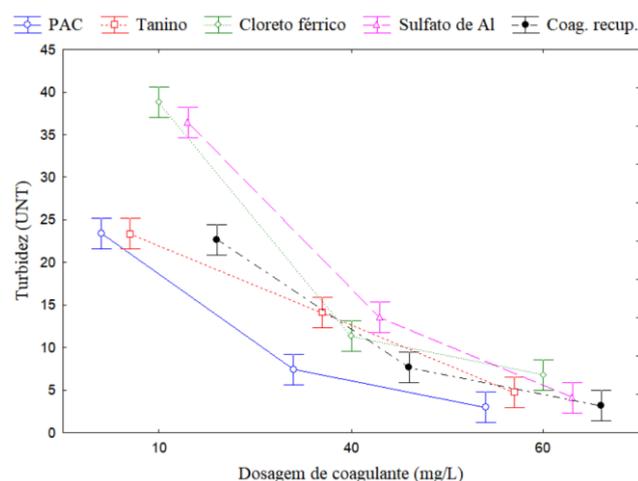
Cabe destacar que quando adicionados em excesso à água a ser tratada, alguns tipos de coagulantes, como o cloreto férrico, podem não participar completamente das reações de coagulação e floculação. Conseqüentemente, uma parte do coagulante permanece em solução, o que pode resultar no aumento dos valores de cor da água tratada (VAZ, 2009). O mesmo acontece com o tanino, por exemplo.

Pedretti e Medeiros (2022) conduziram um estudo para tratar água de um corpo hídrico, a qual apresentava teores de cor aparente inicialmente avaliados em 364,46 uC. Para isso, foram utilizadas dosagens de 10, 40 e 70 mg/L de coagulante recuperado do lodo de uma estação de tratamento de água a qual utiliza do coagulante sulfato de alumínio. Os resultados indicaram valores remanescentes de cor aparente de 96 uC, 82,33 uC e 106 uC, respectivamente, para as dosagens mencionadas.

No entanto, notou-se que o coagulante recuperado neste estudo apresentou uma eficiência de remoção ainda maior. Isso se evidenciou pelo fato de que o teor de cor aparente na água pré-tratamento era mais elevado, ainda que, a utilização de 60 mg/L resultou em um valor final inferior de cor aparente (19,33 uC), demonstrando a eficácia do coagulante em reduzir significativamente os níveis de cor na água.

Em uma pesquisa conduzida por Pimenta *et al.* (2017), foram realizados ensaios de tratamento de água bruta com um teor de cor aparente inicial de 43 uC. Utilizando uma dosagem de 10 mg/L do coagulante PAC, os pesquisadores obtiveram resultados satisfatórios, alcançando um valor de 7 uC para a cor aparente na água tratada. É relevante ressaltar que o teor de cor na água bruta neste estudo atual é significativamente superior ao mencionado na pesquisa de Pimenta *et al.* (2017). Portanto, o valor obtido após o tratamento torna-se de extrema importância, destacando a eficácia do processo de coagulação utilizando um coagulante PAC regenerado do lodo.

Figura 2. Avaliação na remoção de turbidez da água bruta por meio do tratamento por coagulação floculação e sedimentação utilizando diferentes coagulantes e dosagens.



*Sulfato de Al: sulfato de alumínio

*Coag. Recup: coagulante recuperado

Ao avaliar a remoção da turbidez presente da água bruta, observa-se eficiências mais significativas quando adotadas as dosagens de 40 e 60 mg/L para todos os coagulantes testados, com valores superiores a 85%. A aplicação do coagulante PAC, seguida dos processos de coagulação, floculação e sedimentação, resultou em valores médios de turbidez remanescente de 23,4 UNT, 7,43 UNT e 2,95 UNT para dosagens de 10, 40 e 60 mg/L, respectivamente. Essas condições operacionais proporcionaram eficiências de remoção de cor de 79,29 %, 93,42 % e 97,37 %.

Em relação a eficácia do coagulante tanino, observou-se que os níveis médios restantes de turbidez nas amostras de água tratada, em relação à água bruta com um teor inicial de 113 UNT, variaram em função das dosagens aplicadas. Os valores registrados foram de 23,33 UNT, com uma eficiência de remoção de 79,35% para uma dosagem de 10 mg/L, 14,1 UNT com uma eficiência de 87,52% para 40 mg/L, e 4,73 UNT para 60 mg/L, resultando em uma eficiência de remoção de 95,81%.

A utilização de cloreto férrico resultou em eficiências de remoção de turbidez de 65,66%, 89,97% e 93,98%, com turbidez residual na água tratada de 38,8 UNT, 11,33 UNT e 6,03 UNT para dosagens de 10, 40 e 60 mg/L, respectivamente. Em contraste, a aplicação de sulfato de alumínio com as mesmas dosagens alcançou eficiências de 67,78%, 88,02% e 96,34%, gerando turbidez residual de 36,4 UNT, 13,53 UNT e 4,13 UNT. O coagulante recuperado, quando aplicado nas dosagens mencionadas, resultou em turbidez residual de 22,66 UNT, 7,66 UNT e 3,15 UNT, correspondendo a eficiências de remoção de 79,94%, 93,21% e 97,21%, respectivamente. Nos estudos de Pedretti e Medeiros (2022), os autores utilizaram o coagulante recuperado do lodo gerado no processo de tratamento por sulfato de alumínio e reduziram o teor de turbidez da água bruta de 100 UNT para 14,6, 4,5 e 4,28 UNT, ao adotarem as dosagens de 10 mg/L, 40 mg/L e 70 mg/L, acarretando eficiências de remoção maiores que 95 %. Tais resultados corroboram as eficiências obtidas por meio da aplicação do coagulante recuperado no presente estudo, apesar de lodos com características diferentes.

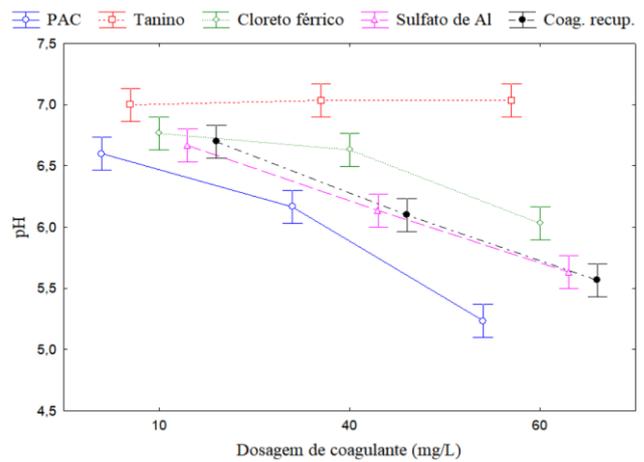
Ao realizar o tratamento estatístico dos dados referentes aos teores remanescentes de turbidez da água tratada sob diferentes condições, observou-se uma diferença estatisticamente significativa entre os valores obtidos, com 95% de confiança ($p < 0,05$).

O teste de Tukey foi aplicado e revelou que as condições mais eficazes para a remoção de turbidez foram as com a maior dosagem de todos os coagulantes (60 mg/L), assim como com 40 mg/L de PAC e do coagulante recuperado. Esses resultados indicam uma semelhança estatística entre essas condições, conforme verificado pelo teste estatístico aplicado.

É importante destacar que os valores de turbidez remanescente obtidos ao aplicar uma dosagem de 60 mg/L dos coagulantes, recuperado do lodo, PAC, tanino e sulfato de alumínio atenderam aos requisitos estabelecidos pela Portaria GM/MS Nº 888, de 4 de maio de 2021. Essa portaria estipula que a turbidez da água tratada, após o processo de sedimentação e antes de ser encaminhada para os filtros, deve ser inferior a 5 UNT.

Portanto, os resultados demonstram conformidade com os padrões de qualidade da água regulamentados para esse estágio do tratamento. No entanto, nenhuma das condições testadas alcançou o valor de turbidez remanescente recomendável após a sedimentação para aumentar a duração das carreiras de filtração. Segundo a literatura, esse valor deve ser inferior a 2 UNT (HENDRIKS, 2011), porém valores próximos foram obtidos quando utilizado o coagulante recuperado e o PAC, 3,15 e 2,96 UNT, respectivamente.

Figura 3. Comportamento do pH da água após o tratamento por coagulação floculação e sedimentação utilizando diferentes coagulantes e dosagens



*Sulfato de Al: sulfato de alumínio

*Coag. Recup: coagulante recuperado

Quando avaliado os valores de pH da água bruta (7,05) após os processos de coagulação, floculação e sedimentação utilizando diferentes coagulantes e dosagens, verificou-se um decaimento em função do aumento das dosagens dos coagulantes PAC, sulfato de alumínio, cloreto férrico e coagulante recuperado do lodo. O aumento das concentrações de coagulantes contendo sais de ferro (cloreto férrico) e sais de alumínio (sulfato de alumínio e PAC) reduz o pH da água após a coagulação devido à dissociação desses sais em íons metálicos (Fe^{3+} e Al^{3+}) e subsequente hidrólise, que libera íons H^+ . Esta liberação de prótons aumenta a acidez da água, diminuindo o pH (DI BERNARDO, *et al* 2011).

Em oposição aos sais de ferro e alumínio, os coagulantes orgânicos à base de tanino, extraídos da árvore Acácia-negra, como o utilizado neste estudo, esse tipo de coagulante tende a não reagir de maneira significativa com a alcalinidade, o que resulta na ausência de impacto significativo nos valores de pH do meio (VAZ *et al.*, 2010). O que é corroborado nos estudos de Siqueira *et al.* (2018), que segundo os autores, independentemente da quantidade de solução adicionada, a utilização de coagulantes naturais (como o tanino) não resulta em uma alteração significativa do pH da água.

A análise estatística dos valores de pH obtidos após o tratamento proposto revelou uma diferença significativa entre as condições avaliadas ($p < 0,05$), indicando que pelo menos uma das condições diferiu significativamente das demais. Utilizando o teste de Tukey, concluiu-se que, de maneira estatisticamente semelhante, os menores valores de pH foram encontrados quando se utilizou a maior dosagem dos coagulantes PAC, coagulante recuperado e sulfato de alumínio. Esses resultados indicam que os sais de alumínio, em suas maiores dosagens, foram responsáveis pelas reduções mais acentuadas nos valores de pH.

Por outro lado, observou-se que maiores valores de pH foram registrados em todas as dosagens de tanino, bem como na menor dosagem dos demais coagulantes (10 mg/L) e quando utilizado a dosagem intermediária de cloreto férrico (40 mg/L) se igualando estaticamente pelo teste de Tukey. Esses resultados são consistentes com as conclusões anteriores, evidenciando que os coagulantes naturais e orgânicos não exercem influência significativa sobre o pH após a coagulação, ao passo que o aumento dos teores de sais de alumínio e ferro resulta em sua diminuição.

Conclusão

Com base nos dados apresentados, conclui-se que o coagulante recuperado do lodo do decantador da estação de tratamento de água demonstrou uma eficiência estatisticamente igual à do coagulante PAC na remoção da cor aparente da água bruta, especialmente quando utilizada a maior dosagem avaliada (60 mg/L) os quais obtiveram a maior eficiência entre as demais condições testadas.

No que diz respeito à remoção de turbidez da água bruta, o coagulante recuperado, na dosagem de 60 mg/L, demonstrou ser estatisticamente igual aos demais coagulantes na mesma dosagem. Adicionalmente, o uso de sulfato de alumínio na dosagem de 40 mg/L também apresentou uma eficiência de remoção equivalente, sendo estas as condições que resultaram nas melhores eficiências para esse parâmetro.

O pH das amostras quando utilizado sais de alumínio e de ferro como coagulante, apresentou decaimento em função do aumento da concentração. Por outro lado, ao utilizar o tanino vegetal, o pH da água tratada manteve-se estável.

Com base nos fatos apresentados, conclui-se que o coagulante recuperado do lodo do decantador por via ácida é eficaz para os parâmetros avaliados no tratamento de água bruta com altos níveis de cor e turbidez, apesar de resultar em um leve decaimento do pH após sua aplicação. Esta abordagem representa uma alternativa viável para tais parâmetros, em função de um resíduo gerado em grandes volumes nas ETAs.

Referências

- AMINUL ISLAM, M.; MORTON, D. W.; JOHNSON, B. B.; MAINALI, B.; ANGOVE, M. J. Manganese oxides and their application to metal ion and contaminant removal from wastewater. *Journal of Water Process Engineering*, v. 26, p. 264-280, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.10.018>
- APHA. Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater. American Public Health Association, American Water Works Association, Water Environmental Federation, 23rd. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15784: produtos químicos utilizados no tratamento de água para consumo humano: efeitos à saúde*. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 39 p.
- BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. Resolução n. 357, de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Brasília, n. 53, 17 de março de 2005.
- BRASIL. Ministério da Saúde. Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021. *Diário Oficial da União*, Brasília, DF, nº 5, seção 1, p. 69, 21 de maio de 2021.
- CHEN, Y. J. et al. Effects of alum sludge characteristics on the efficiency of coagulants recovery by acidification. *Proceedings of the International Conference on Solid Waste*, China, 2011.
- CORDEIRO, J. S. Importância do tratamento e disposição adequada dos lodos de ETAs. In: REALI, M. P. (Coord.). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES, 1999.
- DI BERNARDO, L.; DI BERNARDO, A.; CENTURIONE FILHO, P. Ç. **Ensaio de Tratabilidade de Água e dos Resíduos gerados em Estações de Tratamento de Água**. São Carlos – SP: Editora Rima, 2002.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B. *Métodos e técnicas de tratamento de água* 2ª. ed. São Carlos - SP: Editora Rima, 2005.
- DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. *Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. 1ª ed. São Carlos - SP: Editora LDiBe, 2012.
- DI BERNARDO, L. DANTAS, A. D.; VOLTAN, P. E. *Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. São Carlos- SP: Ed. LDiBe, 2011.
- FERRARI, T.N.; DE JULIO, M.; DE JULIO, T.S.; SOUSA JÚNIOR, W.C. Estudos de Tratabilidade das Águas do Rio Paraíba do Sul que Abastecem o Município de São José dos Campos/SP. *Revista AIDIS de Engenharia y Ciencias Ambientales*, v.5, n.2, p.45-58. 2002. DOI: <http://dx.doi.org/10.22201/iingen.0718378xe.2012.5.2.32646>
- FILIPAKI, A., SOUZA, J. B., VIDAL, C. M. S. Tratamento de água de lavagem de filtro de ETA empregando coagulante recuperado e desinfecção por radiação UV. *Revista DAE | São Paulo* v. 69, n. 231, p. 54-67, 2021. <https://doi.org/10.36659/dae.2021.046>
- FULTON, G.P. Recover alum to reduce waste-disposal costs. In: *Processing Water treatment Plant Sludge*. AWWA, 1974. p. 103-118.
- GAVLAK, G., VIDAL, C. M. S., MACHADO, E. F. Treatment of a water treatment plant filter washing water using coagulant regenerated from the decanter sludge. *Semina: Ciências Exatas E Tecnológicas, Londrina*, v. 42, n. 2, p. 153-162, 2021. <https://doi.org/10.5433/1679-0375.2021v42n2p153>
- HENDRIKS, D. *Fundamentals of Water Treatment Unit Processes: Physical, Chemical and Biological*. Boca Ratón: Editora CRC Press. 2011.
- HOWE, K.J.; HAND, D.W.; CRITTENDEN, J.C.; TRUSSELL, R.R.; TCHOBANOGLOUS, G.. *Princípios de tratamento de água*. 1ª ed. São Paulo: Editora Cengage. 2016.
- Instituto Nacional de Meteorologia (INMET). *Relatório Anual de Dados Meteorológicos*, 2023. Disponível em: <http://www.inmet.gov.br/dados-meteorologicos>. Acesso em: 10 de maio de 2024.
- JUNG, K. et al. Comprehensive reuse of drinking water treatment residuals in coagulation and adsorption process. *Journal of Environmental Management*, v. 181, p. 425-434, 2016.
- KEELEY, J.; JARVIS, P.; JUDD, S. J. Coagulant recovery from water treatment residuals: a review of applicable technologies. *Critical Reviews in Environmental Science and Technology*. v. 44, p. 2675-2719, 2014.
- MACEDO, J. A. B. *Subprodutos do processo de desinfecção de água pelo uso de derivados clorados*. 1ª ed. Juiz de Fora: Jorge Macedo. 2001.
- MELLO, K. D.; VALENTE, R. A.; RANDHIR, T. O.; SANTOS, A. C. A.; VETTORAZZI, C. A. Effects of land use and land cover on water quality of loworder streams in Southeastern Brazil: Watershed versus riparian zone. *Catena*, v. 167, p. 130-138, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.catena.2018.04.027>.
- OKUMURA, A. T. R.; SILVA, A.; SILVA, N. R. S.; REIS, E.; BIFANO, R. B. A.; QUILENATO, R. V. Determinação da qualidade da água de um rio tropical sob a perspectiva do uso. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 04, p. 1835-1850, 2020.
- OLIVEIRA FILHO, A. T.; CARVALHO, W. A. C.; MACHADO, E. L. M.; HIGUCHI, P.; CASTRO, G. C.; SILVA, A. C.; SANTOS, R. M.; BORGES, L. F. R.; CORRÊA, B. S.; ALVES, J. M. Dinâmica da comunidade e populações arbóreas da borda e interior de um remanescente florestal na serra da Mantiqueira, Minas Gerais, em um intervalo de cinco anos: 1999- 2004. *Revista Brasileira de Botânica*, São Paulo, v. 30, n. 1, p. 149-161, 2007.
- PEDRETTI, A., & MEDEIROS, R. C. Avaliação do potencial de coagulante recuperado de lodo de estação de tratamento de água para uso em águas de baixa e elevada turbidez. *Engenharia Sanitaria E Ambiental*, v. 27, p. 1177-1188, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220111>
- PIMENTA, J. A. A. et al. Avaliação do sulfato de alumínio, policloreto de alumínio e cloreto férrico no tratamento de água bruta do Rio Santo Anastácio. In: *Colloquium Exactarum*, v. 9, n.3, Jul-Set. 2017 p.38-56. DOI: [10.5747/ce.2017.v09.n3.e203](https://doi.org/10.5747/ce.2017.v09.n3.e203)

PIOTTO, Z.; BARRETO, E.; GONÇALVES, R.F.; BRANDÃO, J.; Recuperação de Coagulantes de Lodos de Estações de Tratamento de Águas. In: REALI M.A.P., C.V. (coord.). Noções Gerais do Tratamento e Disposição Final do Lodo de Estação de Tratamento de Água. Rio de Janeiro: Editora ABES, p.203-224, Projeto Prosab, 1999.

RIBEIRO, J.V.M.; ANDRADE, P.V.; REIS, A.G. Moringa oleifera seed as a natural coagulant to treat low-turbidity water by in-line filtration. *Revista Ambiente & Água*, v. 14, n. 6, e 2442, 2019. DOI: <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2442>

SIQUEIRA, A. P. S.; SILVA, C. N.; REZENDE, L.C. S. H.; MILANI, R. G.; YAMAGUCHI, N. U. Análise da performance dos coagulantes naturais moringa oleifera e tanino como alternativa ao sulfato de alumínio para o tratamento de água. *Enciclopédia Biosfera, Centro Científico Conhecer*, Goiânia, v. 15 n. 27; p. 18, 2018. https://doi.org/10.18677/EnciBio_2018A112

USEPA (United States Environmental Protection Agency). Drinking water treatment plant residuals. Disponível em: <https://www.epa.gov/sites/production/files/201511/documents/dwtreatment-residuals-mgmt-tech-report-sept-2011.pdf>. Acesso em 10 maio 2024.

VAZ, Luiz Gustavo de Lima. Performance do processo de coagulação/floculação no tratamento de efluente líquido gerado na galvanoplastia. 2009. 83 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Química, Universidade Estadual do Oeste do Paraná, Toledo, 2009.

VAZ, L. G. L.; KLEN, M.R.F.; VEIT, M.T.; SILVA, E.A; BARBIERO, T.A; BERGAMASCO, R. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. *Revista Eclética Química*. São Paulo. Volume 35, número 4, 2010.

WHITE, D.M. et al. Natural organic matter and DBP formation potential in Alaskan water supplies. *Water Research*, v. 37, n. 4, p. 939-947, 2003.

YOON, J. et al. Low trihalomethane formation in Korean drinking water. *The Science of Total Environment*, n. 302, p. 157-166, 2003.