

# RESSALVA

Atendendo solicitação do autor,  
o texto completo deste documento será  
disponibilizado a partir de  
02/04/2025.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
CAMPUS DE ILHA SOLTEIRA**

**CRISTIAN DANILO VARGAS VELEZ**

**RECUPERAÇÃO DO COAGULANTE DO LODO DA ETA CENTENARIO (PASTO,  
COLÔMBIA) E AVALIAÇÃO DO REUSO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E  
TRATAMENTO PRIMARIO AVANÇADO DE ESGOTO URBANO**

Ilha Solteira - SP

2024

**CRISTIAN DANILO VARGAS VELEZ**

**RECUPERAÇÃO DO COAGULANTE DO LODO DA ETA CENTENARIO (PASTO,  
COLÔMBIA) E AVALIAÇÃO DO REUSO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E  
TRATAMENTO PRIMARIO AVANÇADO DE ESGOTO URBANO**

Documento para Dissertação apresentada à Universidade Estadual Paulista (UNESP), Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira, para obtenção do título de Mestre em Engenharia Civil.

Área de Concentração: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais

Orientador(a): Prof. Dr. Iván Andrés Sánchez Ortiz

Coorientador(a): Prof. Dr. Tsunao Matsumoto

Ilha Solteira - SP

2024

FICHA CATALOGRÁFICA

Desenvolvida pela Diretoria Técnica de Biblioteca e Documentação

V297r Vargas Velez, Cristian Danilo.  
Recuperação do coagulante do lodo da ETA centenário (pasto, colômbia) e avaliação do reuso para tratamento de água e tratamento primário avançado de esgoto urbano / Cristian Danilo Vargas Velez . -- Ilha Solteira: [s.n.], 2024  
112 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Estadual Paulista. Faculdade de Engenharia de Ilha Solteira. Área de conhecimento: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais, 2024

Orientador: Iván Andrés Sánchez Ortiz

Coorientador: Tsunao Matsumoto

Inclui bibliografia

1. Lodo de estação de tratamento de água. 2. Recuperação do coagulante. 3. Acidificação. 4. Remoção.

## **IMPACTO POTENCIAL DESTA PESQUISA**

Esta pesquisa e seus resultados têm um impacto positivo em alternativas que auxiliam na correta gestão e destinação do Lodo de Estações de Tratamento de Água (LETA) os quais são gerados em quantidades significativas e que, atualmente, são despejados sem tratamento prévio nas águas superficiais, gerando problemas ambientais que colocam em risco os serviços ecossistêmicos para a sociedade em geral. As alternativas avaliadas nesta pesquisa para recuperação de coagulante apresentaram resultados eficazes e demonstraram sua capacidade de remover cor e turbidez, em esgoto urbano contribuindo para que futuros estudos padronizem metodologias de recuperação e reutilização que permitam dimensionar em escala real a implementação destes coagulantes recuperados como tratamento primário avançado de esgoto. Adicionalmente, estes processos são uma possibilidade para utilização de coagulantes recuperados que representem uma diminuição considerável dos custos operacionais e na aquisição de coagulantes puros para Estações de Tratamento de Esgoto (ETE) ou para ETA's como à da empresa EMPOPASTO, onde foi realizada esta pesquisa e que utiliza sistemas de tratamento convencionais com adição de coagulantes à base de alumínio, para o correto gerenciamento e descarte deste subproduto.

## **POTENTIAL IMPACT OF THIS RESEARCH**

This research and its results have a positive impact on alternatives helping the correct management and disposal of Water Treatment Plants Sludge (WTPS), which is generated in significant quantities and is currently dumped out without prior treatment into surface waters causing environmental problems that put ecosystem services at risk for people in general. The evaluated alternatives for coagulant recovery in this research showed effective results and demonstrated their ability to remove color and turbidity in urban sewage, which contributes to future studies to standardize recovery and reuse methodologies that allow dimensioning the implementation of these recovered coagulants as an advanced primary sewage treatment on a real scale. In addition, these processes are a possibility for using recovered coagulants that represent a considerable reduction in operational costs and in the acquisition of pure coagulants for Sewage Treatment Stations (STS) or Water Treatment Plants (WTP) such as EMPOPASTO company, where this research was carried out and which uses conventional treatment systems adding aluminum-based coagulants for the correct management and disposal of this by-product.

CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO DA DISSERTAÇÃO: RECUPERAÇÃO DO COAGULANTE DO LODO DE ETA CENTENÁRIO (PASTO, COLÔMBIA) E AVALIAÇÃO DO REUSO PARA TRATAMENTO DE ÁGUA E TRATAMENTO PRIMÁRIO AVANÇADO DE ESGOTO URBANOS


AUTOR: CRISTIAN DANILO VARGAS VELEZ

ORIENTADOR: IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ


COORIENTADOR: TSUNAO MATSUMOTO

Aprovado como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Engenharia Civil, área: Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais pela Comissão Examinadora:

Prof. Dr. IVÁN ANDRÉS SÁNCHEZ ORTIZ (Participação Virtual)  
Departamento de Recursos Hidrobiológicos / Universidad de Narino

Documento assinado digitalmente  
 IVAN ANDRES SANCHEZ ORTIZ  
Data: 02/10/2024 23:07:05-0300  
Verifique em <https://validor.it.gov.br>

Profa. Dra. ROSANE FREIRE BOINA (Participação Virtual)  
Departamento de Química e Bioquímica / Faculdade de Ciências e Tecnologia - UNESP

Documento assinado digitalmente  
 ROSANE FREIRE BOINA  
Data: 02/10/2024 13:51:01-0300  
Verifique em <https://validor.it.gov.br>

Prof. Dr. ISMARLEY MORAIS (Participação Virtual)  
Departamento de Engenharia Civil / Universidade Federal de Uberlândia - UFU

Documento assinado digitalmente  
 ISMARLEY LAGE HORTA MORAIS  
Data: 02/10/2024 15:43:07-0300  
Verifique em <https://validor.it.gov.br>

Ilha Solteira, 02 de outubro de 2024

Dedico este trabalho à minha família, que com seu amor e educação, independentemente das diferentes circunstâncias da vida, estiveram presentes, apoiando-me incondicionalmente para cumprir todos os objetivos acadêmicos e pessoais.

## **AGRADECIMENTOS**

O presente trabalho foi realizado com apoio da empresa EMPOPASTO S.A E.S.P., principalmente às áreas de produção e laboratório de águas, obrigado pelo financiamento e apoio técnico, nas diferentes análises realizadas nas suas instalações.

Agradeço ao Laboratório de Análises Especializado da Universidade de Nariño, pelo aconselhamento na análise de amostras por Espectrometria de Absorção Atômica, para a quantificação de recuperação de coagulantes.

Agradeço ao Mestre Arsenio Hidalgo, professor do Departamento de Matemática e Estatística da Universidade de Nariño, pela orientação nas diversas análises estatísticas realizadas neste trabalho.

Agradeço ao Prof. Dr. Iván Andrés Sánchez Ortiz, do programa de Pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pelos ensinamentos em meu processo formativo em todas as etapas e pela vocação para a docência.

Agradeço ao Prof. Dr. Tsunao Matsumoto, do programa de pós-graduação em Engenharia Civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho” pelas contribuições no desenvolvimento deste trabalho e na minha formação.

Agradeço ao programa de Pós-graduação em Engenharia civil, Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, pela oportunidade e conhecimento proporcionados para minha formação como mestre.

“As universidades serão o que são suas bibliotecas” (Gelfand, 1968, p. 19, tradução nossa).

## RESUMO

Há décadas, as estações convencionais de tratamento de água utilizam soluções coagulantes à base de alumínio para remover substâncias coloidais e outras partículas suspensas na água bruta. Esse processo gera grande quantidade de um subproduto conhecido como Lodo de Estação de Tratamento de Água (LETA), que geralmente é descartado em rios mais próximos sem tratamento prévio. O lodo é rico em alumínio, isso gera graves problemas ambientais para as águas superficiais e para os ecossistemas próximos, razão pela qual foram realizados diversos estudos para avaliar seu potencial de reutilização em diferentes processos como a agricultura, fabricação de materiais de construção, absorção de contaminantes e reutilização como coagulante. A recuperação do coagulante por meio da acidificação é uma das mais promissoras alternativas, que consiste na solubilização do alumínio presente no lodo após a adição de ácido sulfúrico, o que permitirá sua recuperação e posterior reutilização. O pH e velocidade de mistura são alguns dos fatores envolvidos nesse processo. Este trabalho avaliou dois tratamentos de recuperação de coagulante de lodo de alumínio da Estação de Tratamento de Água (ETA) Centenário (Pasto, Colômbia), o primeiro por meio de processos de acidificação utilizando ácido sulfúrico 98%, para obter 4 níveis diferentes de pH (1,5-2,0-2,5-3,0), os quais foram combinados com 4 níveis de velocidade de mistura (125-150-175-200 rpm) obtendo 16 tratamentos, o segundo foi um tratamento térmico de desidratação usando um forno a 200°C seguido de peneiramento em malha de 1x1 mm. Posteriormente, foi avaliada a capacidade desses coagulantes recuperados na remoção de cor e turbidez em esgoto urbano bruto e água bruta. Os principais resultados registrados indicaram que na metodologia de recuperação por acidificação, registrou os maiores valores de alumínio em pH 1,5 até 810,5 mg Al/L, sendo o pH a variável que mais influenciou nesse processo. Por outro lado, ao comparar os coagulantes recuperados pelos dois tratamentos, ficou evidente que os coagulantes obtidos pelo método ácido obtiveram maior remoção de cor e turbidez com valores de remoção até de 95,84% e 97,06% em esgoto e 69,78% e 69,73 na água bruta.

**Palavras-chave:** lodo de estação de tratamento de água; recuperação do coagulante; acidificação; remoção.

## ABSTRACT

For decades, conventional water treatment plants have used aluminum-based coagulant solutions to remove colloidal substances and other particles suspended in raw water. This process generates a large quantity of a by-product known as Water Treatment Plant Sludge (WTPS), which is usually dumped out in nearby rivers without prior treatment. This sludge is rich in aluminum, which creates serious environmental problems for surface waters and nearby ecosystems. This is the reason why several studies were carried out to evaluate its reuse potential in different processes such as agriculture, manufacture of building materials, absorption of contaminants and its reuse as a coagulant. The recovery of the coagulant through acidification is one of the most promising alternatives. This process consists of solubilizing the aluminum present in the sludge after adding sulfuric acid, which will allow its recovery and subsequent reuse. pH and mixing speed are some of the factors involved in this process. This work evaluated two coagulant recovery treatments from aluminum sludge from the Centenario Water Treatment Station (WTS) (Pasto, Colombia), the first through acidification processes using 98% sulfuric acid to obtain 4 different pH levels. (1.5-2.0-2.5-3.0), which were combined with 4 mixing speed levels (125-150-175-200 rpm) obtaining 16 treatments, the second was a thermal dehydration treatment using an oven at 200°C followed by sieving through a 1x1 mm mesh. Subsequently, the ability of these recovered coagulants to remove color and turbidity in raw urban sewage and raw water was evaluated. The main results recorded indicated that the acidification recovery methodology showed the highest aluminum values at pH 1.5 up to 810.5 mg Al/L, being pH the variable that influenced the process the most. On the other hand, when comparing the coagulants recovered by the two treatments, it was evident that the coagulants obtained by the acid method achieved greater color and turbidity removal with values of up to 95.84% and 97.06% in sewage and 69.78% and 69.73 in raw water.

**Keywords:** water treatment plant sludge; coagulant recovery; acidification; removal.

## LISTA DE FIGURAS

Figura 1 - Estimado de lodo de alumínio produzido em alguns países por ano. ....	26
Figura 2- Destinação do lodo de ETA municípios brasileiros em percentual. ....	27
Figura 3 – Filtro prensa .....	28
Figura 4 – Filtro banda .....	29
Figura 5 – Centrifuga.....	30
Figura 6 - Descrição do sistema de tratamento.....	46
Figura 7 - ETA Centenário. ....	47
Figura 8 - A) Decantador convencional B) Decantador de alta taxa.....	48
Figura 9 - Amostragem de lodo da ETA. ....	49
Figura 10 - Câmara de inspeção onde convergem as duas drenagens dos decantadores.....	50
Figura 11 - Pó coagulante recuperado por tratamento térmico. ....	52
Figura 12 - <i>Jar Test</i> . ....	53
Figura 13 - Ponto de lançamento Juan XXIII.....	54
Figura 14 - Medição de parâmetros in situ. ....	57
Figura 15 - Amostragem de esgoto. ....	60
Figura 16 - Coagulante recuperado por tratamento térmico.....	62
Figura 17 - Resultados de remoção média de cor no esgoto com coagulante recuperado por tratamento térmico. ....	63
Figura 18 - Resultados de remoção média de turbidez no esgoto com coagulante recuperado por tratamento térmico. ....	63
Figura 19 - Coagulante recuperado por método ácido. ....	67
Figura 20 – Box plot para recuperação de coagulante em função de pH.....	69
Figura 21 – Box plot para recuperação de coagulante em função da velocidade de mistura.....	70
Figura 22 - Avaliação de remoção de cor com coagulante recuperado por método ácido no esgoto. ....	71

Figura 23 - Avaliação de remoção de turbidez com coagulante recuperado por método ácido no esgoto. ....	73
Figura 24 - Avaliação de remoção de cor com coagulante recuperado por método ácido na água bruta.....	74
Figura 25 - Comparação dos resultados de remoção de cor dos tratamentos e PAC utilizado pela ETA Centenário. ....	76
Figura 26 - Avaliação de remoção de turbidez com coagulante recuperado por método ácido em água bruta.....	77
Figura 27 - Comparação dos resultados de remoção de turbidez dos tratamentos e PAC utilizado na ETA Centenário. ....	79

## LISTA DE TABELAS

Tabela - 1. Coagulantes primários usualmente empregados no processo de coagulação.....	22
Tabela 2 - Resultados da recuperação de coagulante pelo método ácido e mistura mecânica.....	34
Tabela 3 - Resumo dos estudos sobre recuperação e reaproveitamento de coagulantes e sua eficiência na remoção de parâmetros de qualidade da água. ....	35
Tabela 4 - Resumo de usos alternativos de lodos de alumínio. ....	42
Tabela 4 - Resumo de usos alternativos de lodos de alumínio (Continuação).....	43
Tabela 5 - Parâmetros físico-químicos avaliados no LETA.....	51
Tabela 6 - Parâmetros físico-químicos avaliados em esgoto e água bruta. ....	55
Tabela 7 - combinação de tratamentos estabelecida para o delineamento experimental.....	56
Tabela 8 - Resultados de medição de parâmetros in situ no lodo da ETA Centenário.....	57
Tabela 9 - Valores de parâmetros físico-químicos avaliados no lodo da ETA Centenário (Ver anexo 8.1). ....	58
Tabela 10 – Valores de parâmetros físico-químicos avaliados no esgoto.....	60
(Ver anexo 8.2).....	60
Tabela 11 - Valores de parâmetros físico-químicos avaliados na água bruta .....	61
(Ver Anexo 8.2). ....	61
Tabela 12 - Resultados de remoção de cor na água bruta com coagulante recuperado por tratamento térmico. ....	64
Tabela 13 - Resultados de remoção de turbidez na água bruta com coagulante recuperado por tratamento térmico. ....	65
Tabela 14. Quantidade de ácido usado.....	66
Tabela 15 - Recuperação de alumínio (mg Al/L) por método ácido de recuperação (Ver anexo 8.3).....	67
Tabela 16 – Análise de Kruskal-Wallis para recuperação de alumínio.....	68

Tabela 17 – Análise de ANOVA para recuperação de alumínio.....	70
Tabela 18 – Análise de Kruskal-Wallis para remoção de cor no esgoto .....	72
Tabela 19 – Análise de Kruskal-Wallis para remoção de turbidez no esgoto.....	73
Tabela 20 – Análise de Kruskal-Wallis para remoção de cor na água bruta .....	75
Tabela 21 – Análise de Kruskal-Wallis para remoção de turbidez na água bruta .....	77

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

Al	Alumínio
ANOVA	Análise de Variância
CW	Constructed Wetlands
DQO	Demanda Química de Oxigênio
DIC	Delineamento Inteiramente Casualizado
DBO <sub>5</sub>	Demanda Bioquímica de Oxigênio
EAA	Espectroscopia de Absorção Atômica
E.S.P	Empresa de Serviços Públicos
ETA	Estação de Tratamento de Água
ETE	Estacao de Tratamento de Esgoto
H <sub>2</sub> S	Ácido Sulfídrico
H <sub>2</sub> SO <sub>4</sub>	Ácido Sulfúrico
IBGE	Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística
LETA	Lodo de Estação de Tratamento de água
NO <sub>3</sub>	Nitrato
OMS	Organização Mundial da Saúde
PAC	Policloreto de Alumínio
PAm	Poliacrilamida
PO <sub>4</sub>	Fosfato
PT	Fosforo total
SA	Sociedade Anônima
SM	Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater
SST	Sólidos Suspensos Totais
UASB	Upflow Anaerobic Sludge Blanket
USEPA	United States Environmental Protection Agency
MEC	Ministério da Educação
OMS	Organização Mundial da Saúde
ZHC	Zonas Húmidas Construídas

## LISTA DE SÍMBOLOS

mL	Mililitros
mg/L	Miligramas por litro
L	Litro
NPM	Número Mais Provável
NTU	Unidade Nefelométrica de Turbidez
ppm	Partes por milhão
UPCo	Unidades de Platino Cobalto
$\mu\text{S/cm}$	MicroSiemens por centímetro
$\mu\text{m}$	Micrômetro
$^{\circ}\text{C}$	Grau Celsius
p-valor	Valor de probabilidade

## SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	19
2	OBJETIVOS.....	21
<b>2.1</b>	<b>OBJETIVO GERAL .....</b>	<b>21</b>
<b>2.2</b>	<b>OBJETIVOS ESPECIFICOS .....</b>	<b>21</b>
3	REVISÃO DA LITERATURA.....	22
<b>3.1</b>	<b>COAGULAÇÃO E FLOCULAÇÃO .....</b>	<b>22</b>
3.1.1	Tipos de coagulação.....	23
3.1.2	Fatores intervenientes na coagulação .....	24
3.1.3	Tipos de floculação .....	24
3.1.4	Fatores intervenientes na floculação .....	25
3.1.5	Determinação da dose ideal de coagulante.....	25
<b>3.2</b>	<b>LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA (LETA) .....</b>	<b>26</b>
<b>3.3</b>	<b>OPÇÕES DE DESAGUAMENTO DE LETA .....</b>	<b>28</b>
3.3.1	Filtro prensa.....	28
3.3.2	Filtro de banda.....	29
3.3.3	Centrífugas .....	29
<b>3.4</b>	<b>DISPOSIÇÃO DE LETA NA COLÔMBIA .....</b>	<b>30</b>
<b>3.5</b>	<b>LEGISLAÇÃO NA COLÔMBIA PARA A GESTÃO DE LODOS DE ETA .....</b>	<b>30</b>
<b>3.6</b>	<b>ECONOMIA CIRCULAR E LETA.....</b>	<b>32</b>
<b>3.7</b>	<b>RECUPERAÇÃO DE ALUMÍNIO EM LETA .....</b>	<b>33</b>
<b>3.8</b>	<b>OUTRAS ALTERNATIVAS DE APROVEITAMENTO DE LODOS DE ETA..</b>	<b>36</b>
<b>3.9</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA.....</b>	<b>43</b>
4	MATERIAIS E MÉTODOS.....	45
<b>4.1</b>	<b>ÁREA DE ESTUDO.....</b>	<b>45</b>
<b>4.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DE LODO DE ETA.....</b>	<b>48</b>
4.2.1	Amostragem de lodo.....	48

4.2.2	Caracterização físico-química.....	50
<b>4.3</b>	<b>MÉTODO DE RECUPERAÇÃO .....</b>	<b>51</b>
4.3.1	Método de recuperação por tratamento térmico .....	51
4.3.2	Método ácido de recuperação .....	52
4.3.3	Quantificação de alumínio recuperado .....	52
<b>4.4</b>	<b>REUTILIZAÇÃO DO COAGULANTE RECUPERADO .....</b>	<b>53</b>
4.4.1	Amostragem de esgoto e água bruta.....	54
4.4.2	Caracterização do esgoto e da água bruta.....	54
4.4.3	Avaliação de remoção de turbidez e cor.....	55
<b>4.5</b>	<b>DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E ANALISES ESTATÍSTICAS .....</b>	<b>55</b>
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>57</b>
<b>5.1</b>	<b>MEDIÇÃO DE PARÂMETROS IN SITU.....</b>	<b>57</b>
<b>5.2</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO LODO DA ETA .....</b>	<b>58</b>
5.2.1	Caracterização físico-química.....	58
<b>5.3</b>	<b>CARACTERIZAÇÃO DO ESGOTO E DA ÁGUA BRUTA.....</b>	<b>59</b>
5.3.1	Caracterização do esgoto.....	59
5.3.2	Caracterização da água bruta.....	61
<b>5.4</b>	<b>RECUPERAÇÃO PELO MÉTODO TÉRMICO .....</b>	<b>61</b>
<b>5.5</b>	<b>EFICIÊNCIA DO COAGULANTE RECUPERADO POR TRATAMENTO TÉRMICO .....</b>	<b>62</b>
5.5.1	Remoção de turbidez e cor em esgoto .....	62
<b>5.5.2</b>	<b>Remoção de turbidez e cor em água bruta.....</b>	<b>64</b>
<b>5.6</b>	<b>ACIDIFICAÇÃO.....</b>	<b>66</b>
<b>5.7</b>	<b>RECUPERAÇÃO MÉTODO ÁCIDO.....</b>	<b>66</b>
<b>5.8</b>	<b>ANÁLISE ESTATÍSTICA DA RECUPERAÇÃO DE COAGULANTE .....</b>	<b>68</b>
5.8.1	Fator pH.....	68
5.8.2	Fator velocidade de mistura.....	69

<b>5.9</b>	<b>EFICIÊNCIA DO COAGULANTE RECUPERADO POR MÉTODO ACIDO...</b>	<b>71</b>
5.9.1	Remoção de cor no esgoto.....	71
5.9.2	Remoção de turbidez no esgoto.....	72
5.9.3	Remoção de cor na água bruta.....	74
5.9.4	Comparação dos resultados de remoção de cor PELOS TRATAMENTOS AVALIADOS E O PAC DA ETA.....	75
5.9.5	Remoção de turbidez na água bruta.....	76
5.9.6	Comparação dos resultados de remoção de turbidez PELOS TRATAMENTOS AVALIADOS E O PAC DA ETA.....	78
6	CONCLUSÃO.....	80
<b>6.1</b>	<b>RECOMENDAÇÕES.....</b>	<b>80</b>
7	REFERÊNCIAS.....	81
8	ANEXOS.....	94
<b>8.1</b>	<b>RESULTADOS DO LABORATÓRIO DA ÁGUA EMPOPASTO.....</b>	<b>94</b>
<b>8.3</b>	<b>RESULTADOS DE MEDIÇÕES IN SITU.....</b>	<b>95</b>
<b>8.3</b>	<b>RESULTADOS ESPECTROSCOPIA DE ABSORÇÃO ATÔMICA (EAA), LABORATÓRIO ESPECIALIZADO DA UNIVERSIDADE DE NARIÑO.....</b>	<b>96</b>
<b>8.4</b>	<b>RESULTADOS DAS ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....</b>	<b>105</b>
8.4.1	Método de recuperação Ácido.....	105
8.4.2	Remoção de cor no esgoto.....	107
8.4.3	Remoção de turbidez no esgoto.....	108
8.4.4	Remoção de cor na água bruta.....	109
8.4.5	Remoção de turbidez em água bruta.....	110
8.4.6	Dados do sistema diário de controle de qualidade da EMPOPASTO.....	111

## 1 INTRODUÇÃO

O aumento da população mundial, a expansão das áreas urbanas e o desenvolvimento industrial geram uma demanda crescente de água em todo o mundo, o que leva a necessidade de sistemas eficientes para processos de purificação e posterior tratamento de esgoto (Zhao *et al.* 2018). Para aumentar a eficiência das estações de tratamento de água (ETA), geralmente é necessária a adição de produtos químicos, principalmente coagulantes, os quais auxiliam na remoção de sólidos suspensos e coloides da água; no entanto, esse processo gera subprodutos inevitáveis na forma de Lodos de Estação de Tratamento de água (LETA), que geram problemas para seu gerenciamento e descarte adequados. Somente no Canadá são geradas aproximadamente 6.660.000 toneladas por ano (Zhao *et al.* 2021 e Jin *et al.* 2018).

O descarte desse lodo também gera um grande custo econômico para os processos de produção de água tratada. Por exemplo na Holanda os custos aproximados são de \$ 37 – 50 milhões de dólares por ano e na Austrália \$ 6,2 milhões de dólares por ano (Ackah *et al.* 2018 e Kumar *et al.* 2020). Por esse motivo, é necessária a implementação de processos que proponham usos alternativos desses resíduos e sua posterior eliminação.

Pesquisadores de todo o mundo têm avaliado diferentes alternativas para o reaproveitamento de lodos de tratamento da água, principalmente os derivados do uso de coagulantes à base de alumínio (sulfato de alumínio e Policloreto de Alumínio (PAC)). Ruziqna *et al.* (2020), avaliaram a recuperação de alumínio por metodologias de acidificação e seu possível reuso para tratamento da água superficial, obtendo resultados positivos. Uma outra alternativa é o uso do coagulante recuperado como pré-tratamento em estações de tratamento de esgoto com processos de ultrafiltração. Os resultados mostram uma estratégia de reaproveitamento viável, o coagulante recuperado eliminou matéria orgânica, registrando valores de remoção de DQO de até 90%, além de reduzir a colmatação da membrana em até 34% (Mazari *et al.* 2018).

Também têm sido investigados para o tratamento das águas residuais da indústria têxtil na eliminação de corantes utilizados nesta indústria (Shiva *et al.* 2019), como substrato no desenvolvimento de sistemas de tratamento conhecidos como terras úmidas ou alagados ou ainda em inglês: Constructed Wetlands (CW) (Yang *et al.* 2021). Além disso, foi avaliado o potencial do uso do lodo como absorvente de baixo

custo para a imobilização de contaminantes, principalmente o fósforo (Odimegwu et al. 2018) e como co-condicionador do processo de desidratação do lodo das estações de tratamento de esgoto (ETE), obtendo resultados positivos na desidratação e reduzindo significativamente o uso de polímeros, gerando uma diminuição no custo do tratamento do lodo da ETE (Ren et. al. 2020). As alternativas supracitadas mostram um panorama favorável para a implementação de estratégias que permitam realizar um reaproveitamento sustentável do lodo da ETA Centenário.

A empresa de obras sanitárias EMPOPASTO S.A ESP, responsável pelo fornecimento de água potável à cidade de Pasto, Nariño (Colômbia), gera um volume significativo de lodo residual (entre 1.000 e 5.000 kg/dia), essa variação está relacionada às épocas de alta e baixa pluviosidade que ocorrem na área. Nas épocas de alta pluviosidade, gera-se um aumento na turbidez da água bruta que implica maiores doses de coagulante e, portanto, maior quantidade de lodo. O subproduto derivado principalmente da coagulação e demais processos, floculação e sedimentação, nas quais é utilizado o coagulante PAC, para remover impurezas incluindo partículas coloidais e substâncias orgânicas dissolvidas. Este resíduo é despejado sem nenhum tipo de tratamento prévio no rio Pasto, afetando negativamente o meio ambiente (García *et al.* 2014; Tabares, 2020). O que foi descrito anteriormente representa um problema social, econômico e ambiental para a região, o que requer a articulação da investigação, empresas públicas e entidades governamentais para a geração e implementação de estratégias que contribuam para uma solução integrada do problema.

## 6 CONCLUSÃO

Das variáveis analisadas no método ácido de recuperação, o pH foi a que mais influenciou no processo, obtendo a maior recuperação em pH 1,5, com valores de até 810,5 mg Al/L. A variável velocidade de mistura e seus diferentes níveis não afetou a recuperação do alumínio.

O coagulante recuperado pelo método ácido apresentou maiores eficiências na remoção de cor e turbidez nas duas matrizes avaliadas, comparado com o coagulante recuperado pelo método térmico. As maiores eficiências de remoção foram registradas no esgoto com valores máximos de 95,84% para cor e 97,06% para turbidez com doses de 15 mL.

Os dois tratamentos propostos nesta pesquisa apresentam resultados promissores para o reaproveitamento de LETA, como tratamento primário avançado em estações de tratamento de esgoto de forma que esta alternativa poderia reduzir significativamente os custos operacionais e aquisição de coagulantes puros.

### 6.1 RECOMENDAÇÕES

Aumentar o número de experimentos com diferentes doses dos coagulantes recuperados para encontrar o ponto ideal de remoção do contaminantes.

Realizar uma caracterização ampla do LETA, no estado sólido e líquido que permita compreender mais claramente as variáveis que influenciam na recuperação dos coagulantes pelos diferentes tratamentos.

Caracterizar a água tratada com coagulantes recuperados em termos da geração de subprodutos ligados a este tipo de coagulantes para avaliar qualquer risco biológico ou químico.

Pesquisar a utilização de outros tipos de ácidos em pesquisas futuras como ácido nítrico e ácido clorídrico para avaliar seu desempenho na recuperação do alumínio presente no LETA.

## REFERÊNCIAS

- AAMIR, M.; MAHMOOD, Z.; NISAR, A.; FARID, A.; KHAN, T. A.; ABBAS, M.; WASEEM, M. Performance evaluation of sustainable soil stabilization process using waste materials. **Processes**, Basileia, v. 7, n. 6, p. 378, 2019. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr7060378>.
- ACKAH, L. A.; GURU, R.; PEIRAVI, M.; MOHANTY, M.; MA, X.; KUMAR, S.; LIU, J. Characterization of Southern Illinois water treatment residues for sustainable applications. **Sustainability**, Basel, v. 10, n. 5, p. 1374, 2018. DOI: <https://doi.org/10.3390/su10051374>.
- ADEEL, M.; SONG, X.; WANG, Y.; FRANCIS, D.; YANG, Y. Environmental impact of estrogens on human, animal and plant life: A critical review. **Environment international**, Oxford, v. 99, p. 107-119, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envint.2016.12.010>.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Characterization of water treatment plant's sludge and its safe disposal options. **Procedia Environmental Sciences**, Amsterdam, v. 35, p. 950-955, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.proenv.2016.07.088>.
- AHMAD, T.; AHMAD, K.; ALAM, M. Simultaneous modelling of coagulant recovery and reuse by response surface methodology. **Journal of Environmental Management**, Amsterdam, v. 285, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.112139>.
- American Public Health Association - APHA. **Standard methods for the examination of water and wastewater**. 23. ed. Washington, D.C.: American Public Health Association, 2017.
- ARANTES, C. C.; RIBEIRO, T. A.; PATERNIANI, J. E. Processamento de sementes de Moringa oleifera utilizando-se diferentes equipamentos para obtenção de solução coagulante. **Revista brasileira de engenharia agrícola e ambiental**, Campina Grande, v. 16, p. 661-666, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1415-43662012000600011>.
- AYOUB, M.; ABDELFATTAH, A. A parametric study of alum recovery from water treatment sludge. **Water Science and Technology**, London, v. 74, n. 2, p. 516-523, 2016. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2016.241>.
- BABATUNDE, A. O.; ZHAO, Y. Q. Constructive approaches toward water treatment works sludge management: an international review of beneficial reuses. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, New York, v. 37, n. 2, p. 129-164, 2007. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643380600776239>.
- BAMDAD, H.; HAWBOLDT, K.; MACQUARRIE, S. A review on common adsorbents for acid gases removal: Focus on biochar. **Renewable and Sustainable Energy**

**Reviews**, Oxford, v. 81, p. 1705-1720, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2017.05.261>.

BARAKWAN, R. A.; TRIHADININGRUM, Y.; BAGASTYO, A. Y. Characterization of alum sludge from surabaya water treatment plant, Indonesia. **Journal of Ecological Engineering**, Lublin, v. 20, n. 5, 2019. DOI: <https://doi.org/10.12911/22998993/104619>.

BASHAR, N. A. M.; ZUBIR, Z. H.; AYOB, A.; ALIAS, S. Water treatment sludge as an alternative liner for landfill site: FTIR and XRD analysis. **AIP Conference Proceedings**, Melville, v. 1774, n. 1, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1063/1.4965082>.

BRUNNER, I.; SPERISEN, C. Aluminum exclusion and aluminum tolerance in woody plants. **Frontiers in Plant Science**, Lausanne, v. 4, 2013. DOI: <https://doi.org/10.3389/fpls.2013.00172>.

CAMPBELL, A.; HAMAI, D.; BONDY, S. C. Differential toxicity of aluminum salts in human cell lines of neural origin: implications for neurodegeneration. **Neurotoxicology**, Amsterdam, v. 22, n. 1, p. 63-71, 2001. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0161-813X\(00\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0161-813X(00)00007-3).

CASTALDI, P.; MELE, E.; SILVETTI, M.; GARAU, G.; DEIANA, S. Water treatment residues as accumulators of oxoanions in soil. Sorption of arsenate and phosphate anions from an aqueous solution. **Journal of hazardous materials**, Amsterdam, v. 264, p. 144-152, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2013.10.037>.

CASTRO, R.; CASTRO, M.; VIDAL, J.; PERAZA, F.; OSUNA, A. Metodología Superficie de Respuesta: Tres aplicaciones a conjuntos de datos reales. **Memorias del Congreso Internacional de Investigación Academia Journals Tepic**. Tepic, v. 11, n. 1, p. 282-290, 2019. Disponível em: <https://www.academiajournals.com/pub-tepic-2019>. Acesso em: 20 out. 2023.

CHAKRABORTY, T.; BALUSANI, D.; SMITH, S.; SANTORO, D.; WALTON, J.; NAKHLA, G.; RAY, M. B. Reusability of recovered iron coagulant from primary municipal sludge and its impact on chemically enhanced primary treatment. **Separation and Purification Technology**, Oxford, v. 231, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2019.115894>.

CHEN, Y. J.; WANG, W. M.; WEI, M. J.; CHEN, J. L.; HE, J. L.; CHIANG, K. Y.; WU, C. C. Effects of Al-coagulant sludge characteristics on the efficiency of coagulants recovery by acidification. **Environmental technology**, Oxfordshire, v. 33, n. 22, p. 2525-2530, 2012. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.679696>.

CHEN, S.; CHEN, Y.; PEI, H.; HOU, Q. Biofilm development dynamics and pollutant removal performance of ceramsite made from drinking-water treatment sludge. **Water Environment Research**, Hoboken, v. 91, n. 7, p. 616-627, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1002/wer.1089>.

COLOMBIA. Ministerio da Justicia. Decreto 1287 de 2014. Dispone por el cual se establecen criterios para el uso de los biosólidos generados en plantas de tratamiento de aguas residuales municipales. Diario Oficial: Bogotá, D.C., año cl. N. 49208. 10 julio de 2014. p. 18. Disponível em: <https://www.suin-juriscol.gov.co/viewDocument.asp?id=1259502>. Acesso em: 15 out. 2024.

COLOMBIA. Ministerio de Vivienda, Ciudad y Territorio. **Resolución 0330 – 2017, de 08 de junho de 2017**. Dispone por la cual se adopta el Reglamento Técnico para el Sector Agua Potable y Saneamiento Básico. Bogotá: Vivienda, 2017. Disponível em: <https://minvivienda.gov.co/normativa/resolucion-0330-2017-0>. Acesso em: 7 jul. 2023.

CORDEIRO, J. S. Problema dos lodos gerados nos decantadores em estações de tratamento de água. 1993. Tese (Doutorado em Engenharia Hidráulica e Sanitária) - Universidade de São Paulo, São Carlos, 1993. Disponível em: <https://repositorio.usp.br/item/000737943>. Acesso em: 20 dez. 2023.

DA ROSA KÜHNE, A.; CERON, L. P.; MACHEMER, P. C. Avaliação laboratorial para escolha de coagulante no tratamento de esgoto sanitário. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, São José dos Pinhais, v. 2, n. 3, p. 889-899, 2019. Disponível em: <https://ojs.brazilianjournals.com.br/ojs/index.php/BJAER/article/view/1894>. Acesso em: 18 nov. 2024.

DAHASAHASTRA, A. V.; BALASUNDARAM, K.; LATKAR, M. V. Turbidity removal from synthetic turbid water using coagulant recovered from water treatment sludge: A potential method to recycle and conserve aluminum. **Hydrometallurgy**, Amsterdam, v. 213, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105939>.

DAGNINO, J. Análisis de varianza. **Revista chilena de anestesia**, Santiago, v. 43, n. 4, p. 306-310, 2014. Disponível em: <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n04.07.pdf>. Acesso em: 14 fev. 2024.

DASSANAYAKE, K. B.; JAYASINGHE, G. Y.; SURAPANENI, A.; HETHERINGTON, C. A review on alum sludge reuse with special reference to agricultural applications and future challenges. **Waste Management**, Oxford, v. 38, p. 321-335, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2014.11.025>.

DENIZ, F.; KARAMAN, S. Removal of Basic Red 46 dye from aqueous solution by pine tree leaves. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 170, n. 1, p. 67-74, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2011.03.029>.

DI BERNARDO, L.; PAZ, L. P. S. Seleção de tecnologias de tratamento de água. São Carlos: LDIBE, 2008. Volume 1.

DÍAZ-MUÑOZ, D. A. **Aprovechamiento del sulfato de aluminio extraído a partir de los lodos generados en la planta de potabilización de agua Casigana de la EP-EMAPA-A, para la clarificación de agua**. 2017. Monografía (Titulación Ingeniero Bioquímico), Universidad Técnica de Ambato, Facultad de Ciencia e

Ingeniería en Alimentos, Ambato, 2017. Disponible em:  
<https://repositorio.uta.edu.ec/handle/123456789/26011>. Acesso em: 30 jan. 2024.

DUAN, J.; GREGORY, J. Coagulation by hydrolysing metal salts. **Advances in colloid and interface science**, Amsterdam, v. 100, p. 475-502, 2003. DOI:  
[https://doi.org/10.1016/S0001-8686\(02\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0001-8686(02)00067-2).

ESCOBAR, J. C. Gestión Integral de Manejo de Lodos de Plantas de Tratamiento de Agua Potable. *In: Curso de Operación de Plantas de Potabilización de Agua*. Bogotá: ACODAL, 2004.

ESPIGARES GARCÍA, M.; PEREZ LÓPEZ, J. A. **Aspectos sanitarios del estudio de las aguas**. Granada: Universidad de Granada, 1985.

EVUTI, A. M.; LAWAL, M. Recovery of coagulants from water works sludge: A review. **Advances in Applied Science Research**, London, v. 2, n. 6, p. 410-417, 2011.

FEBRINA, W.; MESRA, T. Optimum dosage of coagulant and flocculant on sea water purification process. *In: IOP Conference Series: Earth and Environmental Science*, Montreal, v. 469, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/469/1/012023>.

FOUAD, M. M.; RAZEK, T. M.; ELGENDY, A. S. Utilization of drinking water treatment slurry to produce aluminum sulfate coagulant. **Water Environment Research**, Hoboken, v. 89, n. 2, p. 186-191, 2016. DOI:  
<https://doi.org/10.2175/106143016X14504669769056>.

RAMÍREZ, J. A. G.; HURTADO, J. C. U. **Reutilización de lodos de planta de potabilización en el tratamiento de aguas residuales**. 2003. (Titulación Ingeniero Ambiental) Programa de Ingeniería Química, Universidad Nacional de Colombia, Manizales, 2003. Disponible em: <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/2842>. Acesso em: 15 fev. 2024.

GONÇALVES, F.; SOUZA, C. H. U.; TAHIRA, F. S.; FERNANDES, F.; TEIXEIRA, R. S. Incremento de lodo de ETA em barreiras impermeabilizantes de aterro sanitário. **Revista Dae**, São Paulo, v. 65, n. 205, p. 5-14, 2017. DOI:  
<https://doi.org/10.4322/dae.2016.018>.

GUTIÉRREZ, H.; DE LA VARA, R. **Análisis y diseño de experimentos**. México: McGraw-Hill Interamericana, 2008.

HAMZAH, N.; ROSHISHAM, M. A. F.; ZAKARIA, M. F.; BASRI, M. H. H.; AKBAR, N. A. Performance of recovered coagulant from water treatment sludge by acidification process. **Environment and Ecology Research**, San Jose, v. 10, n. 1, p. 21-30, 2022. DOI: 10.13189/eer.2022.100103.

HENRY, M.; BAUWENS, T.; HEKKERT, M.; KIRCHHERR, J. A typology of circular start-ups: An Analysis of 128 circular business models. **Journal of cleaner production**, Amsterdam, v. 245, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2019.118528>.

HIDALGO, A. M.; MURCIA, M. D.; GOMEZ, M.; GOMEZ, E.; GARCÍA-IZQUIERDO, C.; SOLANO, C. Possible uses for sludge from drinking water treatment plants. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 143, n. 3, 2017. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001176](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001176).

HURLBERT, S. H. Pseudoreplication and the design of ecological field experiments. **Ecological monographs**, Hoboken, v. 54, n. 2, p. 187-211, 1984. DOI: <https://doi.org/10.2307/1942661>.

IBGE - INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **PNSB: Pesquisa Nacional de Saneamento Básico 2008**. Rio de Janeiro: IBGE, 2010. Disponível em: <https://www.ibge.gov.br/estatisticas/multidominio/meio-ambiente/9073-pesquisa-nacional-de-saneamento-basico.html>. Acesso em: 13 fev. 2024.

IDEAM, INVEMAR. Protocolo de Monitoreo y Seguimiento del Agua. Bogotá, D. C.: Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, 2021. 631 p. Disponível em: <http://www.ideam.gov.co/web/agua/protocolos-procedimientos-y-metodologias>. Acesso em: 10 set. 2023.

JANGKORN, S.; KUHAKEW, S.; THEANTANOO, S.; KLINLA-OR, H.; SRIWIRIYARAT, T. Evaluation of reusing alum sludge for the coagulation of industrial wastewater containing mixed anionic surfactants. **Journal of environmental sciences**, Amsterdam, v. 23, n. 4, p. 587-594, 2011. DOI: [https://doi.org/10.1016/S1001-0742\(10\)60451-2](https://doi.org/10.1016/S1001-0742(10)60451-2).

JIN, C.; ARCHER, G.; PARKER, W. Current status of sludge processing and biosolids disposition in Ontario. **Resources, Conservation and Recycling**, Amsterdam, v. 137, p. 21-31, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.05.024>.

KATRIVESIS, F. K.; KARELA, A. D.; PAPADAKIS, V. G.; PARASKEVA, C. A. Revisiting of coagulation-flocculation processes in the production of potable water. **Journal of Water Process Engineering**, Amsterdam, v. 27, p. 193-204, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jwpe.2018.12.007>.

KEELEY, J.; SMITH, A. D.; JUDD, S. J.; JARVIS, P. Reuse of recovered coagulants in water treatment: an investigation on the effect coagulant purity has on treatment performance. **Separation and Purification Technology**, Oxford, v. 131, p. 69-78, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2014.04.033>.

KIMURA, M.; MATSUI, Y.; KONDO, K.; ISHIKAWA, T. B.; MATSUSHITA, T.; SHIRASAKI, N. Minimizing residual aluminum concentration in treated water by tailoring properties of polyaluminum coagulants. **Water research**, Oxford, v. 47, n. 6, p. 2075-2084, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2013.01.037>.

KLUCZKA, J.; ZOŁOTAJKIN, M.; CIBA, J.; STAROŃ, M. Assessment of aluminum bioavailability in alum sludge for agricultural utilization. **Environmental monitoring and assessment**, Dordrecht, v. 189, p. 1-8, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-017-6133-x>.

KUMAR, R.; KANG, C. U.; MOHAN, D.; KHAN, M. A.; LEE, J. H.; LEE, S. S.; JEON, B. H. Waste sludge derived adsorbents for arsenate removal from water. **Chemosphere**, Oxford, v. 239, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2019.124832>.

LEBOGANG, K.; NTULI, F.; LEKGOBA, T.; KANDJOU, V.; TSIE, M. Characterization and utilization of water treatment sludge for coagulation of raw water. **Water Science & Technology**, London, v. 87, n. 7, p. 1587-1599, 2023. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2023.090>.

LI, X.; CUI, J.; PEI, Y. Granulation of drinking water treatment residuals as applicable media for phosphorus removal. **Journal of environmental management**, Amsterdam, v. 213, p. 36-46, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2018.02.056>.

LI, C. W.; LIN, J. L.; KANG, S. F.; LIANG, C. L. Acidification and alkalization of textile chemical sludge: volume/solid reduction, dewaterability, and Al (III) recovery. **Separation and Purification Technology**, Oxford, v. 42, n. 1, p. 31-37, 2005. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2004.06.001>.

LIBÂNIO, M. **Fundamentos de qualidade e tratamento de água**. 3 ed. Campinas: Átomo, 2010.

LIX, L. M.; KESELMAN, J. C.; KESELMAN, H. J. Consequences of assumption violations revisited: A quantitative review of alternatives to the one-way analysis of variance F test. **Review of educational research**, Thousand Oaks, v. 66, n. 4, p. 579-619, 1996. DOI: <https://doi.org/10.3102/00346543066004579>.

LOPEZ, E.; GONZALEZ, B. **Diseño y Análisis de Experimentos: Fundamentos y Aplicaciones en Agronomía**. 2. ed. Guatemala: Universidad de San Carlos de Guatemala, 2016.

MANDEVILLE, P. B. Tema 28: Diseños experimentales. **UANL Ciencia**, Monterrey, v. 15, n. 57, p. 151-155, 2012.

MARASCHIN, M.; FERRARI, K. F. H.; CARISSIMI, E. Acidification and flocculation of sludge from a water treatment plant: New action mechanisms. **Separation and Purification Technology**, Oxford, v. 252, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2020.117417>.

MARTINS, D. S.; ESTEVAM, B. R.; PEREZ, I. D.; AMÉRICO-PINHEIRO, J. H. P.; ISIQUE, W. D.; BOINA, R. F. Sludge from a water treatment plant as an adsorbent of endocrine disruptors. **Journal of Environmental Chemical Engineering**. Amsterdam, v. 10, n. 4, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2022.108090>.

MAZARI, L.; ABDESSEMED, D.; SZYMCZYK, A. Evaluating reuse of alum sludge as coagulant for tertiary wastewater treatment. **Journal of Environmental Engineering**, Reston, v. 144, n. 12, 2018. DOI: [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)EE.1943-7870.0001462](https://doi.org/10.1061/(ASCE)EE.1943-7870.0001462).

MONTALVAN, E. L. **Investigação do comportamento geotécnico de misturas de solo arenoso com lodo da Estação de Tratamento de Água Cubatão**. 2016. Dissertação (Mestrado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, 2016. DOI: <https://doi.org/10.11606/D.3.2016.tde-02122016-091816>.

MORA LEÓN, A. G. **Evaluación del uso de lodo de un proceso de potabilización convencional, en el mejoramiento de la sedimentación primaria en aguas residuales municipales**. 2022. Dissertação (Maestría en Ingeniería Ambiental) - Facultad de ingeniería, Universidad de Antioquia, Medellín, 2022. Disponível em: [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/28895/1/MoraAna\\_2022\\_Evaluaci%c3%b3nLodoSedimentaci%c3%b3n.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/28895/1/MoraAna_2022_Evaluaci%c3%b3nLodoSedimentaci%c3%b3n.pdf). Acesso em: 27 dez. 2023.

MORENO FRANCO, Y. C. **Alternativa de manejo de lodos de clarificación de agua potable mediante la técnica de deshidratación en filtro banda en una industria cervecera**. 2005. Trabajo de Finalización del Curso (Licenciatura en Ingeniería Ambiental y Sanitaria) - Universidad la Salle, Ingeniería Ambiental y Sanitaria, Bogotá, 2005. Disponível em: [https://ciencia.lasalle.edu.co/ing\\_ambiental\\_sanitaria/1780](https://ciencia.lasalle.edu.co/ing_ambiental_sanitaria/1780). Acesso em: 27 dez. 2023.

NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. Coagulant recovery from water treatment plant sludge and reuse in post-treatment of UASB reactor effluent treating municipal wastewater. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 21, p. 10407-10418, 2014. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-014-2900-1>.

NAIR, A. T.; AHAMMED, M. M. Influence of sludge characteristics on coagulant recovery from water treatment sludge: a preliminary study. **Journal of Material Cycles and Waste Management**, Tokyo, v. 19, p. 1228-1234, 2017. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10163-016-0513-0>.

NORMA TÉCNICA COLOMBIANA. **NTC –ISO 5667-1**: Gestión ambiental: Calidad del agua: Muestreo: Directrices para el diseño de programas de muestreo. Santa Fé de Bogotá: Instituto Colombiano de normas técnicas y certificación (INCONTEC), 1995.

ODIMEGWU, T. C.; ZAKARIA, I.; ABOOD, M. M.; NKETSIAH, C. B. K.; AHMAD, M. Review on different beneficial ways of applying alum sludge in a sustainable disposal manner. **Civil Engineering Journal**, Tehran, v. 4, n. 9, p. 2230-2241, 2018. DOI: <http://dx.doi.org/10.28991/cej-03091153>.

OWEN, P. G. Water-Treatment Works' Sludge Management. **Water and Environment Journal**, West Sussex, v. 16, n. 4, p. 282-285, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1111/j.1747-6593.2002.tb00417.x>.

ESPAÑA. Parlamento Europeo. **Economía circular: definición, importancia y beneficios**. Madrid: Parlamento Europeo, 2023. Disponível em: <https://www.europarl.europa.eu/topics/es/article/20151201STO05603/economia-circular-definicion-importancia-y-beneficios>. Acesso em: 15 out. 2024.

PERSSON, A. The Coriolis Effect: Four centuries of conflict between common sense and mathematics, Part I: A history to 1885. **History of Meteorology**, Ontario, v. 2, p. 1-24, 2005. Disponível em: <https://www.journal.meteohistory.org/index.php/hom/article/view/30>. Acesso em: 7 jan. 2023.

PRAKASH, P.; SENGUPTA, A. K. Selective coagulant recovery from water treatment plant residuals using Donnan membrane process. **Environmental science & technology**, Washington, DC, v. 37, n. 19, p. 4468-4474, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1021/es030371q>.

RAMADAN, H.; AFIFY, H.; ABDELAZIZ, A. E. Post treatment of wastewater using recovered alum from water treatment sludge. **Algae**, Daejeon, p. 203-217, 2017. Disponível em: <https://www.researchgate.net/profile/Hassan-Ramadan-5/amp>. Acesso em: 12 out. 2023

RAMADAN, H.; EL SAYED, A. E. Optimization of alum recovery from water treatment sludge-case study: Samannoud water treatment plant, Egypt. **Water and Environment Journal**, West Sussex, v. 34, n. 3, p. 464-473, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12481>.

QUIMPAC S.A. DE COLOMBIA. **Hoja de seguridad Policloruro de Aluminio (PAC) Hidroxicloruro de Aluminio (ACH)**. Palmira: Quimpac, 2012. Disponível em: <https://www.quimpac.com.co/pdfs/SHa-001-1.pdf>. Acesso em: 1 jun. 2024.

RAMADAN, H.; EL SAYED, A. E. A. Optimization of alum recovery from water treatment sludge-case study: Samannoud water treatment plant, Egypt. **Water and Environment Journal**, West Sussex, v. 34, n. 3, p. 464-473, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1111/wej.12481>.

REBOSURA JR, M.; SALEHIN, S.; PIKAAR, I.; KULANDAIVELU, J.; JIANG, G.; KELLER, J.; YUAN, Z. Effects of in-sewer dosing of iron-rich drinking water sludge on wastewater collection and treatment systems. **Water research**, Oxford, v. 171, p. 115396. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.watres.2019.115396>.

REN, B.; LYCZKO, N.; ZHAO, Y.; NZIHO, A. Integrating alum sludge with waste-activated sludge in co-conditioning and dewatering: a case study of a city in south France. **Environmental Science and Pollution Research**, Heidelberg, v. 27, p. 14863-14871, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11356-020-08056-0>.

RIBEIRO, F. L. D. M. **Quantificação e caracterização química dos resíduos da ETA de Itabirito-MG**. 2007. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Programa de Pós-graduação em Recursos Hídricos, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007. Disponível em: <http://www.repositorio.ufop.br/handle/123456789/2862>. Acesso em: 7 jan. 2023.

RIZO-GÓMEZ, A. **Instalación y puesta en marcha de filtro prensa para el tratamiento de lodos en la Empresa Quebrador Ochomogo LTDA.** 2015. Trabajo de Finalización del Curso (Licenciatura en Mantenimiento Industrial) - Instituto Tecnológico de Costa Rica, Escuela de Ingeniería Electromecánica, Cartago, 2015. Disponible em: <https://repositoriotec.tec.ac.cr/handle/2238/6121>. Acceso em: 7 jan. 2023.

ROMERO-ROJAS, J. A. Potabilización del agua. Bogotá: Alfaomega. 1999.

ROMERO-ROJAS, J. A. Purificación del Agua. Bogotá: Escuela Colombiana de Ingeniería. 2002.

RUZIQNA, D. P.; SUWARTHA, N.; MOERSIDIK, S. S.; ADITYOSULINDRO, S. Aluminium Recovery from Water Treatment Sludge as Coagulant by Acidification. **IOP Conference Series: Earth and Environmental Science**, Bristol, v. 448, n. 1, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1088/1755-1315/448/1/012045>.

SCALIZE, P. S.; SOUZA, L. M.; ALBUQUERQUE, A. Reuse of alum sludge for reducing flocculant addition in water treatment plants. **Environment Protection Engineering**, Wroclaw, v. 45, n. 1, p. 57-70, 2019. DOI: <https://doi.org/10.5277/epe190105>.

SHAKYA, A. K.; BHANDE, R.; GHOSH, P. K. A practical approach on reuse of drinking water treatment plant residuals for fluoride removal. **Environmental Technology**, Oxfordshire, v. 41, n. 22, p. 2907-2919, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2019.1588383>.

SHANMUGAM, S. Granulation techniques and technologies: recent progresses. **BiolImpacts**, Tabriz, v. 5, n. 1, p. 55, 2015. DOI: <https://doi.org/10.15171/bi.2015.04>.

SHEN, C.; ZHAO, Y.; LI, W.; YANG, Y.; LIU, R.; MORGEN, D. Global profile of heavy metals and semimetals adsorption using drinking water treatment residual. **Chemical Engineering Journal**, v. 372, p. 1019-1027, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2019.04.219>.

SHAWAL, N. B. M.; RAZALI, N. A.; HAIROM, N. H. H.; YATIM, N. I. I.; RASIT, N.; HARUN, M. H. C.; HAMZAH, S. Parametric study of coagulant recovery from water treatment sludge towards water circular economy. **Water Science & Technology**, London, v. 88, n. 12, p. 3142-3150, 2023. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2023.398>. SHIVA SHANKAR, Y.; ANKUR, K.; BHUSHAN, P.; MOHAN, D. Utilization of water treatment plant (WTP) sludge for pretreatment of dye wastewater using coagulation/flocculation. *In: Advances in Waste Management: Select Proceedings of Recycle 2016*. Singapore: Springer Singapore, 2019. p. 107-121. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-981-13-0215-2\\_8](https://doi.org/10.1007/978-981-13-0215-2_8).

SKOOG, D. A., HOLLER, F. J., NIEMAN, T. A. **Principios de análisis instrumental**. 5. ed. Madrid: McGraw-Hill, 2001. p. 614-633.

SNOEYINK, V. L.; SCHOCK, M. R.; SARIN, P.; WANG, L.; CHEN, A. S. C.; HARMON, S. M. (2003). Aluminium-containing scales in water distribution systems: Prevalence and composition. **Journal of Water Supply Research and Technology - Aqua**, London, v. 52, n. 7, 2003. Disponível em: <https://iwaponline.com/aqua/article/52/7/455/30677/Aluminium-containing-scales-in-water-distribution>. Acesso em: 14 ago. 2023.

SUTHERLAND, W. J. **Ecological census techniques: a handbook**. 2. ed. London: Cambridge University Press, 2006.

COLOMBIA. Superintendencia de Servicios Públicos Domiciliarios. **Informe sectorial de los servicios públicos domiciliarios de acueducto y alcantarillado**. Bogotá: Superservicios, 2020. Disponível em: [https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inlinefiles/informe\\_sectorial\\_aa\\_30-12-21\\_vf%20%281%29.pdf](https://www.superservicios.gov.co/sites/default/files/inlinefiles/informe_sectorial_aa_30-12-21_vf%20%281%29.pdf). Acesso em: 15 oct. 2024

TABARES, C. A. **Estudio para determinar la frecuencia de descarga de lodos de los sedimentadores de la planta de tratamiento de agua potable de Centenario de Empopasto SA ESP, en la ciudad de San Juan de Pasto, Colombia**. 2020. Tesis de maestría. Universidad Europea del Atlántico, 2020.

TITSHALL, L. W.; HUGHES, J. C. Characterisation of some South African water treatment residues and implications for land application. **Water Sa**, Pretoria, v. 31, n. 3, p. 299-308, 2005. DOI: <https://doi.org/10.4314/wsa.v31i3.5219>.

THEODORSSON-NORHEIM, E. Kruskal-Wallis test: BASIC computer program to perform nonparametric one-way analysis of variance and multiple comparisons on ranks of several independent samples. **Computer methods and programs in biomedicine**, Shannon, v. 23, n. 1, p. 57-62, 1986. DOI: [https://doi.org/10.1016/0169-2607\(86\)90081-7](https://doi.org/10.1016/0169-2607(86)90081-7).

TOBIASON, J. E.; EDZWALD, J. K.; LEVESQUE, B. R.; KAMINSKI, G. K.; DUNN, H. J.; GALANT, P. B. Full-Scale Assessment of waste filter backwash recycle. **Journal-American Water Works Association**, Oxford, v. 95, n. 7, p. 80-93, 2003. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1551-8833.2003.tb10410.x>.

TONY, M. A.; ZHAO, Y. Q.; FU, J. F.; TAYEB, A. M. Conditioning of aluminium-based water treatment sludge with Fenton's reagent: effectiveness and optimising study to improve dewaterability. **Chemosphere**, Oxford, v. 72, n. 4, p. 673-677, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2008.03.032>.

TONY, M. A. Central composite design optimization of Bismarck Dye oxidation from textile effluent with Fenton's reagent. **Applied Water Science**, Heidelberg, v. 10, n. 5, p. 1-9, 2020. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-020-01192-5>.

TONY, M. A. Valorization of undervalued aluminum-based waterworks sludge waste for the science of "The 5 Rs' criteria". **Applied Water Science**, Heidelberg, v. 12, n. 2, p. 20, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1007/s13201-021-01554-7>.

TSUTIYA, M. T.; HIRATA, A. Y. Aproveitamento e disposição final de lodos de estações de tratamento de água do estado de São Paulo. *In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL DA ABES*, 21., 2001, João Pessoa. **Anais [...]**. Rio de Janeiro: ABES, 2001.

TURNER, T.; WHEELER, R.; STONE, A.; OLIVER, I. Potential alternative reuse pathways for water treatment residuals: Remaining barriers and questions - **A review**. *Water, Air, & Soil Pollution*, Dordrecht, v. 230, n. 9, p. 227, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s11270-019-4272-0>.

URBAN, R. C.; ISAAC, R. L.; MORITA, D. M. Beneficial use of sludge from water and sewage treatment plants: State of the art. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. **Revista DAE**, São Paulo, v. 67, n.219, p. 128-158. 2019. DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.050>.

USEPA - United States Environmental Protection Agency. **Method 1623.1: Cryptosporidium and Giardia in Water by Filtration/IMS/FA**. Washington, D.C.: EPA, 2012.

VALENCIA, J. A.; SOTO, A. R. **Teoría y práctica de la purificación del agua**. Bogotá: McGraw-Hill, 2000. p. 793.

VALENCIA, J. A. **Teoría de la coagulación del agua. Teoría y práctica de la Purificación del agua**. Bogotá: ed. Acodal. 1992. Disponível em: <https://cidta.usal.es/cursos/etap/modulos/libros/teoria.pdf>. Acesso em: 24 oct. 2024.

VARGAS, L. de (coord.). **Tratamiento de agua para consumo humano**. Lima: CEPIS/OPS, 2006. Disponível em: [http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1\\_tomo1\\_indice.pdf](http://www.ingenieriasanitaria.com.pe/pdf/manual1/tomo1/ma1_tomo1_indice.pdf). Acesso em: 18 nov. 2024.

VAZ, L. G. D. L.; KLEN, M. R. F.; VEIT, M. T.; SILVA, E. A. D.; BARBIERO, T. A.; BERGAMASCO, R. Avaliação da eficiência de diferentes agentes coagulantes na remoção de cor e turbidez em efluente de galvanoplastia. **Eclética Química**, Araraquara, v. 35, p. 45-54, 2010. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-46702010000400006>.

VILLEGAS, J. D.; CASTAÑO, J. M.; CUERVO, D. P. Recuperación de sulfato de aluminio a partir de lodos generados en Plantas de potabilización de agua. **Scientia et technica**, Pereira, v. 2, n. 28, 2005. Disponível em: <https://moodle2.utp.edu.co/index.php/revistaciencia/article/view/6847>. Acesso em: 12 jan. 2023.

VILELA, R. L. T. **Avaliação do desempenho de coagulantes recuperados de lodo de ETA por extração via alcalina-ácida**. 2020. Dissertação (Mestrado em Recursos Hídricos e Tecnologias Ambientais) - Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2020. Disponível em: <https://repositorio.unesp.br/items/7afd6490-d53f-4f38-aa84-753e9250e7fd>. Acesso em: 1 jun 2024.

VON SPERLING, M. **Wastewater characteristics, treatment and disposal**. London: IWA Publishing, 2007.

WAGNER, L. F. **Avaliação do lançamento de lodo de ETA actiflo em ETE com reator anaeróbio no município de Ponta Grossa–PR**. 2015. Dissertação (Mestrado em Engenharia Sanitária e Ambiental) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Departamento de Engenharia Civil, Ponta Grossa, 2015. Disponível em: <http://tede2.uepg.br/jspui/handle/prefix/23>. Acesso em: 15 jan. 2024

WANG, L.; ZOU, F.; FANG, X.; TSANG, D. C.; POON, C. S.; LENG, Z.; BAEK, K. A novel type of controlled low strength material derived from alum sludge and green materials. **Construction and Building Materials**, Amsterdam, v. 165, p. 792-800, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2018.01.078>.

WANG, Y.; REN, B.; ZHAO, Y.; ENGLISH, A.; CANNON, M. A comparison of alum sludge with peat for aqueous glyphosate removal for maximizing their value for practical use. **Water Science and Technology**, London, v. 2017, n. 2, p. 450-456, 2018. DOI: <https://doi.org/10.2166/wst.2018.165>.

WU, H.; ZHU, Y.; BIAN, S.; KO, J. H.; LI, S. F. Y.; XU, Q. H<sub>2</sub>S adsorption by municipal solid waste incineration (MSWI) fly ash with heavy metals immobilization. **Chemosphere**, Oxford, v. 195, p. 40-47, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2017.12.068>.

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**, Amsterdam, v. 161, n. 2-3, p. 663-669, 2009. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2008.04.008>.

XU, Y.; CHEN, T.; XU, R.; HE, L.; CUI, F. Impact of recycling alum sludge on coagulation of low-turbidity source waters. **Desalination and Water Treatment**, New York, v. 57, n. 15, p. 6732-6739, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/19443994.2015.1013504>.

YANG, L.; HAN, Y. X.; WANG, D. T. High efficiency aluminum coagulant recovery from drinking water treatment plant sludge by using ultrasound assisted acidification. **Advanced Materials Research**, Baech, v. 777, n. 60-64, 2013. DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMR.777.60>.

YANG, Y.; ZHAO, Y.; TANG, C.; MAO, Y.; CHEN, T.; HU, Y. Novel pyrrhotite and alum sludge as substrates in a two-tiered constructed wetland-microbial fuel cell. **Journal of Cleaner Production**, Amsterdam, v. 293, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2021.126087>.

ZHAO, Y. Q.; BABATUNDE, A. O.; HU, Y. S.; KUMAR, J. L. G.; ZHAO, X. H. Pilot field-scale demonstration of a novel alum sludge-based constructed wetland system for enhanced wastewater treatment. **Process Biochemistry**, London, v. 46, n. 1, p. 278-283, 2011. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.procbio.2010.08.023>.

ZHAO, X. H.; ZHAO, Y. Q.; KEARNEY, P. Phosphorus recovery as AIPO 4 from beneficially reused aluminium sludge arising from water treatment. **Environmental technology**, Oxfordshire, v. 34, n. 2, p. 263-268, 2013. DOI: <https://doi.org/10.1080/09593330.2012.692714>.

ZHAO, X.; LUO, H.; TAO, T.; ZHAO, Y. Immobilization of arsenic in aqueous solution by waterworks alum sludge: prospects in China. **International Journal of Environmental Studies**, Oxon, v. 72, n. 6, p. 989-1001, 2015. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2015.1071522>.

ZHAO, Y.; REN, B.; O'BRIEN, A.; O'TOOLE, S. Using alum sludge for clay brick: an Irish investigation. **International Journal of Environmental Studies**, Oxon, v. 73, n. 5, p. 719-730, 2016. DOI: <https://doi.org/10.1080/00207233.2016.1160651>.

ZHAO, Y.; LIU, R.; AWE, O. W.; YANG, Y.; SHEN, C. Acceptability of land application of alum-based water treatment residuals—an explicit and comprehensive review. **Chemical Engineering Journal**, Amsterdam, v. 353, p. 717-726, 2018. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cej.2018.07.143>.

ZHAO, Y.; NZIHO, A.; REN, B.; LYCZKO, N.; SHEN, C.; KANG, C.; JI, B. Waterworks sludge: an underrated material for beneficial reuse in water and environmental engineering. **Waste and Biomass Valorization**, Dordrecht, v. 12, p. 4239-4251, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01232-w>.

ZHAO, W., XIE, H., LI, J., ZHANG, L., ZHAO, Y. Application of alum sludge in wastewater treatment processes: “science” of reuse and reclamation pathways. **Processes**, Basileia, v. 9, n. 4, p. 612, 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/pr9040612>.