



### III- 422 - IMPACTOS AMBIENTAIS RESIDUAIS: ECOTOXICOLOGIA EM UMA ÁREA DE LIXÃO ENCERRADO NA REGIÃO SUDESTE

#### Layla Ferraz Aquino<sup>(1)</sup>

Engenheira Química pela UFRRJ. Mestre em Engenharia Ambiental pela Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ). Doutoranda em Engenharia Ambiental (UERJ) em mobilidade na Universidade de Lisboa (IST/ULisboa).

#### Louise da Cruz Felix<sup>(2)</sup>

Engenheira Cartógrafa (UERJ) e Gestora Ambiental. Mestre em Engenharia Ambiental (UERJ). Doutoranda em Engenharia Ambiental (UERJ).

#### Daniele Maia Bila<sup>(3)</sup>

Engenheira Química pela UFRRJ. Mestre e doutora em Engenharia Química pela COPPE/UFRJ. Professor Associado do Departamento de Engenharia Sanitária e do Meio Ambiente da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (DESMA/UERJ).

#### Camille Ferreira Mannarino<sup>(4)</sup>

Engenheira civil - UERJ, Mestre em Engenharia Ambiental – UERJ, Doutora em Saúde Pública e Meio Ambiente – ENSP/Fiocruz. Pesquisadora em Saúde Pública no Laboratório de Virologia Comparada e Ambiental do Instituto Oswaldo Cruz, Fiocruz.

#### Elisabeth Ritter<sup>(5)</sup>

Engenheira Civil pela Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS). Mestre em Engenharia Civil (Geotecnia) pela PUC-RJ. Doutora em Engenharia Civil (Geotecnia Ambiental) pela COPPE/ UFRJ. Professora Titular da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ).

**Endereço<sup>(1)</sup>:** Avenida Rovisco Pais, 01 - Instituto Superior Técnico/ Universidade de Lisboa - Lisboa - CEP:1049-001 - Portugal - e-mail: [laylaferrazaquino@hotmail.com](mailto:laylaferrazaquino@hotmail.com)

#### RESUMO

A disposição inadequada de resíduos sólidos no solo em áreas de lixão pode provocar mudanças na qualidade dos compartimentos ambientais e causar impactos na saúde pública. A contínua geração de lixiviado, produzido devido a percolação da água da chuva pelo maciço de resíduos segue impactando o solo e a água subterrânea mesmo após encerramento das atividades no local. As políticas públicas implementadas no país tratam a respeito do encerramento dessas áreas, mas pouco se discute sobre o monitoramento e a recuperação de locais possivelmente impactados. Amostras de lixiviado e de água subterrânea foram coletadas em 8 pontos em uma área de lixão encerrada há mais de dez anos, no estado do Rio de Janeiro. Foram realizadas a caracterização físico-química das amostras de água coletada nas três lagoas de acúmulo de lixiviado existentes no lixão e nos cinco poços instalados para o monitoramento da água subterrânea da área. Ademais, foram realizados ensaios ecotoxicológicos utilizando a bactéria *Vibrio fischeri*. Os resultados indicaram toxicidade em todas as amostras coletadas nos pontos avaliados. A lagoa de acúmulo de lixiviado 1 (L01), próxima ao maciço mais antigo, apresentou as maiores concentrações de contaminantes dentre os parâmetros analisados. Os três poços de monitoramento localizados na direção do fluxo preferencial de água subterrânea advindos dos maciços, PM2, PM3 e PM5, apresentaram os valores mais elevados de matéria orgânica e metais (Al e Mn). A presença de lixiviado nos compartimentos ambientais segue impactando a área mesmo após uma década do encerramento da operação do lixão.

**PALAVRAS-CHAVE:** Monitoramento ambiental, Lixiviado; *Vibrio fischeri*; Resíduos sólidos; Contaminação ambiental.

#### INTRODUÇÃO

A água é um dos recursos mais valiosos para a manutenção da vida, entretanto sua qualidade vem sendo afetada por eventos naturais e principalmente intervenções antropogênicas. A disposição de resíduos sólidos urbanos (RSU) no solo é uma técnica amplamente adotada em diversos países e que pode colocar a qualidade dos compartimentos ambientais em risco devido a contínua geração de lixiviado (GUPTA et al., 2023). A água subterrânea é uma importante fonte de água fresca para consumo, abastecimento de casas, indústrias e da



agricultura. Apesar de sua relevância, esse recurso é diretamente afetado quando em contato com o lixiviado proveniente da degradação de resíduos em aterros sem impermeabilização de fundação (ZHANG et al., 2023).

O contínuo desenvolvimento da indústria, a urbanização acelerada, a mudança dos padrões de consumo e o aumento populacional acarretam o incremento da geração per capita de resíduos. Mundialmente cerca de 70% de todos os RSU gerados são depositados no solo (WANG et al., 2023). No Brasil observa-se um movimento de enrijecimento das legislações, e, após a implementação do Marco Legal do Saneamento em 2020, ficou estabelecido que tanto aterros controlados, quanto lixões tenham suas operações encerradas até o final de 2024 (BRASIL, 2020). A disposição de resíduos em lixões é ilegal desde a implementação da Polícia Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) (BRASIL, 2010). Todavia encerrar esses locais de forma adequada é um processo que demanda competências técnicas e recursos financeiros, nem sempre disponíveis nos municípios de pequenos e médio porte no país.

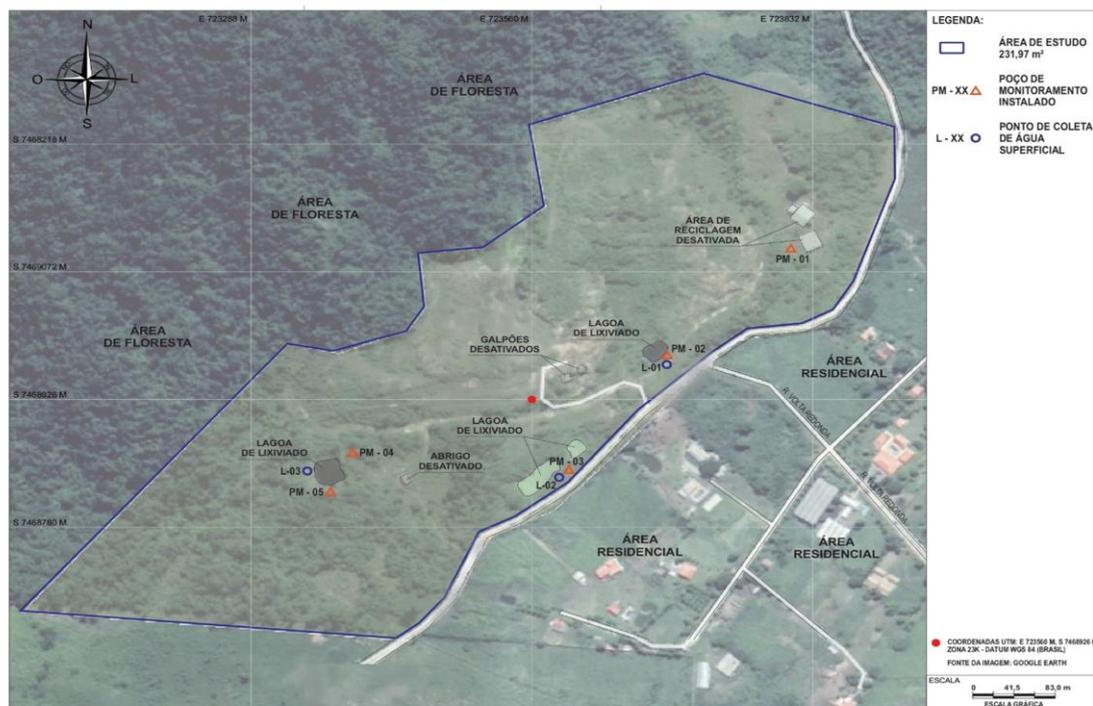
Recentemente, avaliações ambientais integradas que utilizam análises físico-químicas associadas a ensaios ecotoxicológicos são utilizadas para identificar o risco ecológico da presença de lixiviado em contato com os compartimentos ambientais. Os métodos amplamente adotados utilizam pequenos organismos modelo como bactérias, algas e micro invertebrados aquáticos, e organismos mais complexos como mexilhões, plantas e peixes (BADERNA et al., 2019).

O objetivo deste trabalho foi avaliar a qualidade das amostras de água subterrânea e superficial coletadas na área de um lixão encerrado e seus efeitos ecotoxicológicos através de ensaios conduzidos com a bactéria luminescente *Vibrio fischeri*.

## MATERIAIS E MÉTODOS

A pesquisa foi realizada em um lixão encerrado localizado na zona rural, na região metropolitana do Rio de Janeiro. A operação do lixão ocorreu oficialmente de 1985 a 2009 e de forma clandestina até 2013, quando foram encerradas as atividades no local. O lixão é constituído por dois maciços de resíduos, que recebiam diariamente cerca de 100 ton. O volume ocupado pelo material sólido é de cerca de 558.000 m<sup>3</sup> que se estende pelos 47.000 m<sup>2</sup> de área do terreno. Existem três lagoas de acúmulo de lixiviado na área, conforme pode ser observado na Figura 1. No início da pesquisa, foram instalados cinco poços de monitoramento PM1 a PM5, seguindo as orientações das normas técnicas brasileiras, para isso foi utilizado um trado manual (ABNT 2007) (de Jesus et al, 2022).

Foram coletadas amostras nos cinco poços de monitoramento instalados e nas três lagoas de acúmulo de lixiviado em campanhas trimestrais realizadas nos meses de maio/21, agosto/21 e novembro/21 (Figura 1). Os poços foram previamente esgotados com o auxílio de amostradores descartáveis de água subterrânea. No dia seguinte, após a recarga, as amostras foram coletadas com amostradores descartáveis de 1L e acondicionadas em frascos de polipropileno de 1L. As amostras de águas superficiais das 3 lagoas de lixiviado existentes L01, L02 e L03 foram coletadas com o auxílio de um recipiente de aço inox e acondicionadas em frascos de polipropileno de 1L.



**Figura 1: Imagem de satélite delimitando a área de estudo de um lixão encerrado localizado na região metropolitana no Rio de Janeiro e indicando os pontos de coleta de água subterrânea (PM1 a PM5) e superficial (L01, L02 e L03).**

Foram realizadas análises de determinação de Carbono Orgânico Dissolvido Total (COT), Demanda Química de Oxigênio (DQO), pH, Alumínio (Al) e Manganês (Mn) de acordo com Standard Methods for Examination of Water and Wastewater (APHA, 2021). Análises de outros parâmetros foram realizadas e apresentadas em pesquisas anteriores (Aquino et al., 2023 a e b).

Os testes de toxicidade com o organismo-teste *Vibrio fischeri* foram realizados utilizando o sistema Microtox (SDI, analisador Modelo 500), um fotômetro de precisão especialmente desenvolvido para realizar este bioensaio, seguindo a metodologia descrita na NBR 15411-3 (ABNT, 2021). O ensaio foi realizado em duplicata com cinco concentrações (90%, 45%, 22,5%, 11,25%, 5,625%) mais um controle para cada ponto amostral. As soluções-teste foram diluídas em NaCl 2% (m/v) que também é usado como solução-controle. O ensaio é baseado na quantificação do decréscimo de bioluminescência das bactérias em cada concentração-teste em relação ao controle. O tempo de exposição da bactéria bioluminescente com o contaminante é de 30 minutos. Após este período, o percentual de inibição é usado na construção de uma curva dose-resposta gerando o resultado em termos percentuais de Concentração de Efeito observado em 50% da população-teste utilizada (CE50%).

Os resultados de CE50% foram analisados utilizando a classificação de toxicidade em escala proposta por Bulich (1982). Nesta escala as amostras com resultados de CE50% menores do que 25% são consideradas muito tóxicas; entre 25-50, tóxicas; na faixa de 51-75%, moderadamente tóxicas e menores de 75%, pouco tóxicas. Os piores casos estão destacados em vermelho e os resultados menos significativos em lilás (BULICH, 1982).

## RESULTADOS

Os resultados da caracterização físico-química das amostras de água coletadas no lixão estão apresentados na Tabela 1. O valor de pH nas lagoas apresentou característica alcalina, enquanto os poços de monitoramento apresentaram características majoritariamente ácida. Em relação a concentração de carbono orgânico dissolvido (COT) a L01 e o PM2 apresentaram as maiores concentrações, na faixa de 145,4 a 200,1 mg.L<sup>-1</sup> e



de 56,9 a 63,1 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente. Os resultados mais elevados de DQO foram encontrados na L01 e no PM3, 527,5 a 1.097,5 mg.L<sup>-1</sup> e 302,5 mg.L<sup>-1</sup>, respectivamente.

A avaliação de metais indicou a presença de Al em maior concentração na L01, 1,7-4,6 mg.L<sup>-1</sup>, enquanto o pior caso entre os poços de monitoramento foi encontrado no PM5, 2,8-21,6 mg.L<sup>-1</sup>. Foram quantificadas concentrações de Mn nas amostras coletadas, a L01 e o PM5 apresentaram os piores cenários. As concentrações na L01 variaram de 0,3 a 1,3 mg.L<sup>-1</sup> e no PM5 entre 0,2 a 7,5 mg.L<sup>-1</sup>.

A Tabela 2 apresenta os resultados de toxicidade das amostras de água avaliadas de acordo com os valores de CE50% propostos por Bulich (1982). Na Tabela 3 estão apresentados os resultados de CE50% das amostras de água superficial e subterrâneas coletadas nas lagoas de acúmulo de lixiviado e nos poços de monitoramento do lixão encerrado para a avaliação de toxicidade por bioensaio utilizando a bactéria *Vibrio fischeri*.

**Tabela 1: Resultado da caracterização físico-química das amostras coletadas nas lagoas de acúmulo de lixiviado e poços de monitoramento da água subterrânea no lixão encerrado.**

	L01	L02	L03	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5
pH	8,2-8,7	7,3-8,6	7,4-7,6	5,5-5,9	6,0-6,3	5,7	5,9-6,7	6,3-7,3
COT (mg.L <sup>-1</sup> )	145,4-200,1	42,9-52,4	58,4-61,5	2,1-2,9	56,9-63,1	48,7	17,0-21,2	24,6-38,6
DQO (mg.L <sup>-1</sup> )	527,5-1.097,5	180,0-208,3	180,8-209,2	2,0-6,8	153,3-209,2	302,5	80,0-109,2	33,9-47,5
Al (mg.L <sup>-1</sup> )	1,7-4,6	0,6-2,5	0,5-0,6	2,9-9,6	2,5-14,5	6,15	1,7-3,5	2,8-21,6
Mn (mg.L <sup>-1</sup> )	0,3 -1,3	0,1-0,4	0,07-0,5	0,1-0,2	1,5-1,8	0,8	0,6-5,2	0,2- 7,5

**Tabela 2: Níveis de toxicidade referente ao CE50% adaptado de Bulich (1982).**

CE50% <sub>v/v</sub>	Classificação
<25	Muito tóxico
25-50	Tóxico
51-75	Moderadamente tóxico
>75	Pouco tóxico

**Tabela 3: Resultado dos ensaios de toxicidade CE50 expressos em % das amostras coletadas nas lagoas de acúmulo de lixiviado e poços de monitoramento da água subterrânea de um lixão encerrado.**

Coleta	L01	L02	L03	PM1	PM2	PM3	PM4	PM5
Mai/21	48,8	49,0	53,4	46,0	50,1	45,6	52,2	47,9
Ago/21	57,5	76,5	53,8	47,8	50,8	44,9	49,4	0,9
Nov/21	-	-	-	74,3	74,6	94,7*	78,7*	60,7

## ANÁLISE DOS RESULTADOS

As concentrações mais elevadas de contaminantes através dos parâmetros analisados nas lagoas de acúmulo de lixiviado avaliadas foram encontradas na L01, localizada próxima ao maciço 1, mais antigo. Em estudos prévios realizados na área foi identificado que o fluxo preferencial de escoamento da água subterrânea que advém do maciço 1 segue em direção aos poços PM2 e PM3. As linhas equipotenciais identificadas na região do maciço 2, seguem na direção dos poços PM4 e PM5. O fluxo de água subterrânea do lixão se encaminha na direção do condomínio residencial adjacente ao depósito de RSU, que é totalmente abastecido por soluções individuais (poços de manilha e artesianos de águas subterrâneas) (DE JESUS et al., 2022).

As concentrações mais elevadas de COT foram encontradas na L01 (145,4-200,1 mg.L<sup>-1</sup>) e no PM2 (56,9-63,1 mg.L<sup>-1</sup>), sendo que esses valores diferem do apresentado no poço controle PM1 (2,1-2,9 mg.L<sup>-1</sup>). Os valores de DQO seguiu um padrão semelhante, pois foram encontradas as concentrações mais expressivas na L01 (527,5-



1.097,5 mg.L<sup>-1</sup>) e no PM3 (302,5 mg.L<sup>-1</sup>), enquanto o PM1 (2,0-6,8 mg.L<sup>-1</sup>) não apresentou influência do fluxo de poluentes advindo do maciço 1.

A concentração de Al encontrada na L01 e em todos os poços de água subterrânea atingiu o limite máximo permitido pelas diretrizes de risco à saúde humana CONAMA 420, de 3,5 mg.L<sup>-1</sup>, em ao menos uma campanha. À exceção do PM1, todas as lagoas e poços avaliados obtiveram resultados acima do limite máximo permitido para Mn, de 0,4 mg.L<sup>-1</sup> (BRASIL, 2009). A ingestão frequente de água com elevadas concentrações de manganês e a presença deste metal no organismo pode comprometer o sistema nervoso central e levar a doenças neurodegenerativas, como Parkinson e Alzheimer (QUEIROZ et al., 2021). A exposição proveniente da ingestão de água rica em alumínio pode representar danos à saúde neurológica, sendo que este metal tem sido frequentemente associado à doença de Alzheimer (ROSALINO, 2011).

A campanha de maio de 2021 apresentou os resultados mais significativos de toxicidade para as amostras coletadas. A L01, L02 PM1, PM3 e PM5 foram classificadas como tóxicas, obtendo resultados para CE50% de 48,8%, 49,0%, 46,0%, 45,6% e 47,9%, respectivamente. Os demais pontos de coleta L03, PM2 e PM4, moderadamente tóxicos, com resultados de CE50% de 53,4%, 50,1% e 52,2%, respectivamente. O pior cenário foi apresentado no PM5, na campanha de agosto de 2021, na ocasião a amostra foi classificada como muito tóxica, CE50% de 0,9%. O PM5 apresentou os piores resultados na avaliação dos metais Al (21,6 mg.L<sup>-1</sup>) e Mn (7,5 mg.L<sup>-1</sup>); a presença desses componentes pode ter contribuído para a alta toxicidade apresentada pelas amostras investigadas deste poço. Os resultados da campanha de novembro de 2021 apresentaram toxicidade moderada para PM1, PM2 e PM5, com CE50% de 74,3%, 74,6% e 60,7%, respectivamente. Os demais poços apresentaram resultados classificados como pouco tóxicos, a CE50% para PM3 foi de 94,7% e PM4 de 78,7%. Esses valores podem estar relacionados a diluição da concentração de poluentes nas amostras de água coletadas, devido ao período de chuva mais intenso na região.

O PM1 apresenta as menores concentrações de contaminantes pela avaliação realizada para alguns parâmetros físico-químicos, todavia a avaliação de toxicidade apresentou resultados que classificam a qualidade da água como tóxica e moderadamente tóxica, com CE50% na faixa de 46,0-74,3%. A toxicidade no PM1 foi associada à presença de moradores vivendo no antigo galpão de triagem de resíduos reciclados, localizado ao lado da área onde foi instalado o poço controle (vide Figura 1). Apesar da contribuição pouco significativa de matéria orgânica apresentada neste poço, a concentração de Al avaliada no PM1 apresentou alguns resultados expressivos (2,9-9,6 mg.L<sup>-1</sup>), durante as campanhas realizadas.

A presença de populações fragilizadas que ocupam antigas áreas de disposição de resíduos no país é uma realidade que contribui potencializando a poluição dos compartimentos ambientais. Áreas de lixão encerrado seguem contribuindo para a contaminação ambiental, já que a remediação desses locais não é definida por lei.

## CONCLUSÕES

Os resultados indicaram toxicidade a bactéria *Vibrio fischeri* em todos os pontos de coleta avaliados. A L01, próxima ao maciço mais antigo, apresentou as maiores concentrações de contaminantes indicada pelos parâmetros físico-químicos analisados. Dos poços de monitoramento localizados na direção do fluxo preferencial de água subterrânea advindos dos maciços, PM2, PM3 e PM5 apresentaram os resultados mais elevados de matéria orgânica e metais (Al e Mn). A presença de lixiviado nos compartimentos ambientais segue impactando a área mesmo após uma década do encerramento da operação do lixão.

O Novo Marco Legal do Saneamento estabelece que áreas de disposição final de RSU tenham suas atividades descontinuadas, contudo nada ficou estabelecido a respeito da remediação dos passivos ambientais gerados. A presença de expressivos montantes de lixo no solo e a contínua geração de lixiviado seguem impactando a qualidade das águas superficiais e subterrâneas desses locais por muitos anos. O total abandono pelos antigos órgãos de atuação dessas áreas abre precedentes para a invasão e ocupação de locais impactados por comunidades mais vulneráveis.

A avaliação ambiental que associe a caracterização físico-química e a avaliação da toxicidade por meio de bioensaios ganha cada vez mais relevância, pois é capaz de identificar sinergias entre compostos presentes em diferentes matrizes. A avaliação de forma isolada da qualidade química da água em muitos casos pode tender



SIMPÓSIO LUSO-BRASILEIRO  
DE ENGENHARIA SANITÁRIA  
E AMBIENTAL



para a avaliação favorável destes compartimentos ambientais, estando dentro dos parâmetros legais aceitáveis. A ampliação dessa metodologia pode ajudar a reduzir avaliações que subestimem os efeitos ecotoxicológicos da combinação de substâncias químicas diversas nas águas subterrâneas aportadas de fontes de lixiviados de RSU.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT NBR 15469, 2021. Ecotoxicologia - Coleta, Preservação e Preparo de Amostras.
2. ABNT. NBR 15411-3, 2021. Ecotoxicologia aquática - Efeito inibitório sobre a bioluminescência de *Vibrio fischeri* - Parte 3: Método utilizando bactérias liofilizadas.
3. ABNT. ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICA. NBR 15495-1: Poços de monitoramento de águas subterrâneas de aquíferos granulares. Parte 1 – Projetos e construção. Rio de Janeiro: ABNT, 2007. 25p.
4. AQUINO, L. F.; Jesus, A. O. C.; SAGGIORO, E.M.; MANNARINO, C. F.; RITTER, E.. Lixão encerrado há uma década como fonte de contaminação das águas e solo. In: *Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, 2023, Belo Horizonte. 32º Congresso da ABES, 2023a.
5. AQUINO, L. F.; MANNARINO, C. F.; RITTER, E.. Monitoramento de Águas Superficiais e Subterrâneas de um Lixão Desativado. In: Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2023, Salvador. X Congresso Brasileiro de Geotecnia Ambiental, 2023b.
6. BADERNA, Diego; CALONI, Francesca; BENFENATI, Emilio. Investigating landfill leachate toxicity in vitro: A review of cell models and endpoints. *Environment International*, v. 122, p. 21-30, 2019.
7. BULICH, Anthony A. A practical and reliable method for monitoring the toxicity of aquatic samples. 1982.
8. BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente -CONAMA. Resolução no420, de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. *Diário Oficial da República Federativa do Brasil*, Poder Executivo, Brasília, DF, 30 dez. 2009. Seção 1, 20p.
9. BRASIL. Atualiza o marco legal do saneamento básico e altera a Lei nº 9.984, de 17 de julho de 2000, para atribuir à Agência Nacional de Águas e Saneamento Básico (ANA) competência para editar normas de referência sobre o serviço de saneamento, a Lei nº 10.768, de 19 de novembro de 2003, para alterar o nome e as atribuições do cargo de Especialista em Recursos Hídricos, a Lei nº 11.107, de 6 de abril de 2005, para vedar a prestação por contrato de programa dos serviços públicos de que trata o art. 175 da Constituição Federal, a Lei nº 11.445, de 5 de janeiro de 2007, para aprimorar as condições estruturais do saneamento básico no País, a Lei nº 12.305, de 2 de agosto de 2010, para tratar dos prazos para a disposição final ambientalmente adequada dos rejeitos, a Lei nº 13.089, de 12 de janeiro de 2015 (Estatuto da Metrópole), para estender seu âmbito de aplicação às microrregiões, e a Lei nº 13.529, de 4 de dezembro de 2017, para autorizar a União a participar de fundo com a finalidade exclusiva de financiar serviços técnicos especializados. In *Diário Oficial da União* no 14.026, de 15 de julho de 2020. BRASIL. Dispõe sobre os procedimentos de controle e de vigilância da qualidade da água para consumo humano e seu padrão de potabilidade. In *Diário Oficial da União* no 888, de 4 de maio de 2021.
10. DE JESUS, A. O. C., de Farias Araujo, G., Saggioro, E. M., Mannarino, C. F., & Ritter, E. (2022). Contamination assessment of soil and groundwater of a deactivated dumpsite in Brazil. *Environmental Monitoring and Assessment*, 194(3), 216.
11. GUPTA, Shilpi; RAJU, Nandimandalam Janardhana. Potential environmental pollution study by leachate generation and health risk assessment in the vicinity of bandhwari landfill disposal site, National Capital Region, India. *Groundwater for Sustainable Development*, v. 23, p. 101032, 2023.
12. QUEIROZ, Hermano M., et al. Manganese: The overlooked contaminant in the world largest mine tailings dam collapse. *Environment international*, 2021, 146: 106284.
13. ROSALINO, M. R. (2011). Potenciais efeitos da presença de alumínio na água de consumo humano. MSc *Postgraduate Program in Environmental energy*, New University of Lisbon, Faculty of Science and Technology: Lisbon, Portugal.
14. WANG, Yaohui et al. Health risk cause of water around landfill in hilly area and prevention and control countermeasures. *Journal of Environmental Management*, v. 346, p. 119019, 2023.
15. ZHANG, Zhicheng et al. Insight into the impact of industrial waste co-disposal with MSW on groundwater contamination at the open solid waste dumping sites. *Chemosphere*, v. 344, p. 140429, 2023.