

Avaliação da coagulação/floculação como pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário utilizando coagulantes químico e natural

Post-treatment of landfill leachate by coagulation/flocculation using chemical and natural coagulants.

- **Data de entrada:**
15/03/2017
- **Data de aprovação:**
26/02/2018

Camila de Almeida Porto* | Mariana Maciel Almeida de Andrade | Camila de Mello Silva | Elson Santos da Silva | Elisângela Maria Rodrigues Rocha

DOI: <https://doi.org/10.4322/dae.2019.029>

Resumo

Neste trabalho, a coagulação/floculação, utilizando-se cloreto férrico e *Moringa oleifera* como coagulantes, foi avaliada para o pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário proveniente de um sistema de lagoas de estabilização. Aplicou-se um planejamento fatorial 2^2 com ponto central em triplicada para cada coagulante. As variáveis-respostas foram: cor verdadeira, DQO e turbidez. O cloreto férrico alcançou remoção de 80% de cor, 64% de DQO e 90% de turbidez para uma concentração de 400 mg Fe^{+3} . L^{-1} e pH 5. A *Moringa oleifera* obteve remoção de 69% de cor, 62% de turbidez e pequena remoção de DQO, utilizando-se 4000 mg. L^{-1} e pH 4. Ambos os coagulantes apresentaram elevadas eficiências de remoção de cor e turbidez, entretanto o coagulante natural necessita de um melhor preparo para que contribua também na remoção de DQO.

Palavras-chave: Tratamento físico-químico. Cloreto férrico. *Moringa oleifera*.

Abstract

In this work, coagulation/flocculation, using ferric chloride and Moringa oleifera as coagulants, was evaluated for post-treatment of landfill leachate. A 2^2 factorial design with triplicate center point was performed for each coagulant. The variables-responses were true colour, COD and turbidity. The ferric chloride removed 80% color, 64% COD and 90% turbidity at a concentration with 400 mg Fe^{+3} . L^{-1} and pH 5. Moringa oleifera obtained removal of 69% color, 62% Turbidity and insignificant removal of COD, using 4000 mg. L^{-1} and pH 4. Both coagulants presented high efficiencies, however the natural coagulant needs a better preparation to also contribute with removal of COD.

Keywords: Physical-chemical treatment. Ferric chloride. *Moringa oleifera*.

Camila de Almeida Porto – Engenheira Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela UFPB.

Mariana Maciel Almeida de Andrade – Engenheira Ambiental pela UFPB. Pós-graduação em andamento em Sistema de Gestão Integrada da Qualidade, Meio Ambiente, Segurança e Saúde do Trabalho e Responsabilidade Social. Engenheira Ambiental da Prefeitura Municipal de Pesqueira (PE).

Camila de Mello Silva – Engenheira Ambiental pela Universidade Federal da Paraíba (UFPB). Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela UFPB.

Elson Santos da Silva – Engenheiro Ambiental pela Laureate International Universities. Mestre em Energias Renováveis pela UFPB. Doutorando em Ciências e Engenharia de Materiais pela UFPB. Técnico em Saneamento do Laboratório de Saneamento da UFPB.

Elisângela Maria Rodrigues Rocha – Engenheira Sanitarista pela Universidade Federal do Pará. Mestre em Engenharia Civil/Geotécnica Ambiental pela Universidade Federal de Pernambuco. Doutora em Engenharia Civil/Saneamento Ambiental pela UFC. Professora do Departamento de Engenharia Civil e Ambiental da UFPB.

***Endereço para correspondência:** Rua Prefeito Joaquim Pessoa Passos, 92, João Pessoa, PB. E-mail: camila.aporto@hotmail.com.

1 INTRODUÇÃO

Em 2015, cerca de 80 milhões de toneladas de resíduos foram gerados no país, e cerca de 53% desse montante foram dispostos em aterros sanitários (ABRELPE, 2015). O aterro sanitário, mesmo sendo a forma de disposição ambientalmente adequada (BRASIL, 2010), está associado à geração de lixiviado e gases, subprodutos perigosos que necessitam de tratamento (CASTILHO JUNIOR, 2003; KULIKOWSKA & KLIMIUK, 2008).

O lixiviado é o líquido resultante da água contida nos resíduos, dos produtos de degradação biológica e dos materiais dissolvidos e suspensos carregados pela água infiltrada (GOMES, 2009). Esse efluente pode apresentar elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal, cloretos, matéria orgânica e metais (KAWAHIGASH et al., 2014). Seu tratamento requer uma combinação de técnicas, cada uma atuando em um contaminante específico, para alcançar os limites de lançamentos da legislação ambiental (MALER et al., 2015).

Nesse contexto, o pós-tratamento físico-químico por meio da coagulação-floculação-sedimentação apresenta-se como uma alternativa para a remoção de compostos recalcitrantes, não removidos pelo tratamento biológico (CASTRO, YAMASHITA & SILVA, 2012). Alguns trabalhos já aplicaram esse tratamento em lixiviado de aterro sanitário e obtiveram elevadas remoções de DQO (>50%), como Amor et al. (2015), Aguilar et al. (2011), Loureiro et al. (2014), Maler et al. (2015), Pedroso et al. (2011).

A coagulação é aplicada na precipitação de partículas dissolvidas e na desestabilização de suspensões coloidais, seguida pela floculação, que aglutina as partículas coaguladas de modo a possibilitar sua separação por decantação (RICHTER, 2009). Primeiramente uma agitação rápida é aplicada para aumentar a interação entre as partículas. Em seguida, a agitação lenta é aplicada para ajudar a formação de flocos mais

densos e, por fim, cessa-se a agitação para a decantação dos flocos formados (YADAV & DIKSHIT, 2016). As variáveis intervenientes desse processo são pH, dosagem de coagulante/floculante, condições de mistura, tempo de sedimentação e temperatura (RICHTER, 2009; SAHU & CHAUDHARI, 2013; TEH et al., 2016).

Os coagulantes mais utilizados são sulfato de alumínio e cloreto férrico, entretanto apresentam desvantagens, como produção de lodo e alteração de pH (EBELING et al., 2003). O aperfeiçoamento desse processo tem caminhado para a utilização de materiais à base de plantas, destacando-se a não toxicidade e a natureza biodegradável como principais vantagens (TEH et al., 2016). Dentre os coagulantes naturais, a *Moringa oleifera* é o coagulante mais estudado (YIN, 2010).

De maneira geral, a *Moringa oleifera* é investigada para o tratamento de água, entretanto poucos trabalhos investigam sua aplicação para efluentes (PEDROSO et al., 2011). Assim, este trabalho objetivou avaliar o processo de coagulação/floculação/sedimentação utilizando um coagulante químico – cloreto férrico (FeCl₃) e um coagulante natural – *Moringa oleifera*, na remoção de matéria orgânica, como pós-tratamento do lixiviado do proveniente do sistema de lagoas do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP).

2 MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Lixiviado de aterro sanitário

O lixiviado foi coletado na segunda lagoa facultativa do sistema de tratamento do Aterro Sanitário Metropolitano de João Pessoa (ASMJP) em outubro de 2016 e refrigerado a 4°C no Laboratório de Saneamento (CT – UFPB). A caracterização físico-química do efluente (Tabela 1) foi realizada de acordo com o *Standard Methods* (APHA, WWA & WEF, 2005).

Tabela 1 – Caracterização do lixiviado proveniente do ASMJP.

Parâmetro	Valor	Método
Corverdadeira (mg Pt-Co. L ⁻¹)	6.375,00	Platino-cobalto
DBO ₅ (mg O ₂ L ⁻¹)	356,00	Respirométrico
DQO _{solúvel} (mg O ₂ L ⁻¹)	3.734,55	Refluxação fechada e colorimétrico
Ferro total (mg. L ⁻¹)	5,21	Fenantrolina
pH	8,49	Eletrométrico
Sólidos Totais (mg. L ⁻¹)	11.344,44	Gravimétrico
Sólidos Totais Fixos (mg. L ⁻¹)	8.874,44	
Sólidos Totais Voláteis (mg. L ⁻¹)	2.470,00	
Turbidez (NTU)	131,00	Nefelométrico

2.2 Procedimento experimental

O planejamento fatorial 2² completo com ponto central em triplicata foi realizado com base em resultados preliminares (PORTO et al., 2017), totalizando 7 amostras para cada coagulante. As

variáveis e os níveis estudados são apresentados nas Tabelas 2 e 3 para o FeCl₃ e a *Moringa oleifera*, respectivamente. As variáveis-resposta foram DQO, cor verdadeira e turbidez. O pH final e o lodo gerado também foram determinados.

Tabela 2 – Variáveis e níveis estudados no planejamento fatorial 2² para o FeCl₃.

VARIÁVEIS	NÍVEIS		
	Inferior (-)	Central (0)	Superior (+)
[Fe ⁺³] (mg. L ⁻¹)	300	400	500
pH	4	5	6

Tabela 3 – Variáveis e níveis estudados no planejamento fatorial 2² para a *Moringa oleifera*.

VARIÁVEIS	NÍVEIS		
	Inferior (-)	Central (0)	Superior (+)
[Moringa] (mg. L ⁻¹)	1400	2700	4000
pH	4	5	6

Os experimentos foram realizados no equipamento Jar test com 300 mL de lixiviado, aplicando-se uma mistura rápida de 130 rpm durante 60 segundos e uma mistura lenta de 40 rpm por 10 minutos e tempo de decantação de uma hora.

A eficiência de cada parâmetro foi determinada pela Equação 1. Ressalta-se que as eficiências dos parâmetros de cor verdadeira e DQO foram em relação ao lixiviado no pH das respectivas amostras em virtude das reduções ocasionadas pelo ajuste do pH, como relatam Amor et al. (2015).

$$E (\%) = \frac{(X - X_i)}{X} \cdot 100 \quad (1)$$

Sendo,

E = Eficiência;

X = Parâmetro da amostra bruta;

Xi = Parâmetro da amostra tratada.

3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Caracterização do lixiviado de aterro sanitário

O sistema de tratamento do lixiviado do ASMJP é composto por 11 lagoas: 3 decantação, 2 anaeróbica, 2 facultativas, 2 charcos, 1 reservação e 1 recirculação, caracterizando um tratamento de natureza biológica (ASMJP, 2016). O efluente coletado apresentava coloração escura e odor desagradável. A partir da sua caracterização (Tabela 1), observou-se que o efluente ainda tem elevado potencial contaminante (DQO = 3.734,55 mg O₂. L⁻¹ e cor verdadeira = 6.375,00 mg. L⁻¹), impossibilitando seu lançamento nos corpos hídricos.

Também foi possível classificá-lo como lixiviado antigo devido à baixa relação DBO5/DQO (~0,10) e pH alcalino (8,49) (RENOU et al., 2008). Dessa for-

ma, tratamentos físico-químicos são recomendados para esse tipo de lixiviado, uma vez que há predominância de compostos de difícil degradação.

3.2 Cloreto férrico

As maiores remoções de cor verdadeira (80%), DQO (64%) e turbidez (90%) foram observadas nas amostras 5, 6 e 7, referentes ao ponto central (400 mg Fe⁺³. L⁻¹ e pH 5) (Tabela 4). Outros trabalhos relataram condições semelhantes, como Felici et al. (2013), que alcançaram remoções de 98% de cor verdadeira e 89% de DQO com 400 mg Fe⁺³. L⁻¹ e pH 3 e Maler et al. (2015) removeram 96% de cor verdadeira e 78% de DQO com 350 mg Fe⁺³. L⁻¹ e pH 4,0.

Tabela 4 – Eficiências, geração de lodo e variação do pH das amostras tratadas com FeCl₃.

Amostra	[Fe ⁺³]	pH	Cor verdadeira (%)	DQO (%)	Turbidez (%)	Lodo (mL. L ⁻¹)	ΔpH
1	-	-	47,98	37,86	36,80	300	-1,44
2	+	-	42,58	48,96	37,31	300	-1,53
3	-	+	19,70	27,18	-12,69	167	0,09
4	+	+	46,47	42,31	-9,39	233	-0,11
5	0	0	79,89	65,94	91,04	333	-2,24
6	0	0	79,89	62,71	89,82	333	-2,16
7	0	0	79,19	62,71	90,33	333	-2,20

Quanto à variação de pH (Tabela 4), as amostras apresentaram consideráveis variações no pH inicial, com exceção das amostras 3 e 4, indicando uma capacidade de tamponamento do meio no pH 6. O ponto central (amostras 5, 6 e 7) apresentou a maior redução de pH, superior à redução da amostra 2 com uma concentração maior de coagulante. Isso evidencia a complexidade do efluente e a elevada influência dessas variáveis na eficiência do processo.

Em relação à geração de lodo (Tabela 4), as amostras não apresentaram grandes diferenças, sobretudo entre as amostras 1-2 e 5-7 apesar

da diferença nas eficiências. Gandhimathi et al. (2013) observaram uma variação de mais de 500 mL. L⁻¹ de lodo formado entre as amostras nas mesmas concentrações de FeCl₃ deste trabalho sem ajuste de pH.

As amostras 3 e 4 apresentaram incremento de partículas em suspensão, o que gerou uma turbidez acima do valor inicial, representando uma eficiência negativa. Essas amostras também geraram menos lodo, indicando a formação de flocos menores, que necessitam de maior tempo de decantação. A eficiência de remoção de cor ver-

dadeira e DQO não foram influenciadas devido à centrifugação prévia antes da análise.

Na Figura 1 é mostrado o aspecto visual das amostras tratadas com FeCl₃ após uma hora de

decantação. É possível observar que as amostras 5, 6 e 7 exibem a maior clarificação, mas apresentam quantidades semelhantes de lodo formado com as amostras 1 e 2.

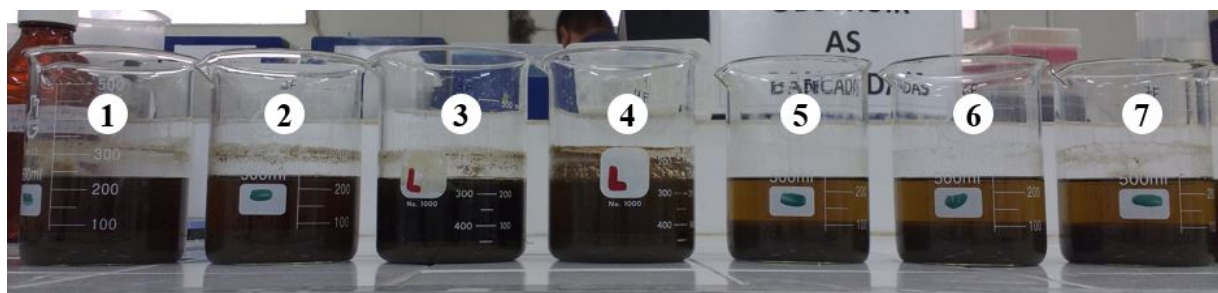


Figura 1 – Amostras após uma hora de decantação tratadas com FeCl₃.

3.3 *Moringa oleifera*

A amostra 2 (4000 mg.L⁻¹ e pH 4) apresentou as maiores remoções de cor verdadeira (69%) e turbidez (62%) (Tabela 5). Ressalta-se que houve aumento de DQO em todas as amostras, com exceção

da amostra 2 (pouco significativo). Possivelmente, a remoção de DQO não foi observada devido à adição de matéria orgânica do próprio coagulante. Yin (2010) adverte que tal fato pode ocorrer em razão do modo de preparo do coagulante natural.

Tabela 5 – Eficiências, lodo gerado e variação de pH das amostras tratadas com *Moringa oleifera*.

Amostra	[Moringa]	pH	Cor verdadeira (%)	DQO (%)	Turbidez (%)	Lodo (mL L ⁻¹)	ΔpH
1	-	-	43,35	-1,71	15,48	83	-0,41
2	+	-	68,79	0,47	62,18	167	-0,34
3	-	+	35,96	-14,34	-172,84	33	0,39
4	+	+	28,08	-37,39	-27,92	83	0,40
5	0	0	17,11	-8,56	-150,00	83	-0,12
6	0	0	14,29	-23,86	-129,95	83	-0,16
7	0	0	14,99	-2,79	-135,03	83	-0,14

Yamaguchi (2012) também relatou aumento de DQO utilizando a *Moringa oleifera* (9000-1200 mg. L⁻¹) em diferentes pH (6 a 8), mesmo com o filtrado da solução do coagulante. Já Pedroso et al. (2011) obtiveram remoção de DQO (54%) utilizando a *Moringa oleifera* em solução (2500 mg. L⁻¹, pH 4). Entretanto, as amostras foram previamente filtradas para as análises.

Com relação ao lodo gerado, a amostra 2 também apresentou a maior formação de lodo com 167 mL. L⁻¹ (Tabela 6). Todas as amostras apresentaram pequenas variações de pH após a adição do coagulante, e apenas as amostras 3 e 4 tiveram aumento de pH.

Na Figura 2 são apresentadas as amostras tratadas com *Moringa oleifera* após uma hora de decantação, destacando-se a amostra 2 com a maior clarificação e a maior formação de lodo.

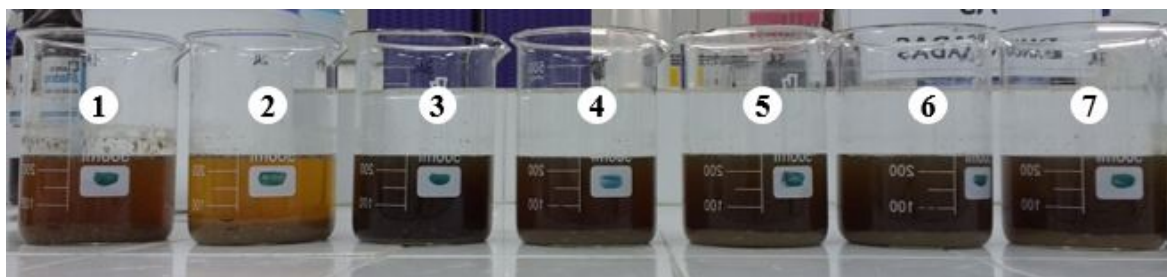


Figura 2 – Amostras após uma hora de decantação tratadas com Moringa oleifera.

3.4 Comparação entre os coagulantes

Os coagulantes apresentaram remoções semelhantes de cor verdadeira e turbidez, e apenas o coagulante químico foi capaz de remover DQO (Tabela 6). Entretanto, o coagulante químico apresentou maior variação de pH e formação de lodo quando comparado ao coagulante natural.

Essas constatações estão de acordo com a literatura. Segundo Nishi et al. (2011), as vantagens

do uso da moringa estão relacionadas com a não alteração do pH do meio e a menor quantidade de lodo gerado, além de ser um coagulante biodegradável e não tóxico. Como desvantagem, pode-se mencionar a quantidade de coagulante natural necessária, dez vezes maior do que o coagulante químico. Outra desvantagem é o possível incremento de DQO. Uma alternativa, conforme Yin (2010), é o preparado mais purificado do coagulante, mas isso encarece o processo.

Tabela 6 – Quadro comparativo dos coagulantes estudados

Coagulante	Melhor condição	Redução do pH	Lodo gerado (mL L ⁻¹)	Remoção (%)
FeCl ₃	400 mg Fe ⁺³ . L ⁻¹ pH 5	2,20	333	DQO: 64
				Cor verdadeira: 80
				Turbidez: 90
<i>Moringa oleifera</i>	4000 mg. L ⁻¹ pH 4	0,34	167	DQO: 0,5
				Cor verdadeira: 69
				Turbidez: 62

4 CONCLUSÃO

Ambos os coagulantes apresentaram resultados satisfatórios para o pós-tratamento do lixiviado de aterro sanitário, como exceção na remoção de DQO pela *Moringa oleifera*. Ainda assim, o coagulante natural destaca-se como alternativa viável em virtude do caráter não-tóxico, entretanto requer o aperfeiçoamento de técnicas de preparação para a sua utilização.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUILAR, H. A. N. et al. Physicochemical treatment (coagulation-flocculation-fenton) of mature leachates from Tuxtla Gutierrez, Chiapas landfill. **Sustain Environment Research**, v. 21, n. 5, p. 313-319, 2011.

AMERICAN PUBLIC HEALTH ASSOCIATION; THE AMERICAN WATER WORKS ASSOCIATION; THE WATER ENVIRONMENT FEDERATION (APHA; AWWA; WEF). **Standards methods for the examination of water and wastewater**, 21th ed. Washington, DC, 2005.

- AMOR, C. et al. Mature landfill leachate treatment by coagulation/flocculation combined with Fenton and solar photo-Fenton processes. **Journal of Hazardous Materials**, v. 286, p. 261–268, 2015.
- Associação Brasileira de Empresas de Limpeza Pública e Resíduos Especiais (ABRELPE). **Panorama de Resíduos Sólidos no Brasil 2015**. 2015.
- Aterro Sanitário Metropolitan de João Pessoa (ASMJP). **Monitoramento do Aterro Sanitário Metropolitan de João Pessoa - Relatório de Atividades (Maio e Junho)**. 2016.
- BRASIL. Lei nº 12.305, de 02 de agosto de 2010. 2010.
- CASTILHO JUNIOR, A. B. **Resíduos sólidos urbanos: aterro sustentável para municípios de pequeno porte**. Projeto PROSAB. RiMa, Rio de Janeiro, p. 294, 2003.
- CASTRO, A. P.; YAMASHITA, F.; SILVA, S. M. C.P. Adição de polieletrólito ao processo de floculação no pós-tratamento de lixiviado por coagulação-floculação-sedimentação. **Engenharia Sanitária Ambiental**, v. 17, n. 1, p. 25-32, 2012.
- EBELING, J. M. et al. Evaluation of chemical coagulation/flocculation aids for the removal of suspended solids and phosphorus from intensive recirculating aquaculture effluent discharge. **Aquacultural Engineering**, v. 29, p. 23–42, 2003.
- FELICI, E. M. et al. Remoção de carga orgânica recalcitrante de lixiviado de resíduos sólidos urbanos pré-tratado biologicamente por coagulação química-floculação-sedimentação. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 18. n.2, p. 177–184, 2013.
- GANDHIMATHI, R et al. Use of combined coagulation-adsorption process as pretreatment of landfill leachate. **Iranian Journal Environmental Health Science Engineering**, v. 10, n. 1, 2013.
- GOMES, L. P. (Coord.). Estudos de caracterização e tratabilidade de lixiviados de aterros sanitários para as condições brasileiras. **Projeto PROSAB**. ABES, Rio de Janeiro, p. 360, 2009.
- KAWAHIGASH, F. et al. Pós-tratamento de lixiviado de aterro sanitário com carvão ativado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 19, n. 3, p. 235–244, 2014.
- KULIKOWSKA, D.; KLIMIUK, E. The effect of landfill age on municipal leachate composition. **Bioresource Technology**, v. 99, p. 5981–5985, 2008.
- LOUREIRO, M. A. et al. Tratamento de lixiviado de aterros sanitários urbanos utilizando os processos oxidativos avançados combinados a coagulação/floculação. *In: XX Congresso Brasileiro de Engenharia Química*. Florianópolis, Santa Catarina, 2014.
- MALER, C. L. et al. Sequência de tratamentos para lixiviado de aterro sanitário utilizando os processos físico-químico convencional e Fenton como pós-tratamento. **Revista DAE**, nº 1999, p. 47–57, 2015.
- NISHI, L. et al. Coagulação/floculação com sementes de *Moringa oleifera Lam* para remoção de cistos de *Giardia spp.* e oocistos de *Cryptosporidium spp.* da água. *In: III International Workshop Advances in Cleaner Production*, São Paulo, p. 10, 2011.
- PORTO, C. A.; ANDRADE, M. M. A.; LUCENA, L. G.; SILVA, E. S.; ROCHA, E. M. R. Redução de cor e turbidez no pós-tratamento de lixiviado antigo de aterro sanitário por coagulação/floculação/sedimentação. *In: Congresso ABES/FENASAN*, São Paulo, 2017.
- PEDROSO, K. et al. Avaliação da tratabilidade do lixiviado do aterro de Maringá – PR com a utilização de coagulantes naturais. **Engenharia e Tecnologia**, v. 3, n. 2, p. 47–52, 2011.
- RENOU, S. et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, p. 468–493, 2008.
- RICHTER, C. A. **Água: métodos e tecnologia de tratamento**. São Paulo. Blucher, 2009.
- SAHU, O. P.; CHAUDHARI, P. K. Review on Chemical treatment of Industrial Waste Water. **Journal of Applied Sciences and Environmental Management**, v. 17, n. 2, p. 241–257, 2013.
- TEH, C. Y. et al. Recent Advancement of coagulation-flocculation and its application in wastewater treatment. **Industrial & Engineering Chemistry Research**, n. 55, p. 4363 – 4389, 2016.
- YADAV, J. S.; DIKSHIT, A. K. Effect of pretreatment by coagulation on stabilized landfill leachate during anaerobic treatment. **Cogent Environmental Science**, v. 2, p. 13, 2016.
- YAMAGUCHI, T. E.S. Aplicação de coagulantes naturais no tratamento de lixiviado de resíduos urbanos. Monografia. (Trabalho de conclusão de curso em Engenharia Ambiental). 2012. Universidade Estadual Paulista, Presidente Prudente.
- YIN, C-Y. Emerging usage of plant-based coagulants for water and wastewater treatment. **Process Biochemistry**, v. 45, n. 9, p. 437–1444, 2010.