



564 – TOXICIDADE DE LODOS DE ESTAÇÃO DE TRATAMENTO DE ÁGUA EM USOS BENÉFICOS: REVISÃO SISTEMÁTICA

Gabriela de Almeida Nascimento⁽¹⁾

Engenheira Ambiental pela Unesp de São José dos Campos (2022). Mestranda em Engenharia Civil e Ambiental pela Faculdade de Engenharia de Bauru (2024).

Amanda Maria Dantas de Jesus⁽²⁾

Química Licenciatura (2008) e Mestre em Ciências (2010) pela Universidade Federal de Sergipe. Doutora em Química (2014) pela Universidade Federal de São Carlos. Pós-doutoranda pela UNESP (2024).

Suzelei Rodgher⁽³⁾

Bióloga, Licenciatura e Bacharelado pela Universidade Federal de São Carlos (1999). Mestre (2001) e Doutora (2005) em Ciências da Engenharia Ambiental pela Escola de Engenharia de São Carlos, Universidade de São Paulo. Pós-doutora pela Universidade de Federal de São Carlos (2007). Livre-docente em Ecotoxicologia pela UNESP (2024).

Fabiana Alves Fiore⁽⁴⁾

Engenheira Civil pela Universidade Federal de Minas Gerais (2002). Mestre em Saneamento, Meio Ambiente e Recursos Hídricos pela Universidade Federal de Minas Gerais (2004). Doutora em Saneamento e Meio Ambiente pela Universidade de Campinas (2013). Livre-docente em Gerenciamento de Resíduos Sólidos pela UNESP (2024).

Endereço⁽¹⁾: Estrada Dr. Altino Bondensan, 500 - Eugênio de Melo, São José dos Campos - SP, 12247-016 – Brasil – Tel: +55 (11) 95386-9606 - e-mail: gabriela.a.nascimento@unesp.br

RESUMO

Discussões sobre o uso benéfico de Lodos Estações de Tratamento de Água (LETAs) estão sendo cada vez mais observadas no contexto acadêmico, pois a produção desses resíduos vem aumentando consideravelmente devido ao crescimento populacional. O descarte inadequado de LETAs é realizado em grande parte dos territórios no Brasil, causando impactos negativos, a despeito da regulamentação legal existente. Para garantir adequado manejo e aproveitamento dos LETAs, as análises ecotoxicológicas são fundamentais, apesar de ainda não estarem previstas no arcabouço legal. O objetivo deste trabalho foi realizar uma revisão sistemática em bases científicas a fim de avaliar os testes ecotoxicológicos que são empregados nos estudos de uso benéfico dos LETAs. Para tal, aplicou-se a metodologia PRISMA e obteve-se uma amostra final de 11 artigos, o que confirma a necessidade de mais estudos sobre o tema e valida a atualidade do assunto. Foram realizadas categorizações dos resultados em função do país de realização da pesquisa, da tipologia e preparação dos LETAs avaliados, e do organismo teste empregado nos estudos ecotoxicológicos. Dentre os resultados verificados, destaca-se que o Brasil foi o país com a maior quantidade de artigos publicados sobre a temática; as palavras “*sludge*”, “*treatment*” e “*water*” foram as palavras-chave mais identificadas; os coagulantes de sais de Ferro e Alumínio foram os mais utilizados; e nas pesquisas foram utilizadas amostras de LETAs *in natura* e desidratados; o microcrustáceo da família *Daphnia* foi o organismo-teste mais utilizado para testes ecotoxicológicos, mostrando variações de comportamento em testes de ecotoxicidade aguda ou crônica. Foi possível observar que a escolha das palavras-chave, para a construção de revisões sistemáticas, influencia diretamente na quantidade de artigos resultantes. Também se verificou que, mesmo quando especificado apenas os LETAs a maior parte dos artigos resultantes se referiam aos lodos de estação de tratamento de esgotos. Por fim, foi possível concluir que os testes de ecotoxicidade podem contribuir para que a viabilidade ambiental do uso benéfico do LETA seja assegurada e que a realização deste ensaio como uma das etapas para avaliar a periculosidade de um resíduo é indispensável.

PALAVRAS-CHAVE: Lodo de Estação de Tratamento de água; Ecotoxicidade; Ecotoxicologia

INTRODUÇÃO

A Norma Técnica NBR 10004 (ABNT, 2004) classifica os Lodos de Estação de Tratamento de Água (LETAs) como resíduos sólidos e, portanto, seu descarte deve seguir o estabelecido na Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS). Esta Lei determina, entre outros fatores, que as empresas de saneamento devem buscar soluções ambientalmente adequadas para a destinação dos resíduos gerados nos processos de tratamento de água, os LETAs (BRASIL, 2010).

O crescimento da produção de lodo no mundo está relacionado a diversos fatores, entre eles, o crescimento populacional. No Brasil, em 2015, foram geradas mais de 78 milhões de toneladas de lodo de ETA e 43% do volume é da região sudeste do país (MMA, 2022). Em São Paulo, estima-se que a produção anual seja de 150 mil toneladas de lodos de ETAs (BRASIL, 2010). Há poucos estudos relacionados à destinação final de LETAs, contudo, na atualidade a disposição final desses resíduos em aterros sanitários figura como melhor prática, entretanto sabe-se que o destino mais comum é o lançamento direto em corpos receptores (MMA, 2022).

O lançamento deste resíduo no efluente acarreta no aumento da quantidade e diversidade de organismos patogênicos, incremento de metais no sedimento e na coluna d'água (Di BERNARDO, 2017). Metais não são biodegradáveis e são considerados, dependendo da concentração, como os maiores poluentes ambientais que causam efeitos citotóxicos, mutagênicos e carcinogênicos em animais (HUSSEIN, 2011).

Considerada a prévia classificação dos LETAs como resíduos não perigosos (IBAMA, 2012) e passíveis de reversão, algumas alternativas para uso benéfico deste material têm sido estudadas, tais como: recuperação de áreas degradadas, agricultura, incorporação na fabricação de cimento e como componente geotécnico para fabricação de estradas (FIORE *et al.*, 2022). Apesar da viabilidade técnica do uso benéfico deste resíduo, poucas pesquisas avaliam a viabilidade ambiental de emprego do material (URBAM *et al.*, 2019). Alguns estudos evidenciaram que a qualidade da água e dos solos foi alterada após aplicação do LETA no solo (AWWA, 1991), além de pouco se discutir sobre a toxicidade destes resíduos para a biota encontrada nos locais de disposição escolhidos.

A Norma Brasileira caracteriza um resíduo como tóxico se uma amostra, entre outros fatores, for comprovadamente letal ao homem ou possuir uma determinada concentração letal oral ou por inalação quando testada em ratos ou coelhos (ABNT, 2004). Essa Norma encontra-se em Consulta Pública com algumas propostas de alterações sobre as decisões que devem ser tomadas ao longo do processo de classificação do resíduo quanto à sua periculosidade, passando a considerar ensaios ecotoxicológicos.

Nessa abordagem, alguns estudos ecotoxicológicos auxiliam no entendimento dos efeitos da disposição dos LETAs em compartimentos ambientais, como a ecotoxicidade. A Ecotoxicologia, por definição, é a ciência que estuda os efeitos das substâncias químicas sobre organismos vivos (WALKER, 2006) e permite avaliar os danos ocorridos nos ecossistemas após alguma contaminação e prever impactos futuros, considerando a interação dos poluentes com o meio ambiente (ZAGATTO & BERTOLETTI, 2008).

Dentre os organismos testados quanto à toxicidade de LETAs, o zooplâncton *Daphnia magna*, espécie-teste rotineiramente utilizada em avaliações ecotoxicológicas, foi considerado sensível com diminuição na taxa de fecundidade e de sobrevivência (RANJBAR *et al.*, 2018). Similarmente, toxicidade crônica e mortalidade acima de 40% também foram observados para esta espécie devido a exposição a LETAs (SOTERO-SANTOS *et al.*, 2005 & SOTERO-SANTOS *et al.* 2007). Este resultado enfatiza a importância de tratar este resíduo antes de descartá-lo, visto que o descarte inadequado pode afetar a qualidade da água e a preservação da comunidade aquática (BATISTA *et al.*, 2021).

OBJETIVO

Realizar uma revisão sistemática em bases de dados científicos sobre a avaliação da ecotoxicidade em estudos que avaliam o uso benéfico de lodos da estação de tratamento de água.

Objetivos específicos:

- Avaliar a metodologia utilizada para atestar a ecotoxicidade e;
- Elencar os organismos-teste utilizados nos estudos ecotoxicológicos com LETAs e sua representatividade ambiental.

METODOLOGIA

Aplicou-se a metodologia PRISMA (2015) em que o primeiro passo é a definição das bases de dados a serem utilizadas, seguido pela definição das palavras-chave e a classificação do resultado gerado por “relevância”. Utilizou-se as bases de dados *Scopus* e *Web of Science* com as seguintes palavras-chave: (*Ecotoxicology*” or “*ecotoxicity*”) and “*water treatment*” and “*sludge*” and not “*wastewater treatment*” and not “*wastewater*” and not “*sewage water*”.

Em seguida, uniu-se os arquivos gerados e removeu-se títulos em duplicidade. Iniciou-se a leitura dos artigos seguida pela exclusão dos artigos que não abordam o escopo da pesquisa, ou seja, artigos cuja discussão abordava os Lodos de Estação de Tratamento de Esgoto (LETES) e artigos que não discutiam lodos. Em seguida iniciou-se a leitura completa do resumo e da metodologia.

Para mostrar os artigos da amostra final, fez-se uma Tabela; para avaliar a aderência das palavras-chaves escolhidas com o tema, fez-se um gráfico de nuvens com a junção de todos os resumos dos artigos, em que quanto mais vezes uma mesma palavra aparece, maior o destaque; para avaliar os tipos de coagulantes utilizados, o estado físico do LETA utilizado nos testes e o resultado do teste ecotoxicológico fez-se um diagrama de linhas.

O conjunto final de artigos foi avaliado a fim de determinar o país de realização da pesquisa, a composição e tipo dos LETAs, o uso benéfico abordado (se houver), o organismo teste utilizado, os métodos e parâmetros empregados para a análise da ecotoxicidade, os efeitos ecotoxicológicos observados (agudos ou crônicos), a relevância e a atualidade do tema.

RESULTADOS OBTIDOS

A Figura 1 mostra o resultado final com o método PRISMA (2015) aplicado ao objetivo do estudo e na Tabela 1 estão os artigos que compõem a amostra final da pesquisa:

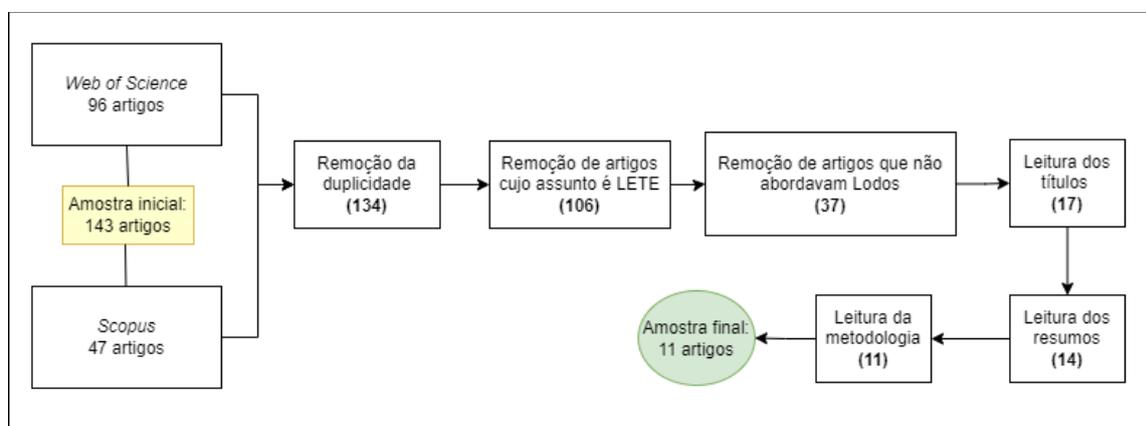


Figura 1: Resultado da metodologia PRISMA (2015)

Tabela 1: Artigos considerados para leitura completa.

AUTORES	TÍTULO	PAÍS	REFERÊNCIA
Bernegossi <i>et al.</i> , 2022	<i>A systematic review of the water treatment sludge toxicity to terrestrial and aquatic biota: state of the art and management challenges</i>	Brasil	(1)
Alvarenga <i>et al.</i> , 2018	<i>Chemical and ecotoxicological effects of the use of drinking-water treatment residuals for the remediation of soils degraded by mining activities</i>	Portugal	(2)
Sotero-Santos <i>et al.</i> , 2007	<i>Toxicity of ferric chloride sludge to aquatic organisms</i>	Brasil	(3)
Souza <i>et al.</i> , 2023	<i>Ecotoxicological aspects and environmental implications of the use of water and sewage treatment sludges</i>	Brasil	(4)
Ashong <i>et al.</i> , 2024	<i>Human and ecotoxicological risk assessment of heavy metals in polymer post treatment sludge from Barekese Drinking Water Treatment Plant Kumasi</i>	Gana	(5)
Rodgher <i>et al.</i> , 2022	<i>Acute Toxicity of Leachates from Water Treatment Plants Sludge and Combinations with Soils from a Tropical Region</i>	Brasil	(6)
Harford <i>et al.</i> , 2012	<i>Ecotoxicology of actively treated mine waters</i>	Austrália	(7)
Yuan <i>et al.</i> , 2017	<i>Ecotoxicological assessment of dewatered drinking water treatment residue for environmental recycling</i>	China	(8)
Maghsoudi <i>et al.</i> , 2015	<i>Biodegradation of multiple microcystins and cylindrospermopsin in clarifier sludge and a drinking water source: Effects of particulate attached bacteria and phycocyanin</i>	Canadá	(9)
Chen <i>et al.</i> , 2015	<i>Combining physico-chemical analysis with a Daphnia magna bioassay to evaluate a recycling technology for drinking water treatment plant waste residuals</i>	China	(10)
Fernandez <i>et al.</i> , 2014	<i>Evaluation of zinc oxide nanoparticle toxicity in sludge products applied to agricultural soil using multispecies soil systems</i>	Espanha	(11)

Na Figura 2 está a nuvem de palavras resultante da junção dos resumos dos artigos. As palavras que mais apareceram foram *sludge*, *treatment* e *water*, similar à escolha das palavras-chave.

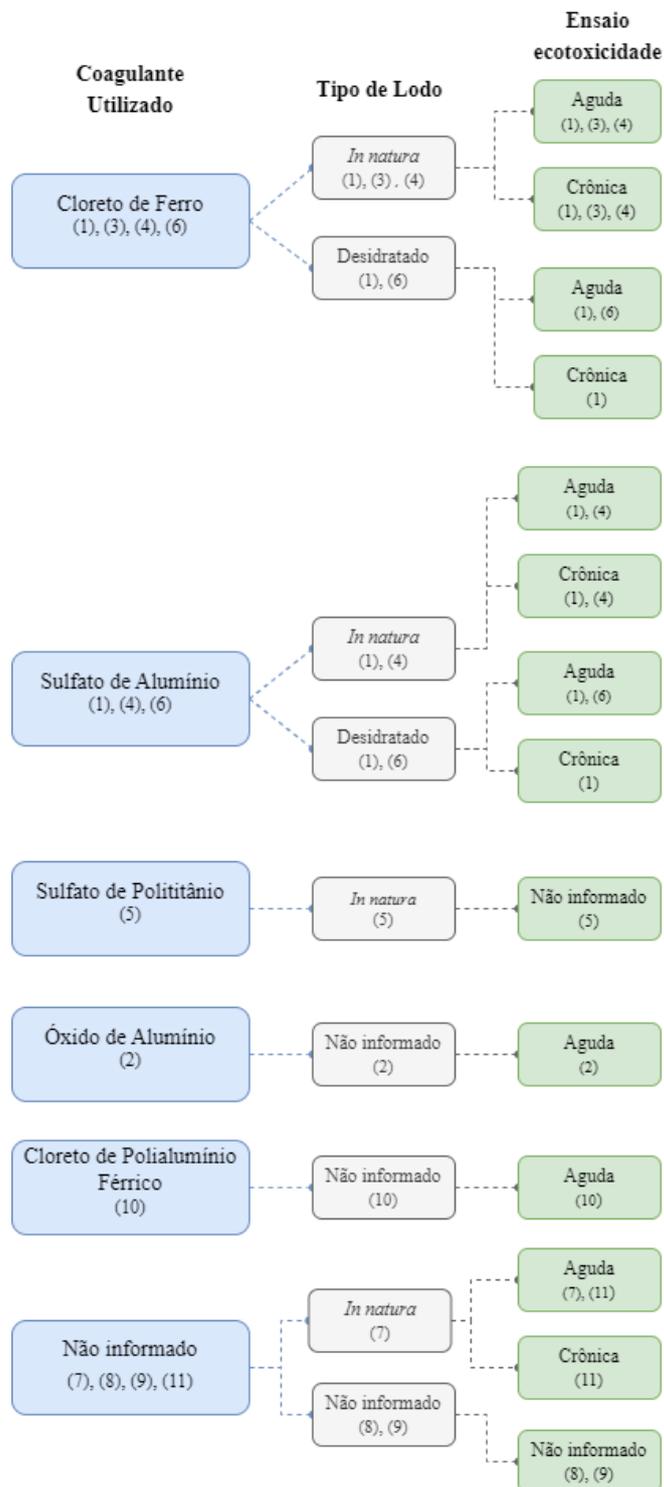


Figura 3. Coagulantes utilizados nas ETAs e especificações dos LETAs utilizados nos ensaios de Ecotoxicidade



ANÁLISE E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Após a aplicação do método PRISMA para a realização da revisão sistemática observou-se que a escolha das palavras-chave, principalmente a utilização de termos que restringiram a pesquisa para a temática de ecotoxicologia, interferiu diretamente na quantidade de artigos remanescentes, o que pode justificar a necessidade de mais pesquisas sobre o tema, ou fundamentar a escolha da palavra “*toxicity*” para abranger mais resultados, inclusive os que discutem a abordagem ecotoxicológica.

A partir da nuvem de palavras gerada, demonstra-se que os artigos da amostra final são pertinentes ao tema e são adequados à metodologia proposta, pois termos relacionados ao tópico Ecotoxicologia o aparecem em maiores quantidades. Contudo, a palavra “*sewage*” também apareceu entre os termos mais citados, o que pode indicar que os resultados são constantemente comparados ou existem incertezas sobre o conceito de LETE e LETA. Essa interferência pode fundamentar o uso da metodologia Bola de Neve (Vinuto, 2014) como ferramenta de auxílio em revisões bibliográficas cujas temáticas são recentes e ainda pouco discutidas.

Entre os artigos considerados, nota-se que não há um consenso entre metodologias e organismos utilizados para avaliar toxicidade dos LETAs. Contudo, nos testes realizados, a toxicidade foi observada para bactérias, protozoários, algas, crustáceos e peixes a depender do tempo de exposição, sensibilidade da espécie-teste, concentração e tipo de lodo (BERNEGOSSI *et al.*, 2022). Também é possível observar que o coagulante utilizado, o estado físico do Lodo utilizado e o ensaio de ecotoxicidade aplicado não são sempre mencionados nas pesquisas, apesar do potencial de alterar os resultados encontrados.

Ressalta-se a importância de monitorar efeitos tóxicos agudos e crônicos dos LETA em diferentes organismos-teste, assim como sua representatividade ambiental, e avaliar diferentes parâmetros nos indivíduos para melhor avaliar os possíveis impactos decorrentes da disposição desses materiais no ambiente, visto que cada ambiente e forma de disposição final possuem peculiaridades que podem variar de acordo com o teste aplicado e organismo teste escolhido para o estudo.

No que se diz respeito aos usos benéficos dos LETAs, destaca-se seu reaproveitamento em obras geotécnicas, como fertilizantes e também a recirculação do material entre os processos de tratamento de água. Tais usos evidenciam a necessidade de identificação do tipo de coagulante utilizado no processo de potabilização de águas do qual o LETA está sendo estudado, pois este pode influenciar nos resultados ecotoxicológicos do LETA, como mostrado por RODGHER *et al.* (2022), que reportou ser o Al o metal que aparece em maiores quantidades em amostras consideradas tóxicas ao *Daphnia similis*.

Por fim, observa-se que os artigos publicados sobre a temática são recentes, todos posteriores à publicação da Norma Brasileira de Resíduos Sólidos que, por sua vez, classifica os LETAs como tal e não enquadra o resíduo como tóxico (ABNT, 2004). Contudo, a Norma está em Consulta Pública com propostas que alteram diversos itens, entre elas a avaliação da toxicidade, incluindo metodologias para identificar toxicidade aguda e crônica. Apesar da mudança, estes ensaios estão atrelados a Resíduos Perigosos, em que apenas Lodos de efluentes de fontes específicas são classificados como tal.

CONCLUSÕES/RECOMENDAÇÕES

Grande parte dos estudos que avaliaram a toxicidade dos LETAs em organismos-teste foram publicados posteriormente à publicação da Norma NBR (ABNT, 2004) que classifica este resíduo como não-perigoso. Entretanto, o fator toxicidade, considerando para classificar resíduos como perigosos ou não-perigosos, é uma característica que já foi observada em estudos sobre LETAs, o que pode justificar a necessidade de revisitar alguns conceitos que podem estar ultrapassados com o advento da ciência e de pesquisas sobre o tema.

Os testes de ecotoxicidade realizados em LETAs são importantes e efetivos para determinar as melhores formas de destinação final e/ou reaproveitamento do material. Observa-se que os organismos-testes escolhidos são representativos e podem mostrar resultados agudos ou crônicos, a depender do tempo de exposição ou concentração do LETA. Nota-se também que o coagulante utilizado nas etapas de tratamento de água pode



interferir nos resultados da análise, por isso é importante que nas pesquisas haja a identificação do coagulante utilizado para discutir resultados com mais embasamento científico.

Para a área de saneamento ambiental, esta temática é bastante relevante e pode ser considerada ao se discutir a proposta da NBR 10004 que se encontra em Consulta Pública. É papel do cientista argumentar e defender resultados comprovados em laboratório, auxiliando a promover e propor uma gestão de políticas públicas adequadas e eficazes para toda a sociedade.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. 2004. NBR 10004: Resíduos Sólidos - Classificação. Rio de Janeiro - RJ.
2. ALVARENGA, P. *et al.* 2018. Chemical and ecotoxicological effects of the use of drinking-water treatment residuals for the remediation of soils degraded by mining activities. DOI:10.1016/j.ecoenv.2018.05.094
3. ASHONG, G. W. *et al.* 2018. Human and ecotoxicological risk assessment of heavy metals in polymer post treatment sludge from Barekese Drinking Water Treatment Plant Kumasi. DOI:10.1016/j.toxrep.2024.03.010
4. AWWA. 1991. Alum sludge in the aquatic environment. Research Foundation and American Water Works Association.
5. BATISTA, I. F. *et al.* 2021. Potential contribution of water treatment plant (WTP) sludge to river pollution. DOI: 10.14808/sci.plena.2021.101701
6. BERNEGOSI *et al.* 2022. A Systematic review of the water treatment sludge toxicity to terrestrial and aquatic biota: state of the art and management challenges. DOI: 10.1080/10934529.2022.2060021
7. BRASIL, Lei Federal nº12.305, de 2 de agosto de 2010. Diário Oficial da União, Poder Executivo, Brasília, DF, 3 ago. 2010.
8. CHEN, T. *et al.* 2015. Combining physico-chemical analysis with a *Daphnia magna* bioassay to evaluate a recycling technology for drinking water treatment plant waste residuals. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.08.023
9. DI BERNARDO, L.; DANTAS, A. D.B.; VOLTAN, P. E. N. 2017. Métodos e Técnicas de
10. Tratamento de Água. 3ªed. LDiBe. São Paulo. Brasil
11. FERNANDEZ, M. *et al.* 2014. Evaluation of zinc oxide nanoparticle toxicity in sludge products applied to agricultural soil using multispecies soil systems. DOI: 10.1016/j.scitotenv.2014.07.085
12. FIORE, F. *et al.* 2022. Water sludge reuse as a geotechnical component in road construction: Experimental study. DOI: [10.1016/j.clet.2022.100512](https://doi.org/10.1016/j.clet.2022.100512)
13. HARFORD, A. J. *et al.* 2012. Ecotoxicology of actively treated mine waters. DOI:
14. HUSSEIN, A. M.; MAHMOUD, R. K.; SILLANPÄÄ, M.; ABDEL W.; MAHMOUD S.M. 2021. Impacts alum DWTPs sludge discharge and changes in flow regime of the Nile River on the quality of surface water and cultivated soils in Fayoum watershed, Egypt. Science of The Total Environment, 766, 144333. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.144333>
15. IBAMA. 2012. Lista Brasileira de Resíduos Sólidos.
16. MAGHSOUDI, E. *et al.* 2015. Biodegradation of multiple microcystins and cylindrospermopsin in clarifier sludge and drinking water source: Effects of particulate attached bacteria and phycoyanin. DOI: 10.1016/j.ecoenv.2015.06.001
17. MINISTÉRIO DO MEIO AMBIENTE - MMA. 2022. Plano Nacional de Resíduos Sólidos. Disponível em: <https://sinir.gov.br>
18. PRISMA Group. 2015. Principais itens para relatar revisões sistemáticas e meta-análises: a recomendação PRISMA. DOI: 10.5123/S1679-49742015000200017
19. RANJBAR, *et al.* 2017. Toxicity assessment of Tehran water treatment sludges using bioassay tests. DOI: 10.1080/15569543.2017.1312453
20. RODGHER, S. *et al.* 2022. Acute Toxicity of Leachates from Water Treatment Plants Sludge and Combinations with Soils from a Tropical Region. DOI: 10.1007/s11270-023-06080-7



21. SOTERO-SANTOS, R. B. *et al.* 2005. Evaluation of Water Treatment Sludges Toxicity Using the Daphnia Bioassay. DOI: 10.1016/j.watres.2005.06.030.
22. SOTERO-SANTOS, R. B. *et al.* 2007. Toxicity of Ferric Chloride Sludge to Aquatic Organisms. *Chemosphere*. 2007, 68, 628–636. DOI: 10.1016/j.chemosphere.2007.02.049.
23. SOUZA, A.C.Z. *et al.* 2023. Ecotoxicological aspects and environmental implications of the use of water and sewage treatment sludges. DOI: 10.1007/s13762-023-05338-1
24. URBAM, R.C. *et al.* 2019. Uso benéfico de lodo de estações de tratamento de água e de tratamento de esgoto: estado da arte. DOI: 10.4322/dae.2019.050
25. VINUTO, J. A amostragem em bola de neve na pesquisa qualitativa: um debate em aberto. *Temáticas, Campinas*, v. 22, n. 44, p. 203-220, 2014. DOI: [10.20396/tematicas.v22i44.10977](https://doi.org/10.20396/tematicas.v22i44.10977)
26. WALKER, C. H. *et al.* 2006. Principles of ecotoxicology. 3. ed. New York: CRC Press.
27. YUAN, N. *et al.* 2017. Ecotoxicological assessment of dewatered drinking water treatment residue for environmental recycling
28. ZAGATTO, P. A.; BERTOLETTI, E. 2008. Ecotoxicologia aquática: princípios e aplicações. 2. ed. São Carlos: RiMa, 486 p.