

Avaliação do potencial de coagulante recuperado de lodo de estação de tratamento de água para uso em águas de baixa e elevada turbidez

Evaluation of the potential of coagulant recovered from WTP sludge for use in low and high turbidity water

Angela Pedretti^{1*} , Raphael Corrêa Medeiros¹ 

RESUMO

Este estudo propôs-se a verificar a viabilidade de recuperação de coagulante utilizado na estação de tratamento de água Palmitinho (RS) pelo emprego do processo de extração por via ácida de lodo, observando a possível aplicação do recuperado para o tratamento de água bruta, com duas características distintas: baixa e elevada turbidez. A regeneração de coagulante por via ácida apresentou-se como alternativa viável, propiciando concentração de 683,31 mg.L⁻¹ de sulfato de alumínio ao recuperado. Nos ensaios em águas de baixa e elevada turbidez, o coagulante recuperado, quando testado em águas de elevadas turbidez e cor, mostrou-se com faixa de aplicabilidade superior ao coagulante comercial, com remoção $\geq 90\%$ de turbidez em praticamente todas as faixas de pH testadas, bem como eficiência na remoção de cor aparente e verdadeira, porém houve limitação do emprego do coagulante recuperado ao transferir cor à água a ser tratada, quando de baixa turbidez, para a qual o coagulante comercial se apresentou mais eficiente. O emprego do coagulante recuperado não atendeu aos requisitos para a concentração de impureza permitida por produto, levando-se em consideração a concentração de impureza padronizada na água calculada para os elementos manganês e cádmio proposta pela norma brasileira 15784. Portanto, não se apresentou viável em tratamento de águas naturais. Além disso, mesmo tendo proporcionado redução de aproximadamente 45% no volume final de lodo, o resíduo insolúvel obtido apresentou características físico-químicas que podem dificultar sua disposição final.

Palavras-chave: tratamento de água; lodo de decantadores; coagulação; via ácida.

ABSTRACT

This study aimed to verify the feasibility of recovering the coagulant used in the water treatment plant of Palmitinho, Rio Grande do Sul, through the use of the sludge acid extraction process, observing the possibility of its application for the treatment of raw water, with two distinct characteristics: low and high turbidity. The regeneration of coagulant by acid route may represent a viable alternative treatment to be used, providing a concentration of 683.31 mg.L⁻¹ of aluminum sulfate to the recovered solution. In low and high turbidity tests, the recovered coagulant, when tested in high turbidity and color waters, showed a higher applicability range than commercial coagulant, with removal $\geq 90\%$ of turbidity in virtually all pH tracks tested, as well as efficiency in apparent and true color removal. However, there was a limitation in the use of coagulant recovered when transferring color to the water to be treated, when low turbidity, to which the commercial coagulant was more efficient. The use of the recovered coagulant did not meet the requirements for permissible impurity concentration per product, taking into account the CIPPA calculated for manganese and cadmium elements, proposed by NBR 15784; Therefore, it was not viable in natural water treatment. In addition, even having provided a reduction of approximately 45% in the final volume of sludge, the insoluble residue obtained had physicochemical characteristics that can make its final disposal difficult.

Keywords: water treatment; water treatment plant's sludge; coagulation; acid pathway.

INTRODUÇÃO

No processo de produção de água potável pode ocorrer a geração de resíduos em razão de: presença de impurezas na água bruta, aplicação de produtos químicos e processos de tratamento utilizados. Assim, originam-se os dois principais resíduos de uma estação de tratamento de água (ETA): lodo de decantadores

(LETA) e água de lavagem de filtros (ACHON; BARROSO; CORDEIRO, 2013; RICHTER; NETTO, 2017).

De acordo com a norma brasileira (NBR) nº 10004, de 31 de maio de 2004, o LETA é classificado como resíduo sólido não perigoso e não inerte, sendo caracterizado como resíduo classe II – A (ABNT, 2004). Sua composição é bem

¹Universidade Federal de Santa Maria – Frederico Westphalen (RS), Brasil.

*Autora correspondente: angelapedretti4@gmail.com

Conflitos de interesse: os autores declaram não haver conflitos de interesse.

Financiamento: nenhum.

Recebido: 04/05/2022 – Aceito: 02/09/2022 – Reg. ABES: 20220111

diversificada, contendo diversos metais, e pode variar de acordo com as características da água bruta, do tipo de coagulante e de produtos auxiliares utilizados no tratamento (CUNHA; STACHIW; QUADROS, 2020).

Com base nessas características, a redução da produção do LETA e seu tratamento se tornam importantes não somente do ponto de vista ambiental, mas também como fonte de minimização de custos operacionais, além de vir a facilitar o descarte de lodo (FERREIRA FILHO; WAELKENS, 2009).

Entre as inúmeras opções de tratamento disponíveis para o LETA, a regeneração do coagulante, pela recuperação de alumínio, por exemplo, pode ser uma abordagem interessante a fim de se aumentar a reciclagem desse composto, especialmente em processos de coagulação de águas, podendo diminuir o uso de coagulante comercial (XU *et al.*, 2009). Segundo Reali (1999) e Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), há quatro opções tecnológicas mais utilizadas para a recuperação do coagulante do LETA: recuperação por via ácida (Processo Fulton), recuperação por via básica, recuperação por extração com solvente e recuperação por processo de quebração. Em qualquer uma delas, a etapa inicial é a solubilização dos hidróxidos precipitados, com posterior separação de recuperado e material não solubilizado.

Todavia, o coagulante recuperado possui limitação quanto ao uso em sistemas de tratamento de água para consumo humano, em razão de os requisitos para a qualidade da água potável serem rigorosos (XU *et al.*, 2009). A NBR 15784, de 2017, estabelece que nenhum produto químico a ser utilizado em tratamento de água para consumo humano deve introduzir impurezas cujas concentrações excedam a concentração de impureza permissível por produto (CIPP), quando utilizado até a dosagem máxima recomendada (ABNT, 2017). Além disso, para produtos gerados no local de aplicação, a concentração de impurezas, provenientes de cada produto químico utilizado para sua geração, não deve ser superior aos limites estabelecidos para a CIPP (ABNT, 2017).

Neste contexto, este estudo empregou o processo de recuperação por via ácida ao LETA e testou a potencialidade do coagulante sulfato de alumínio recuperado em tratar águas naturais de baixa e elevada turbidez.

METODOLOGIA

Local de estudo e descrição do tratamento

O estudo de caso foi desenvolvido na ETA do município de Palmitinho, localizado à noroeste do estado do Rio Grande do Sul e operada pela Companhia

Riograndense de Saneamento. A unidade de abastecimento capta água do manancial Rio Guarita, localizado na Bacia Hidrográfica do Rio da Várzea (RIO GRANDE DO SUL, 2018). A ETA opera por meio de processo de ciclo completo, com processos de pré-desinfecção, coagulação, floculação, decantação, filtração, desinfecção e fluoretação, tratando uma vazão média de 25,0 L.s⁻¹ e permitindo o abastecimento dos municípios de Palmitinho, Pinheirinho do Vale, Vista Alegre e Taquaruçu do Sul.

Coleta do material de estudo

O LETA foi coletado no canal de expurgo do decantador, quando de sua lavagem, em dez frações (espaçadas no tempo — amostra composta), totalizando 220 L, sendo encaminhado ao Laboratório de Recursos Hídricos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), *campus* Frederico Westphalen, para posterior etapa de recuperação do coagulante. Uma alíquota representativa foi conduzida para análise físico-química e microbiológica pelo Laboratório Ambiental Ambios[®], certificado pela Rede Metrológica do Rio Grande do Sul.

Os parâmetros analisados compreenderam a: sólidos totais (ST), sólidos voláteis totais (SVT), pH, alcalinidade total, demanda bioquímica de oxigênio (DBO), demanda química de oxigênio (DQO), teor de matéria orgânica (MO), carbono orgânico total (COT), coliformes totais, *Escherichia coli* e série de metais (Al, As, Fe, Zn, Cd, Ni, Mn, Cu, Cr, Pb e Hg) escolhida pela disponibilidade de análise inicial. As análises realizadas seguiram metodologias propostas em American Public Health Association (APHA), American Water Works Association (AWWA) e Water Environment Federation (WEF) (2017) e NBR 10739 (ABNT, 1989).

Processo de determinação do pH com maior eficiência de extração e recuperação de coagulante sulfato de alumínio

A avaliação de recuperação de coagulante sulfato de alumínio foi realizada por meio de via ácida, seguindo a metodologia adaptada de Guimaraes (2005). As sequências analíticas desenvolvidas, bem como os parâmetros de ensaio, podem ser visualizadas na Figura 1. Todos os ensaios foram conduzidos em equipamento Jarrest Milan[®] (JT303M/6).

As amostras coletadas, no fim dos processos, bem como o resíduo insolúvel, resultante da etapa de recuperação de coagulante, foram analisadas para a caracterização de metais, de modo a permitir comparações entre os dois resíduos.

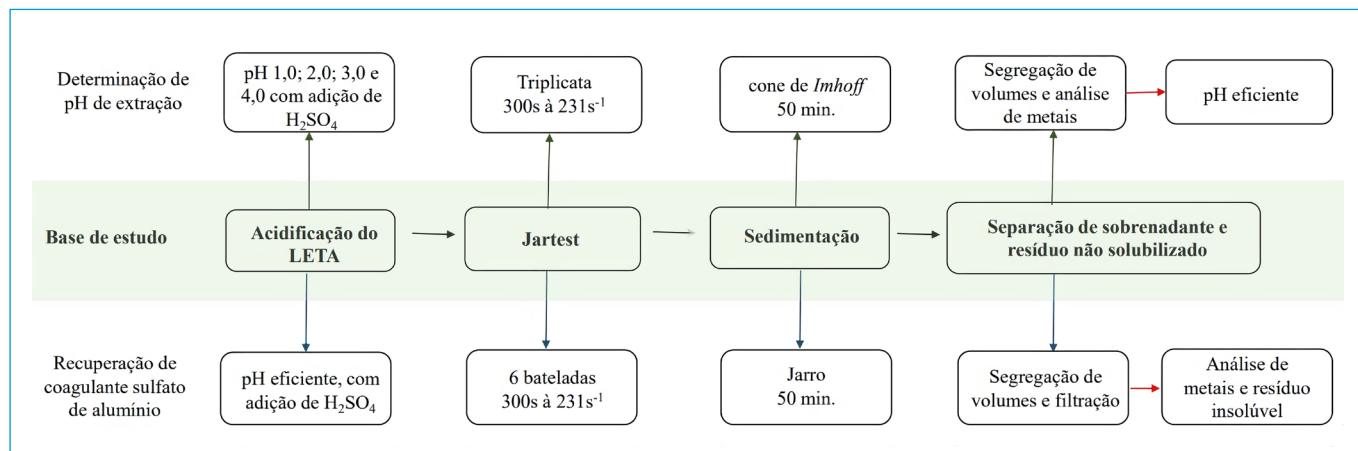


Figura 1 - Sequência analítica para determinação de pH eficiente para extração e recuperação do coagulante sulfato de alumínio.

Testes de eficiência do coagulante sulfato de alumínio recuperado e desenvolvimento de diagramas de coagulação

A água bruta, proveniente do Rio Guarita (RS), foi coletada na canalização de água bruta na ETA, em duas épocas do ano distintas, obtendo-se águas denominadas de: baixa e elevada turbidez. A caracterização inicial de ambas, de acordo com APHA, AWWA e WEF (2017), para os parâmetros pH, turbidez, cor aparente e cor verdadeira, está na Tabela 1.

Os testes de eficiência provieram do desenvolvimento de diagramas de coagulação para os valores remanescentes de turbidez, cor verdadeira e cor aparente. Os parâmetros norteadores dos ensaios de clarificação constam da Figura 2. Foi avaliado o coagulante sulfato de alumínio, recuperado pelo processo de via ácida, em comparação ao coagulante comercial sulfato de alumínio líquido — 647.400 mg.L⁻¹, Al₂O₃ 8,4% (m/m) e ferro total solúvel em água (Fe₂O₃) 0,1% (m/m) — utilizado na ETA.

Execução dos ensaios de Jarrest

O procedimento experimental para os ensaios seguiu os parâmetros apresentados na Tabela 2. Ajustes de pH das águas brutas foram realizados com solução HCl 1N ou NaOH 1N, até o pH preestabelecido pelo delineamento

Tabela 1 - Caracterização da água bruta de baixa e elevada turbidez da estação de tratamento de água Palmitinho (RS).

Parâmetro analítico	Água bruta de baixa turbidez	Água bruta de elevada turbidez
pH	7,29 ± 0,04	7,10 ± 0,02
Turbidez (uT)	8,91 ± 0,02	100,00 ± 5,66
Cor aparente (uC)	56 ± 1,41	364,46 ± 2,88
Cor verdadeira (uC)	42,50 ± 0,71	51,42 ± 0,47

experimental. Para os ensaios com coagulante comercial, foi utilizada solução a 1% de sulfato de alumínio.

Após cada batelada de Jarrest, foi realizada coleta de amostra em cada jarro e analisaram-se parâmetros de turbidez (HACH® 2100Q) e pH (Digimed® DM-2P) no laboratório da ETA Palmitinho. Análises de cor aparente e verdadeira foram realizadas no laboratório de Recursos Hídricos da UFSM, em espectrofotômetro Specord 50 Plus (ANALYTIK Jena®), seguindo metodologia de APHA, AWWA e WEF (2017).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Análise de caracterização do lodo de decantadores

A Tabela 3 apresenta a caracterização físico-química e microbiológica, bem como dados da análise de metais, do LETA da ETA Palmitinho.

Os resultados mostraram-se similares aos de outros trabalhos (RICHTER, 2001; VILLEGAS; CANTAÑO; CUERVO, 2005; AMÂNCIO *et al.*, 2017), evidenciando o pH próximo à neutralidade e elevada concentração de sólidos. As baixas

Tabela 2 - Parâmetros hidráulicos utilizados no aparelho Jarrest Milan JT303M/6 para os ensaios de tratabilidade.

Parâmetro	Gradiente de velocidade (s ⁻¹)	Taxa de sedimentação (cm.min ⁻¹)	Tempo (s)
Homogeneização	740	-	60
Mistura rápida	740	-	60
Floculação/etapa 1	74	-	240
Floculação/etapa 2	37	-	600
Decantação	-	1,45	600

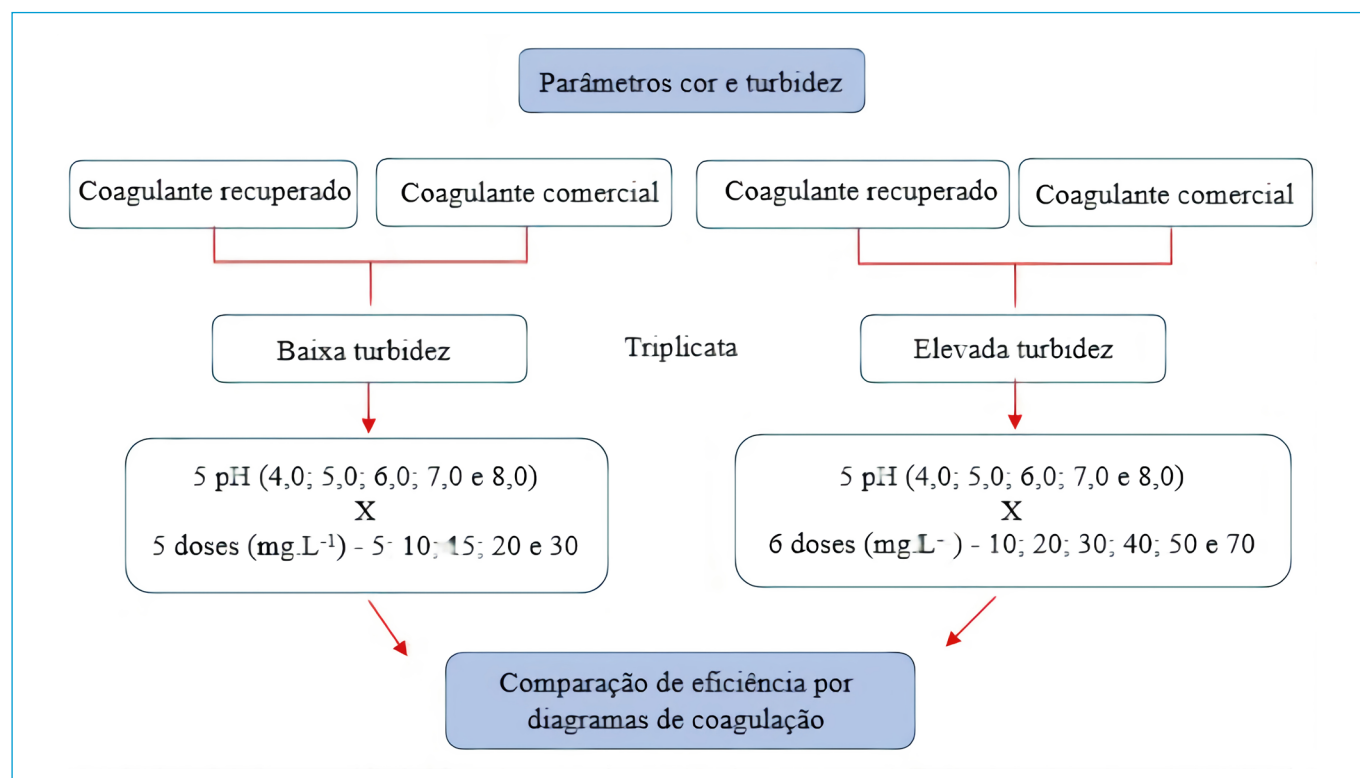


Figura 2 - Ensaios realizados para o desenvolvimento de diagramas de coagulação com coagulante recuperado e coagulante comercial em água bruta.

concentrações de MO e COT, bem como da relação DBO/DQO, podem apontar para uma futura dificuldade de tratabilidade do lodo. Com relação à análise de metais, destacam-se as concentrações de alumínio, proveniente do próprio coagulante utilizado na ETA, e dos elementos ferro e manganês, porém foram inferiores às citadas por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2011), Araújo *et al.* (2015) e Amâncio *et al.* (2017).

Processo de determinação de pH com maior eficiência de extração

A acidificação do LETA foi testada para a faixa de pH de 1 a 4, e os resultados estão apresentados na Tabela 4.

Observa-se que o maior volume de recuperado foi em pH 1, porém a elevada dosagem de ácido sulfúrico necessária pode comprometer a viabilidade do emprego de extração nessa faixa de pH quando aplicada em grande escala. Em contrapartida, os ensaios em pH 2 também foram satisfatórios, mas com gasto de ácido em volume 46,4% menor, sendo, portanto, definido como o pH ideal para a realização dos ensaios em água bruta.

Tal escolha também foi realizada por Guimarães (2005), visando à economia de reativos e minimizando custos, e por Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012), os quais afirmam que, na maioria dos casos, LETAs expostos a pH 2, teoricamente, possuem potencial de solubilização de 100% do alumínio. Todavia, a porcentagem de alumínio no recuperado vai depender da eficiência do processo de desaguamento desse lodo.

A análise da concentração de metais do sobrenadante recuperado é apresentada na Tabela 5.

Tabela 3 - Caracterização físico-química, microbiológica e de metais do lodo da ETA Palmitinho (RS).

Parâmetro analítico	ETA Palmitinho	Metais (mg.L ⁻¹)	ETA Palmitinho
Sólidos totais (mg.L ⁻¹)	22,070	Al	72,260
Sólidos voláteis totais (mg.L ⁻¹)	3,622	As	< 0,001
pH	6,93	Fe	10,80
Demanda bioquímica de oxigênio (mg.L ⁻¹)	560	Zn	0,120
Demanda química de oxigênio (mg.L ⁻¹)	1,320	Cd	0,053
Matéria orgânica (mg.L ⁻¹)	18,5	Ni	< 0,007
Carbono orgânico total (mg.L ⁻¹)	481,8	Mn	1,373
Alcalinidade total (mg.L ⁻¹)	500	Cu	0,282
Coliformes totais (UFC/100 mL)	2,18 × 10 ⁷	Cr	0,026
<i>Escherichia coli</i> (UFC/100 mL)	6,5 × 10 ⁴	Pb	< 0,005
		Hg	< 0,0003

ETA: estação de tratamento de água; UFC: unidade de formação de colônias.

Tabela 4 - Valores experimentais obtidos nos ensaios de recuperação de alumínio em LETA.

pH inicial do LETA	H ₂ SO ₄ (mL)*	pH de extração obtido	Eficiência média de recuperação (em volume de recuperado) (%)
6,77 ± 0,08	8,8 ± 0,40	1,01 ± 0,02	53,33
6,59 ± 0,01	4,7 ± 0,30	1,99 ± 0,03	29,67
6,73 ± 0,04	2,7 ± 0,36	2,99 ± 0,07	28,33
6,59 ± 0,01	1,2 ± 0,21	4 ± 0,04	19,17

LETA: lodo de decantadores; *volume de ácido adicionado em cada jarro.

Os metais com concentração expressiva foram: alumínio, ferro e manganês. Os demais apresentaram-se abaixo do limite de quantificação pelo método testado. Ferro e manganês estão presentes na água bruta naturalmente. Além disso, alumínio e ferro (como residual) também são partes constituintes do coagulante sulfato de alumínio empregado na ETA. Em relação ao processo de regeneração do coagulante, Di Bernardo, Dantas e Voltan (2012) afirmam que a fração de alumínio presente no lodo, e que não se encontra na forma de hidróxido tri-hidratado, dificilmente será solubilizada nas condições oferecidas pelo mecanismo de extração por via ácida.

Processo de extração e determinação da concentração de sulfato de alumínio

Após escolha do pH, 72 L de LETA foram acidificados em seis bateladas de ensaios. Alcançaram-se 32,4 L (45,01%) de coagulante recuperado, restando 39,6 L (54,99%) como resíduo insolúvel. Esse percentual de recuperação foi próximo ao do obtido pela mesma técnica, por Guimarães (2005).

Por causa da dificuldade de separação efetiva entre o coagulante recuperado e o resíduo insolúvel, foi realizada filtração a vácuo (filtro 150 mm) a fim de minimizar a quantidade de sólidos presentes. A caracterização de metais do coagulante recuperado, após filtração, pode ser visualizada na Tabela 6, na qual também estão os dados referentes à concentração de impureza padronizada na água (CIPA) calculada para esses metais e à CIPP descrita na NBR 15784 (ABNT, 2017).

Observa-se, na Tabela 6, que ocorreu extração de alumínio ferro e manganês (em maiores concentrações), além de cádmio, cobre e zinco. Esses metais, em

Tabela 5 - Caracterização do sobrenadante de acordo com o pH utilizado para a recuperação de coagulante.

Parâmetro analítico (mg.L ⁻¹)	pH 1	pH 2	pH 3	pH 4
Al	173,080 ^{a*}	158,180 ^b	64,057 ^c	14,243 ^d
Fe	64,09 ^a	41,33 ^b	27,88 ^c	24,149 ^d
Mn	5,175 ^c	6,486 ^a	5,319 ^b	4,862 ^d

*Análise estatística realizada por teste de Tukey com $\alpha = 5\%$ em software SISVAR 5.7[®] (2019). Letras diferentes entre as colunas relatam diferença estatística.

Tabela 6 - Caracterização metálica do coagulante recuperado e filtrado para pH 2 e sua relação com a norma brasileira 15784.

Parâmetro analítico	Concentração (mg.L ⁻¹)	CIPA (mg.L ⁻¹) ^a	CIPA (mg.L ⁻¹) ^b	CIPP (mg.L ⁻¹) ^c
Al	107,826	-	-	0,02
Fe	28,750	2,95	21,10	0,03
Mn	3,590	0,37	2,63	0,01
As	< 0,001	-	-	0,001
Cd	0,001	0,0001	0,0007	0,0005
Cu	0,072	0,007	0,053	0,13
Cr	< 0,007	-	-	0,005
Pb	< 0,005	-	-	0,001
Ni	< 0,007	-	-	0,007
Zn	0,087	0,009	0,064	0,5

^aCálculo realizado para a maior dosagem empregada de sulfato de alumínio recuperado (70 mg.L⁻¹); ^bcálculo realizado para coagulante recuperado levando-se em consideração a dosagem máxima de uso (500 mg.L⁻¹) sugerida para sulfato de alumínio comercial; ^cCIPP de acordo com a norma brasileira 15784 (ABNT, 2017); CIPA: concentração de impureza padronizada na água; CIPP: concentração de impureza permitida por produto.

coagulantes recuperados, podem advir diretamente da água bruta. De acordo com Xu *et al.* (2009), os ácidos húmicos possuem forte capacidade de adsorção de metais pesados. Consequentemente, quando os ácidos húmicos são removidos no tratamento de água, pode haver concentração de metais no lodo, enriquecendo o coagulante recuperado.

O coagulante recuperado filtrado obteve concentração de sulfato de alumínio de 681,31 mg.L⁻¹ (cálculo adaptado de FLORES, 2017), cerca de mil vezes menor que a do coagulante comercial utilizado na ETA. Ainda de acordo com a Tabela 6, as concentrações de impureza de cádmio, cobre e zinco no coagulante recuperado para a CIPA de maior dosagem de sulfato de alumínio recuperado a serem empregadas nos ensaios de clarificação (70 mg.L⁻¹) atenderam à CIPP (ABNT, 2017), no entanto as concentrações de ferro e manganês foram superiores.

Com relação à CIPA calculada para o coagulante recuperado, levando-se em consideração a maior dosagem de coagulante comercial recomendada pelo fornecedor (DMU), as concentrações de cádmio, cobre, zinco, ferro e manganês foram superiores à CIPP. Portanto, o emprego do coagulante recuperado não seria recomendado para o tratamento de águas para consumo humano. Nesse caso, uma sugestão, conforme Gonçalves *et al.* (1999) e Keeley, Jarvis e Judd (2014), seria o emprego do coagulante recuperado em sistemas de tratamento físico-químico de efluentes, auxiliando na remoção de sólidos, DQO e fósforo.

Caracterização do resíduo insolúvel

A análise do resíduo insolúvel comparado ao LETA inicial é apresentada na Figura 3.

Após o processo de extração, houve redução no pH do resíduo não solubilizado e modificações consideráveis em parâmetros como DBO, DQO e COT, quando comparados aos do LETA inicial. As concentrações de alumínio, ferro, manganês, zinco, níquel e cobre mais elevadas podem indicar a estabilidade inicial que compostos metálicos obtêm quando passam pela formação de hidróxidos no processo de coagulação/floculação realizado em ETAs. Segundo Bishop *et al.* (1987), cerca de 45% dos sólidos presentes no lodo se encontram na forma de hidróxidos.

Além disso, as espécies hidrolisadas ao serem adsorvidas em colóides inorgânicos possibilitariam a presença de alumínio nas estruturas dos materiais argilosos e silicosos contidos na água bruta. A não solubilização dessas espécies hidrolisadas, nas condições usadas pela técnica de via ácida (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2012), e a dificuldade de separação efetiva entre o coagulante recuperado e o resíduo insolúvel podem ter propiciado, a este último, formas metálicas solúveis em maiores concentrações, o que pode acarretar características de maior toxicidade e dificuldades na destinação final.

Finalmente, no âmbito das questões ambientais e atentando-se às diretrizes da Lei nº 12.305/2010 (BRASIL, 2010), a aplicação de regeneração de coagulante, como testado neste estudo, mostra-se como uma alternativa ao tratamento do resíduo gerado em ETAs, demonstrando que LETAs, após passarem pelo processo de recuperação de coagulante, podem apresentar facilidade de desidratação — como tratamento posterior —, fornecendo diminuição do volume final de resíduo insolúvel (ABOY, 1999), sugerindo-se a neutralização do resíduo ácido insolúvel obtido para posterior destinação deste como resíduo inerte (KEELEY; JARVIS; JUDD, 2014).

Análise de eficiência de remoção de turbidez

Turbidez remanescente para água bruta de baixa turbidez

A aplicação do coagulante comercial proporcionou remoção $\geq 75\%$ (Figura 4A) em uma faixa restrita, como pode ser observado na Figura 4.

Os melhores pares de dosagem de coagulante \times pH, apresentados na zona (C), localizam-se em região onde predominam mecanismos de adsorção, neutralização de cargas e combinação de ambos. Dessa forma, em baixa turbidez, a água bruta poderia passar pelo processo filtração direta descendente, o que minimizaria as quantidades de coagulante que, por ventura, possam ser utilizadas (DI BERNARDO; DANTAS; VOLTAN, 2017).

O coagulante recuperado, representado na Figura 5, apresentou eficiência de remoção de turbidez $\geq 50\%$ (Figura 5B) em faixa um pouco mais ampla, com pH entre 6 e 8.

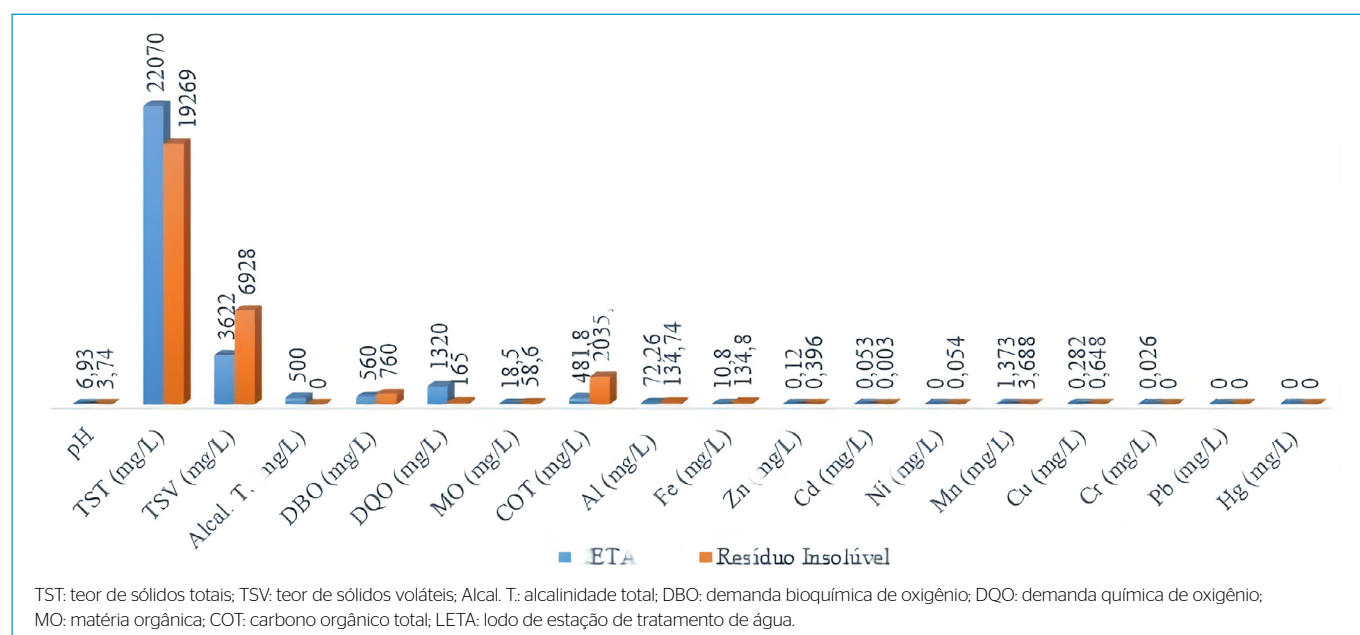


Figura 3 – Comparativo do LETA com o resíduo insolúvel.

As dosagens mais elevadas em grande parte dos ensaios mostrados na Figura 5 evidenciam a ocorrência de coagulação por mecanismo de varredura. Não obstante, em pH 6, houve região ótima de coagulação, com remoção ≥ 75%, bem como a melhor dosagem de 10 mg.L⁻¹ (Figura 5C) com turbidez remanescente próxima a 1 uT.

Turbidez remanescente para água bruta de elevada turbidez

Para o coagulante comercial, na Figura 6, os resultados foram concordantes aos da água bruta de baixa turbidez. A melhor dosagem de coagulante × pH, representada pela Figura 6A, bem como as regiões com eficiência de remoção superior a 90%, representadas pela Figura 6B, corresponde à região ótima de floculação, com predominância de mecanismos de coagulação por varredura.

Percebe-se, para o coagulante recuperado apresentado na Figura 7, ampla faixa de variação do par dosagem de coagulante × pH com bons resultados, com remoção ≥ 90% (Figura 7B) e três regiões de remoção ≥ 95% (Figura 7A), obtendo-se resultados superiores aos do coagulante comercial.

Análise da eficiência de remoção de cor

Cor aparente remanescente para água bruta de baixa turbidez

O coagulante comercial, de acordo com a Figura 8, apresentou remoção de cor aparente ≥ 50% (Figura 8B), em praticamente todas as dosagens testadas, no intervalo de pH entre 6 e 8. A remoção de cor aparente ≥ 90% (Figura 8A) foi

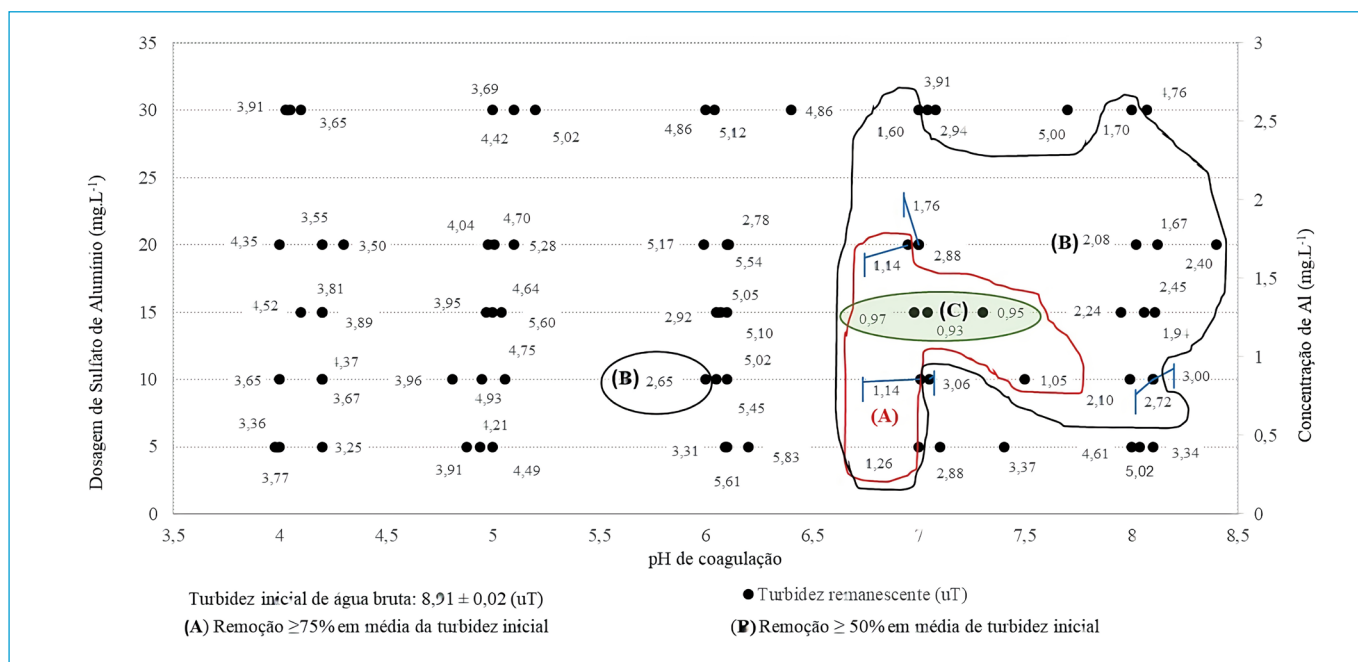


Figura 4 – Diagrama de coagulação/floculação utilizando sulfato de alumínio comercial – turbidez remanescente.

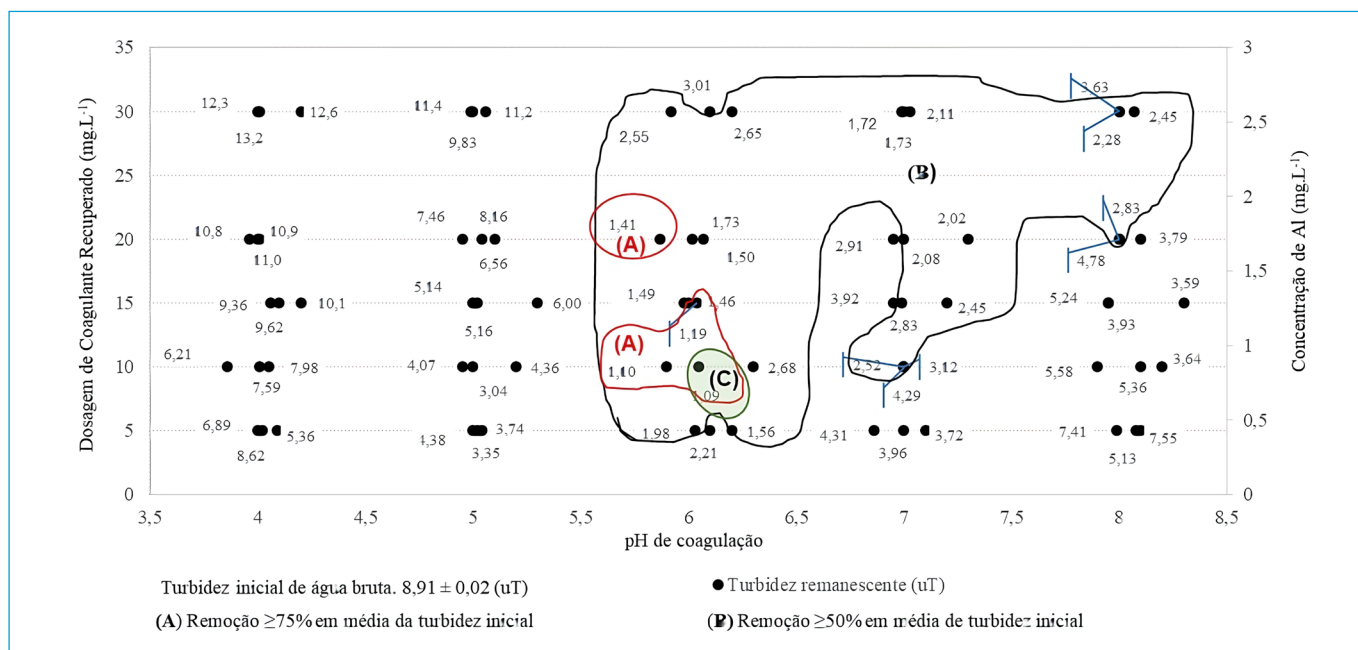


Figura 5 – Diagrama de coagulação/floculação utilizando coagulante recuperado – turbidez remanescente.

restrita a uma menor faixa de pH e a dosagens de coagulante. Em relação ao melhor par dosagem de coagulante x pH, três ensaios alcançaram cor aparente remanescente ≤ 1 uC, todos entre pH 7 e 7,5 e com dosagens de 10 e 15 mg.L⁻¹.

O coagulante recuperado pode ter, em alguns ensaios, acrescentado características indesejáveis na água bruta, vindo a aumentar os valores de cor aparente, conforme pode ser observado na Figura 9.

O decréscimo de cor aparente foi apenas a uma faixa muito restrita de pH e dosagem (Figura 9A), a qual coincide com a região de remoção $\geq 75\%$ de turbidez, apresentada na Figura 5, demonstrando novamente relação entre esses dois parâmetros. Já as demais áreas do diagrama demonstram a particularidade de acréscimo de cor aparente. Isso pode estar relacionado à presença elevada

de ferro na forma de impureza no coagulante recuperado — com formação de flocos pequenos e baixa velocidade de sedimentação (CETESB, 2020) —, bem como de sólidos inertes e compostos orgânicos de cadeia molecular grande (GONÇALVES *et al.*, 1999) que podem ter sido adicionados na água natural pelo coagulante recuperado.

Cor verdadeira remanescente para água bruta de baixa turbidez

A cor verdadeira apresentou valores ≤ 1 uC para o coagulante comercial (Figura 10), bem como para o coagulante recuperado exibido na Figura 11A. Em média, a remoção de cor verdadeira foi superior a 90% para o coagulante comercial, em praticamente todos os ensaios realizados.

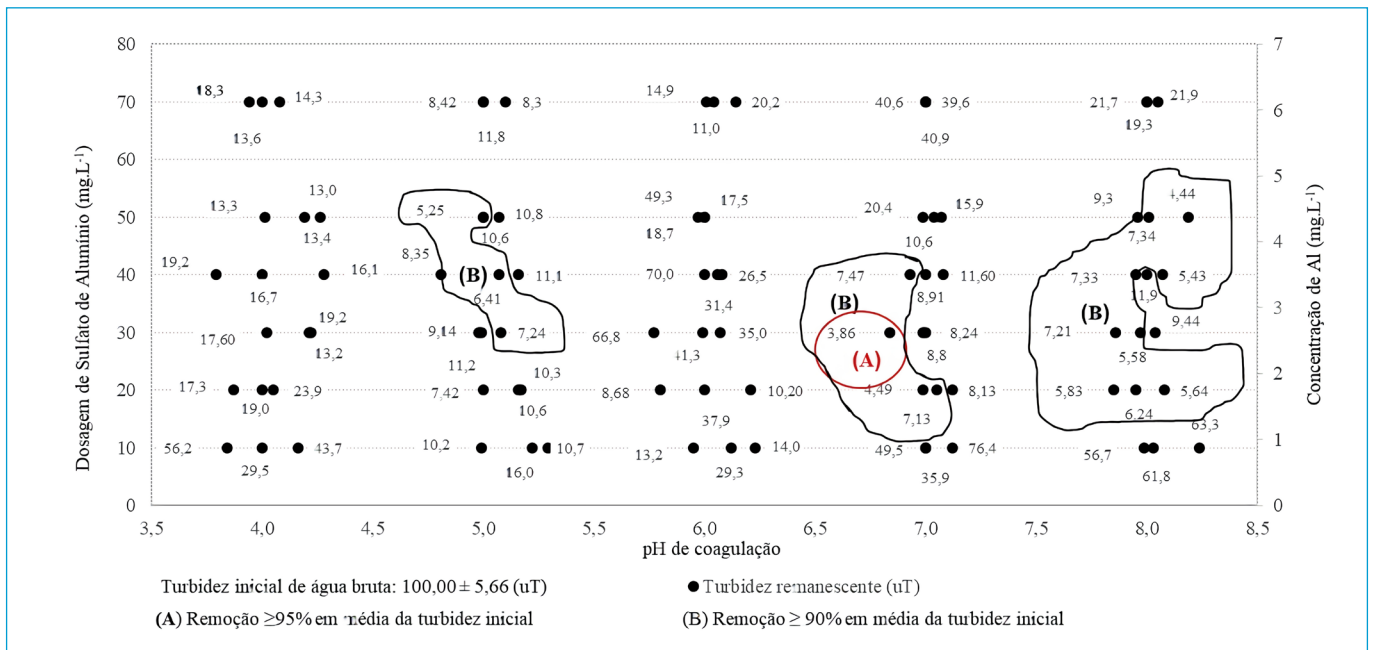


Figura 6 - Diagrama de coagulação/floculação utilizando sulfato de alumínio comercial – turbidez remanescente.

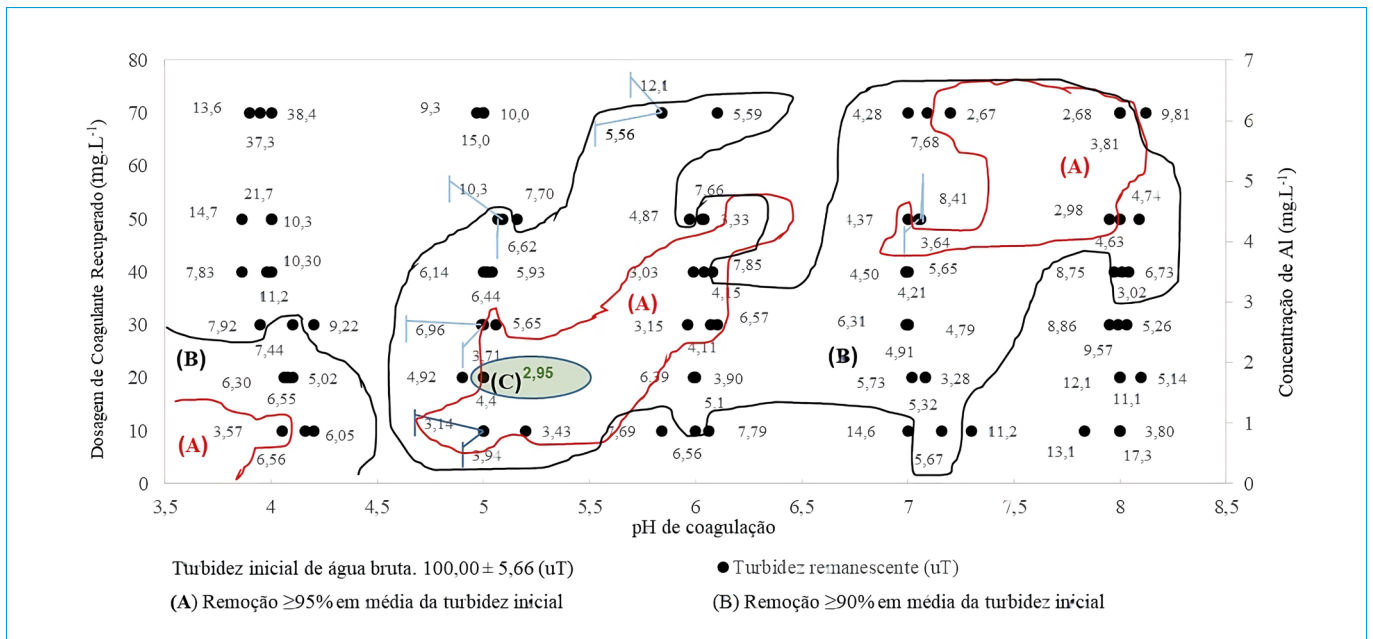


Figura 7 - Diagrama de coagulação/floculação utilizando coagulante recuperado – turbidez remanescente.

Os bons resultados do coagulante recuperado da Figura 11, em baixas dosagens e em pH acima de 6 (Figura 11A), decorreram da predominância dos mecanismos de neutralização de cargas e combinação de mecanismos.

Cor aparente remanescente para água bruta de elevada turbidez

O coagulante comercial indicado pela Figura 12 apresentou duas áreas de remoção para pHs diferenciados. Pode-se supor que a remoção de cor aparente tenha ocorrido por mecanismos de adsorção, neutralização de cargas e varredura. Os melhores pares dosagem de coagulante x pH (Figura 12C) para cor aparente também coincidem aos de turbidez.

Observando a Figura 13, houve diminuição de cor aparente por intermédio da aplicação do coagulante recuperado, o que se remete ao seu melhor desempenho em águas com turbidez mais elevada.

A Figura 13B representa remoção de cor verdadeira ≥ 75%, abrangendo todas as faixas de pH testadas. O par dosagem de coagulante x pH mais eficiente na remoção de cor aparente (Figura 13C) também coincide com a região de remoção ≥ 95% de turbidez, verificada na Figura 5, no entanto vale a ressalva de que a característica do coagulante recuperado em transferir cor aparente à água pode ser uma limitação ao seu emprego no tratamento de água de abastecimento.

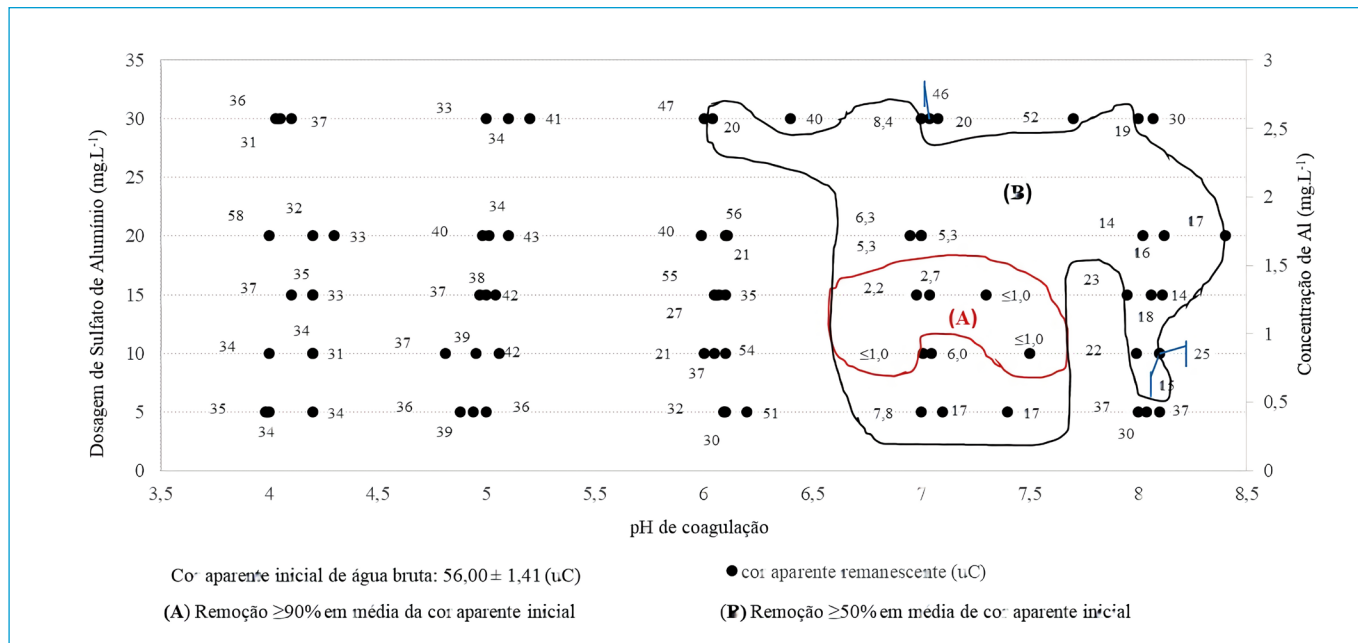


Figura 8 – Diagrama de coagulação/floculação para sulfato de alumínio comercial – cor aparente remanescente.

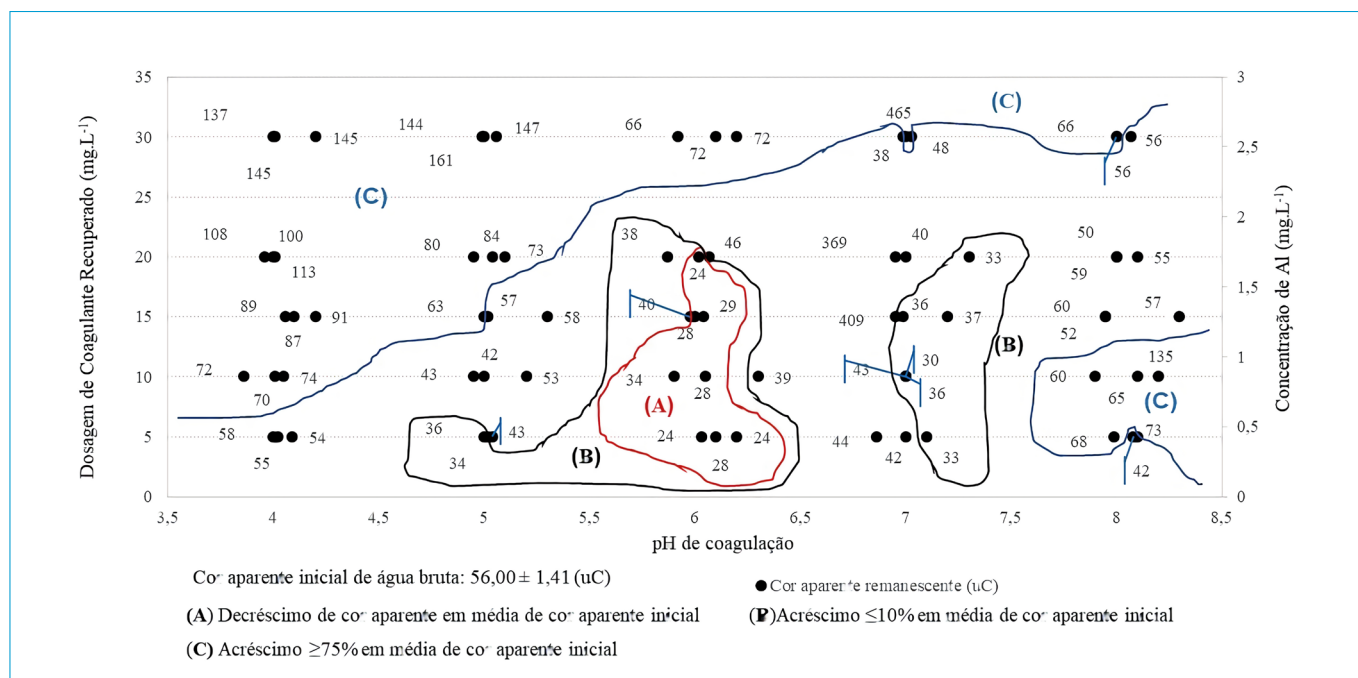


Figura 9 – Diagrama de coagulação/floculação para coagulante recuperado – cor aparente remanescente.

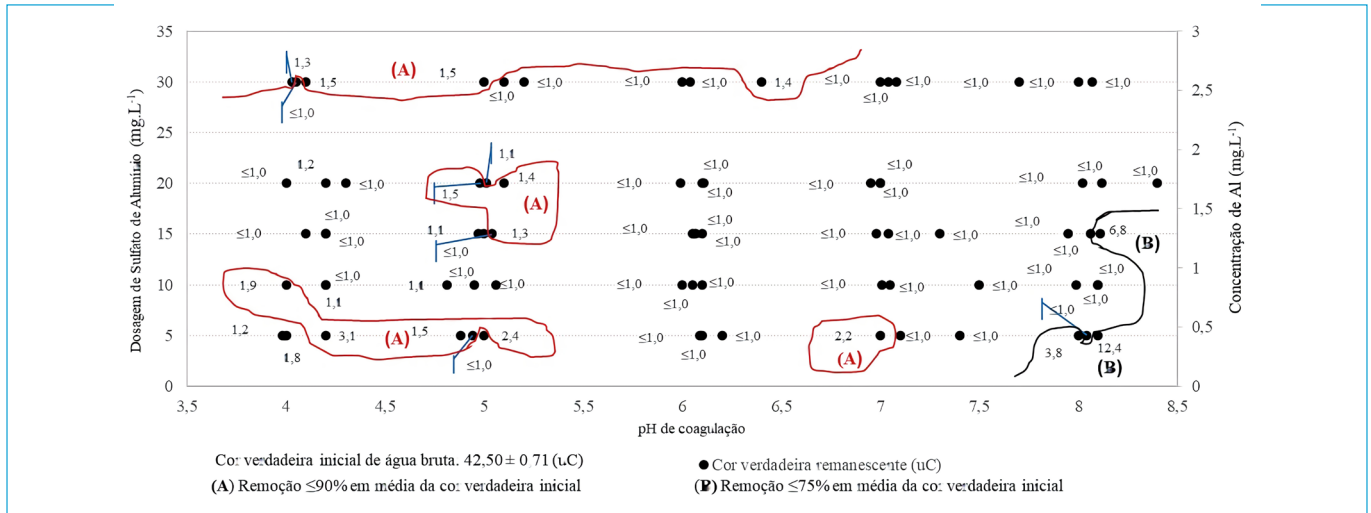


Figura 10 - Diagrama de coagulação/floculação para sulfato de alumínio comercial – cor verdadeira remanescente.

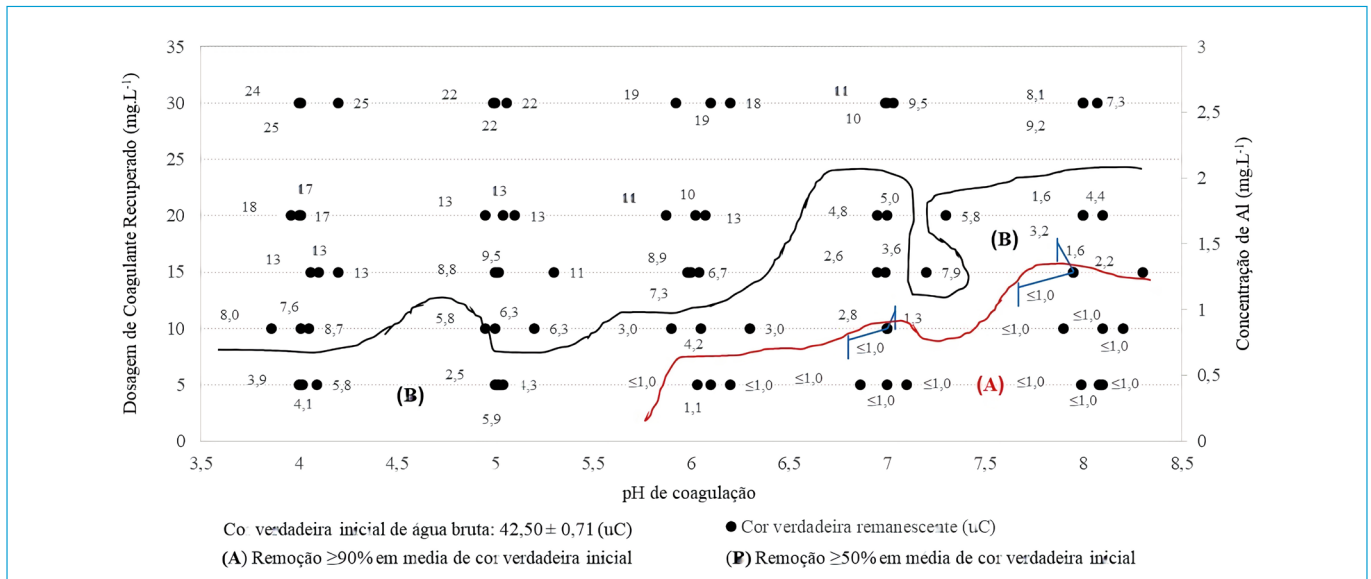


Figura 11 - Diagrama de coagulação/floculação para coagulante recuperado – cor verdadeira remanescente.

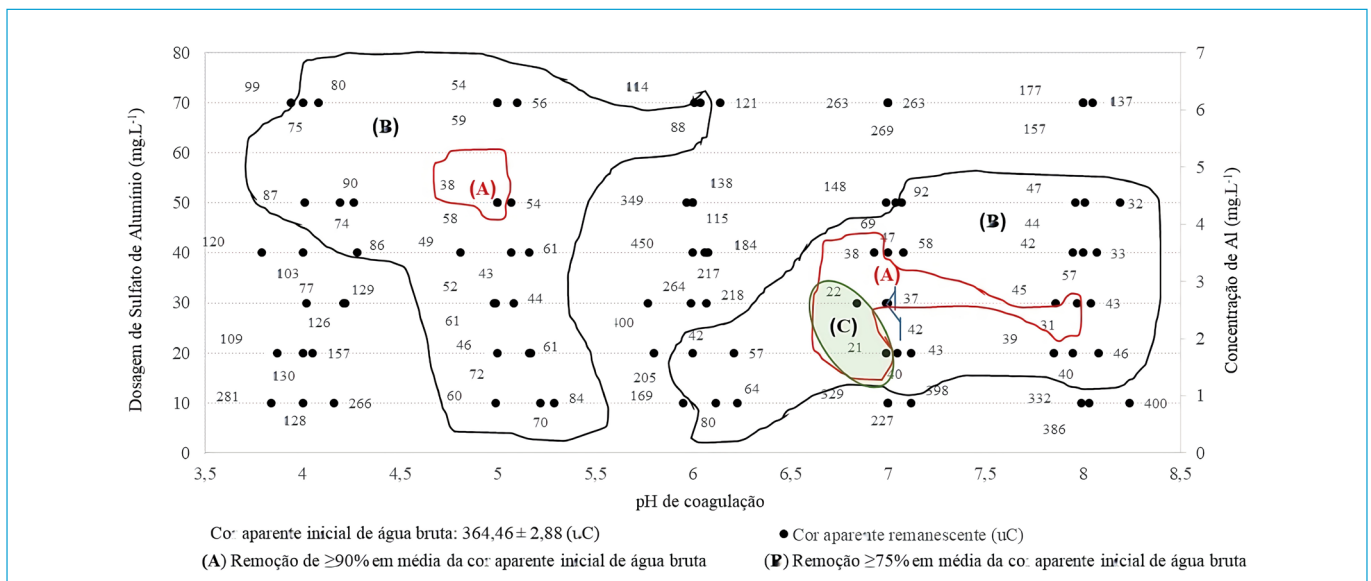


Figura 12 - Diagrama de coagulação/floculação para coagulante sulfato de alumínio comercial – cor aparente remanescente.

Cor verdadeira remanescente para água bruta de elevada turbidez

A cor verdadeira apresentou valores ≤ 1 uC em praticamente todos os ensaios realizados com o coagulante comercial, como pode ser observado na Figura 14. A menor eficiência (Figura 14C) também se localiza em região de menor eficiência de remoção de turbidez, conforme a Figura 4, e de cor aparente, de acordo com a Figura 12.

Observando-se a Figura 15, para o coagulante recuperado, a área de melhor eficiência de remoção para cor verdadeira ($\geq 90\%$, Figura 15C) coincide com a de eficiência de remoção de turbidez $\geq 50\%$ apresentada na Figura 5. Os pares

de dosagem de coagulante \times pH mais eficientes também foram coincidentes com a zona de coagulação por varredura. Zonas de menor remoção de cor verdadeira, em pH mais elevado e baixas dosagens (Figura 15B), na Figura 15, foram semelhantes às apresentadas na Figura 14.

CONCLUSÕES

Apesar de o pH 1 ter sido mais eficiente ao prover maior volume de coagulante recuperado, por questão econômica, em relação à quantidade de ácido necessária à acidificação, houve a escolha do pH 2.

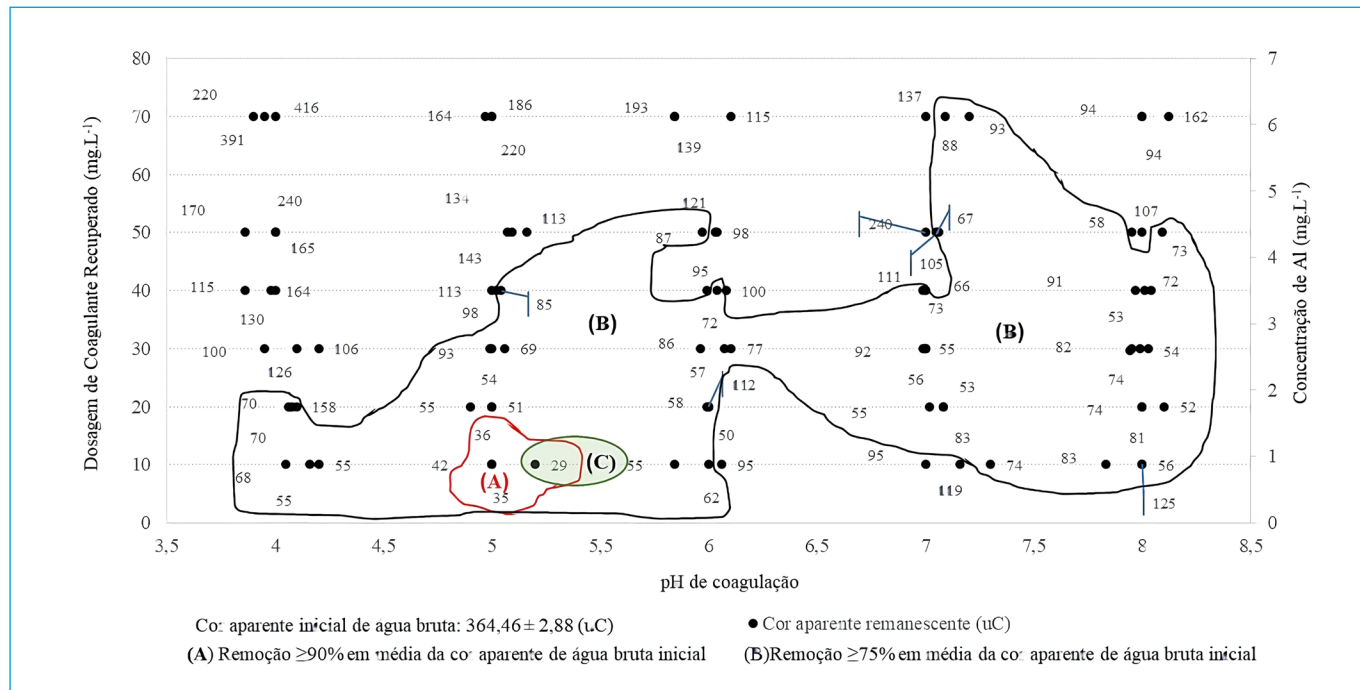


Figura 13 - Diagrama de coagulação/floculação para coagulante recuperado – cor aparente remanescente.

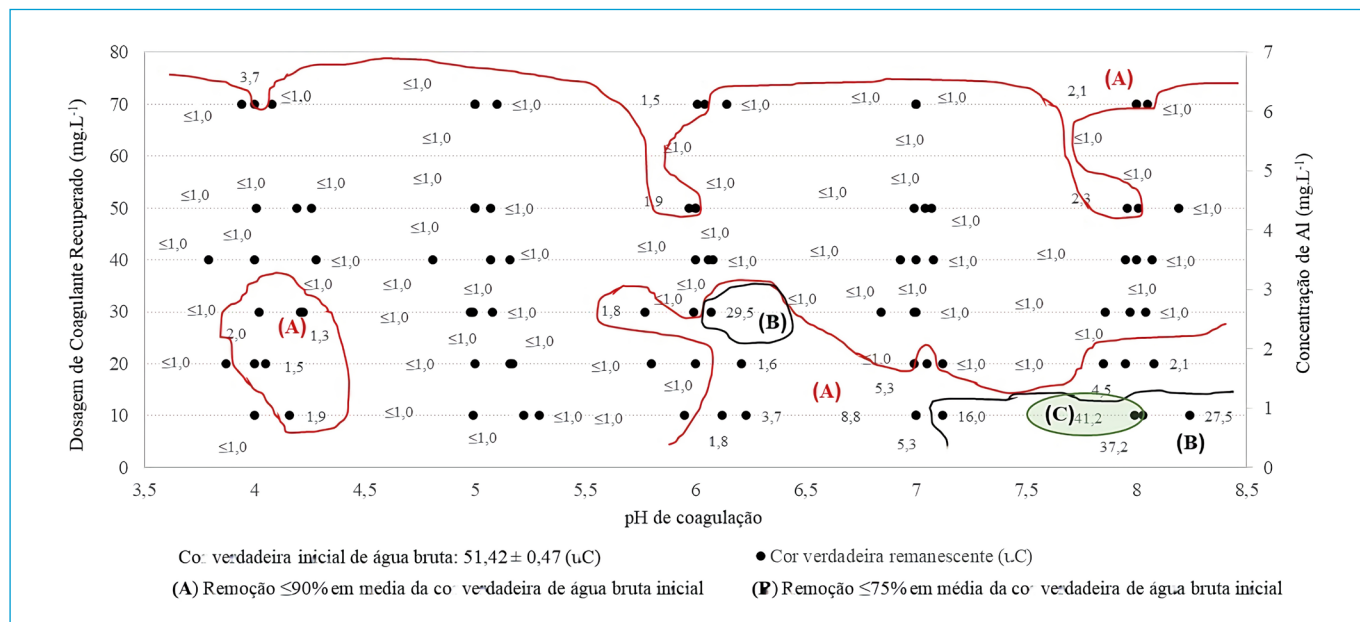


Figura 14 - Diagrama de coagulação/floculação para sulfato de alumínio comercial – cor verdadeira remanescente.

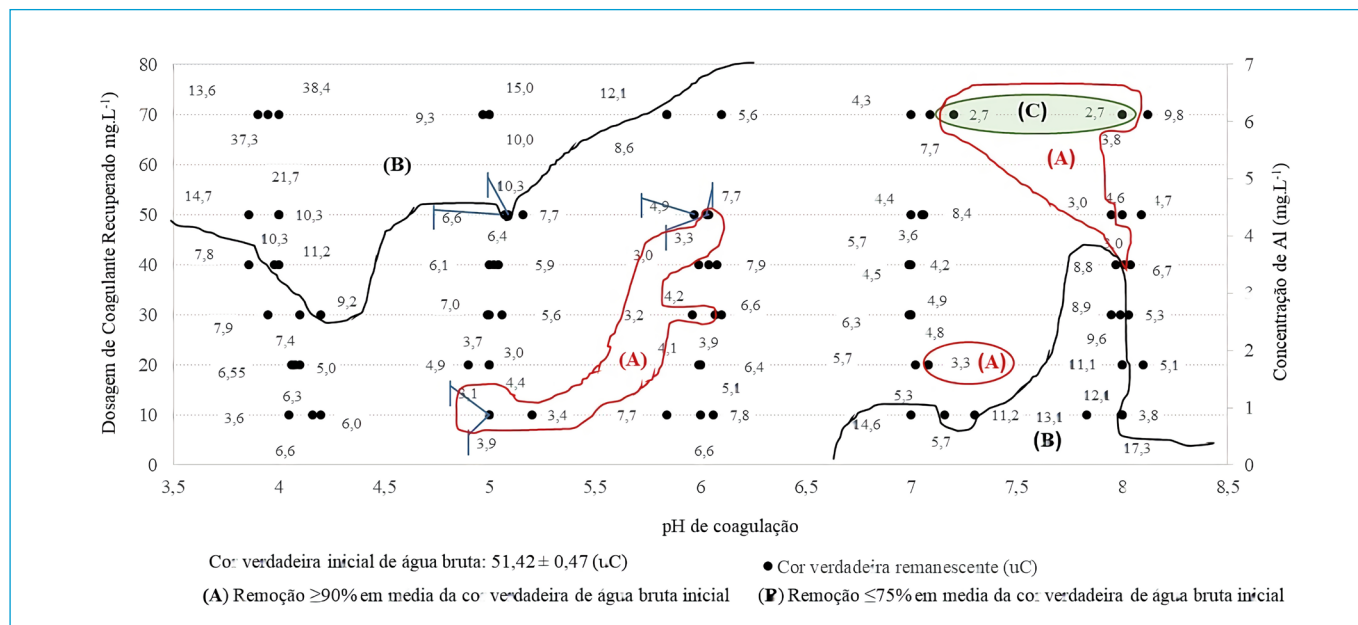


Figura 15 - Diagrama de coagulação/floculação para coagulante recuperado – cor verdadeira remanescente.

O coagulante recuperado obteve concentração final de sulfato de alumínio de $681,31 \text{ mg.L}^{-1}$, no entanto o processo de extração não se apresentou seletivo, havendo a presença de diversos metais. Entre eles, alguns estiveram acima da CIPP. Não seria indicado, portanto, o seu emprego em tratamento de águas para consumo humano.

O resíduo final insolúvel, em razão do baixo valor de pH e da presença de metais, principalmente alumínio e ferro solubilizados, pode ser de difícil tratamento e impossibilitar algumas formas de destinação final.

Conforme os diagramas de coagulação, o coagulante comercial apresentou resultados satisfatórios para águas de elevada e baixa turbidez. Por sua

vez, o coagulante recuperado, nos ensaios com água bruta de elevada turbidez, apresentou maior faixa de aplicabilidade de coagulação, porém a remoção de cor aparente e verdadeira pode ser limitante à sua utilização no tratamento de águas naturais.

CONTRIBUIÇÕES AOS AUTORES

Pedretti, A.: Investigação, Metodologia, Recursos, Administração do Projeto, Validação, Escrita — Primeira Redação. Medeiros, R.C.: Conceituação, Curadoria de Dados, Supervisão, Escrita — Revisão e Edição.

REFERÊNCIAS

- ABOY, N. *Secagem natural e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. 153f. Dissertação (Mestrado em Engenharia de Recursos Hídricos e Saneamento Ambiental) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1999.
- ACHON, C.L.; BARROSO, M.M.; CORDEIRO, J.S. Resíduos de estações de tratamento de água e a ISO 24512: desafio do saneamento brasileiro. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 18, n. 2, p. 115-122, abr./jun. 2013. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522013000200003>
- AMÂNCIO, DV.; RODRIGUES, F.N.; RIBEIRO, K.D.; COELHO, G. Caracterização do lodo gerado numa estação de tratamento de água. *Sustentare*, v. 1, n. 1, p. 29-44, 2017.
- AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION (APHA); AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION (AWWA); WATER ENVIRONMENT FEDERATION (WEF). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23. ed. Washington, D.C.: APHA, AWWA, WEF, 2017. 1504 p.
- ARAÚJO, F.C.; SCALIZE, P.S.; ALBUQUERQUE, A.; ANGELIM, R.R. Caracterização física do resíduo de uma estação de tratamento de água para sua utilização em materiais de construção. *Cerâmica*, v. 61, n. 360, p. 450-456, 2015. <https://doi.org/10.1590/O366-69132015613601931>
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10004*: Resíduos Sólidos: classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2004. 77 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 10739*: água - determinação de oxigênio consumido: método do permanganato de potássio. Rio de Janeiro: ABNT, 1989. 3 p.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). *NBR 15784*: produtos químicos utilizados no tratamento de água para consumo humano - efeitos à saúde - requisitos. Rio de Janeiro: ABNT, 2017. 39 p.
- BISHOP, M.M.; ROLAN, A.T.; BAILEY, T.L.; CORNWELL, D.A. Testing of alum recovery for solids reduction and reuse. *Journal American Water Works Association*, v. 79, n. 6, p. 76-83, jun. 1987. Disponível em: <http://www.jstor.org/stable/41290687>. Acesso em: 25 out. 2015.

BRASIL. Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos; altera a Lei nº 9.605, de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. *Diário Oficial da União*, Brasília, 2010.

CUNHA, G.D.; STACHIW, R.; QUADROS, K.M. Lodo de estação de tratamento de água como componente para germinação de mudas florestais. *Revista Ibero Americana de Ciências Ambientais*, v. 11, n. 1, p. 40-53, 2020. <http://doi.org/10.6008/CBPC2179-6858.2020.001.0005>

COMPANHIA AMBIENTAL DO ESTADO DE SÃO PAULO (CETESB). Apêndice C: Significado ambiental e sanitário das variáveis de qualidade das águas e dos sedimentos e metodologias analíticas e de amostragem. In: CETESB. *Relatório de qualidade das águas interiores do estado de São Paulo*. CETESB, 2020. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/aguas-interiores/publicacoes-e-relatorios/>. Acesso em: 31 jul. 2022.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. *Métodos e técnicas de tratamento de água*. São Carlos: LDiBe, 2017. 1246 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. *Métodos e técnicas de tratamento e disposição dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. São Carlos: LDiBe, 2012. 540 p.

DI BERNARDO, L.; DANTAS, A.D.B.; VOLTAN, P.E.N. *Tratabilidade de água e dos resíduos gerados em estações de tratamento de água*. São Carlos: LDiBe, 2011. 454 p.

FERREIRA FILHO, S.S.; WAELKENS, B.E. Minimização da produção de lodo no tratamento de águas de abastecimento mediante uso do cloreto de polialumínio e sua disposição em estações de tratamento de esgotos. *Engenharia Sanitária e Ambiental*, v. 14, n. 3, p. 317-326, jul./set. 2009. <https://doi.org/10.1590/S1413-41522009000300005>

FLORES, L.S. *Recuperação do coagulante cloreto de polialumínio proveniente de uma estação de tratamento de água para abastecimento*. 86f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Ambiental e Sanitária) - Universidade Federal de Santa Maria, Frederico Westphalen, 2017.

GUIMARÃES, N.C. *Recuperação de coagulante a partir da acidificação de resíduos gerados na estação de tratamento de água do Rio Manso*. 141f. Dissertação (Mestrado em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos) - Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2005.

GONÇALVES, R.F.; BARRETO, E.; BRANDÃO, J.T.; PIOTTO, Z. Recuperação de coagulantes de lodos de estações de tratamento de água. In: REALI, M.A.P. (Coord.). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: PROSAB, 1999. 225 p.

KEELEY, J.; JARVIS, P.; JUDD, S.J. Coagulant recovery from water treatment residuals: a review of applicable technologies. *Critical reviews. Environmental Science and Technology*, v. 44, n. 24, p. 2675-2719, 2014. <https://doi.org/10.1080/10643389.2013.829766>

REALI, M.A.P. Recuperação de coagulantes de lodo de estações de tratamento de água. In: REALI, M.A.P. (Coord.). *Noções gerais de tratamento e disposição final de lodo de estações de tratamento de água*. Rio de Janeiro: ABES/PROSAB, 1999. p. 21-39.

RICHTER, C.A. *Tratamento de lodos de estações de tratamento de água*. São Paulo: Edgard Blücher, 2001. 112 p.

RICHTER, C.A.; NETTO, J.M.A. *Tratamento de água: tecnologia atualizada*. São Paulo: Edgard Blücher, 2017. 332 p.

RIO GRANDE DO SUL. Decreto nº 53.885, de 16 de janeiro de 2018. Institui subdivisão das regiões hidrográficas do estado do Rio Grande do Sul em bacias hidrográficas. *Diário Oficial Eletrônico do Estado do Rio Grande do Sul*, Porto Alegre, 2018.

VILLEGAS, J.D.; CANTAÑO, J.M.; CUERVO, D.P. Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en plantas de potabilización de agua. *Scientia et Technica*, v. 2, n. 28, p. 223-228, 2005. <https://doi.org/10.22517/23447214.6847>

XU, G.R.; YAN, Z.C.; WANG, Y.C.; WANG, N. Recycle of Alum recovered from water treatment sludge in chemically enhanced primary treatment. *Journal of Hazardous Materials*, v. 161, n. 2-3, p. 663-669, 2009. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.008>