

IMPACTOS DO LIXIVIADO DE ATERROS DESATIVADOS NA QUALIDADE DAS ÁGUAS SUBTERRÂNEAS E POSSÍVEIS ESTRATÉGIAS DE REMEDIAÇÃO

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/conresol.8.25.XI-005>

Ana Gabriella dos Santos Batista de Menezes*, Eduardo Antonio Maia Lins, Lilia Albuquerque da Silva, Lara Tainã Souza Gomes, Mário Gomes da Silva Júnior

* Geóloga, formada na Universidade Federal de Pernambuco (UFPE) no ano de 2015. Doutora em Geociências na área de Hidrogeologia (UFPE) no ano de 2022. Email: anaghaby20@hotmail.com

RESUMO

Este estudo avaliou os impactos da disposição inadequada de resíduos sólidos sobre a qualidade da água subterrânea no entorno do Aterro Encerrado da Muribeca, em Jaboatão dos Guararapes – PE. Foram realizadas análises físico-químicas do lixiviado e da água de um poço artesiano próximo à área de disposição, cujos resultados indicaram alterações significativas nos parâmetros de potabilidade, com destaque para manganês, turbidez, cor aparente e pH. A partir desses dados, foi aplicada uma metodologia de avaliação multicritério, conforme a ABNT NBR 15515-3:2007, para subsidiar a escolha de tecnologias de remediação. As alternativas analisadas foram: Pump and Treat, Barreiras Reativas Permeáveis (BRPs), Tratamento Biológico In Situ e Fitorremediação. A técnica das BRPs foi identificada como a mais adequada, considerando eficiência, aplicabilidade e viabilidade econômica. Conclui-se que a combinação de BRPs com estratégias complementares pode promover a recuperação gradual da qualidade da água subterrânea, reduzindo os riscos ambientais associados à contaminação por lixiviado.

PALAVRAS-CHAVE: Lixiviado, Lençol Freático, Aterro Encerrado, Remediação, Avaliação multicritério.

ABSTRACT

This study assessed the impacts of improper solid waste disposal on the groundwater quality surrounding the Muribeca Closed Landfill, located in Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco, Brazil. Physicochemical analyses were conducted on both leachate and water from an artesian well near the disposal area. The results revealed significant deviations from potable water standards, particularly for manganese, turbidity, apparent color, and pH. Based on the findings, a multicriteria evaluation method was applied, following the ABNT NBR 15515-3:2007 guidelines, to support the selection of appropriate remediation technologies. The alternatives considered were Pump and Treat, Permeable Reactive Barriers (PRBs), In Situ Bioremediation, and Phytoremediation. PRBs emerged as the most suitable option due to their efficiency, feasibility, and adaptability to the local context. The study concludes that integrating PRBs with complementary strategies can promote the gradual recovery of groundwater quality and reduce environmental risks associated with leachate contamination.

KEY WORDS: Leachate, Water Balance, Closed Landfill, Remediation, Multicriteria Assessment.

INTRODUÇÃO

A contaminação das águas subterrâneas por lixiviados provenientes de aterros sanitários desativados representa um desafio ambiental significativo, sobretudo em áreas onde a disposição inadequada de resíduos sólidos compromete a qualidade dos aquíferos. O lixiviado, líquido originado da decomposição de resíduos orgânicos e da infiltração de água da chuva, possui composição complexa, contendo metais pesados, compostos orgânicos e outros contaminantes que podem persistir no ambiente por décadas após o encerramento das atividades do aterro, dificultando a recuperação dos recursos hídricos subterrâneos (CHRISTENSEN *et al.*, 2001; KJELDSEN *et al.*, 2002).

Os impactos causados por esses contaminantes incluem a acidificação da água, aumento da turbidez e elevação das concentrações de elementos como manganês, ferro e cromo, comprometendo sua potabilidade e restringindo seu uso para atividades domésticas, agrícolas e industriais (SLACK; GRONOW; VOULVOULIS, 2005). A infiltração contínua do lixiviado pelo solo, sobretudo em áreas com lençol freático raso ou com baixa capacidade de retenção, potencializa o risco de contaminação, exigindo a adoção de estratégias de remediação e controle da pluma de poluição.

Estudos como os de Mondelli, Giacheti e Hamada (2016) e Madeira (2020) demonstram que esses contaminantes podem permanecer ativos no ambiente por décadas, mesmo após a desativação do aterro, dificultando a recuperação natural dos aquíferos e exigindo medidas corretivas de longo prazo. A infiltração contínua do lixiviado no solo pode provocar a acidificação do aquífero, aumento da turbidez e da condutividade elétrica da água, além da elevação das concentrações de metais como manganês, ferro e cromo, comprometendo sua potabilidade e restringindo seu uso para abastecimento humano, irrigação ou fins industriais.

A pesquisa de Costa, Saldanha e Monte (2020) destaca que a presença desses contaminantes está intimamente associada à percolação do lixiviado em solos com baixa capacidade de retenção ou em áreas com lençol freático raso, o que amplia o risco de contaminação da água subterrânea. Essa realidade reforça a necessidade da adoção de estratégias eficazes de remediação e contenção da pluma contaminante. Entre as alternativas tecnológicas mais promissoras destacam-se as barreiras reativas permeáveis (BRPs), estruturas que utilizam materiais adsorventes e/ou redutores para interceptar e imobilizar poluentes durante seu deslocamento subterrâneo (Ribeiro *et al.*, 2019). O tratamento biológico *in situ*, baseado na atividade de microrganismos capazes de degradar compostos orgânicos presentes no lixiviado, também tem se mostrado uma abordagem viável e sustentável para promover a recuperação gradual do aquífero (Pivello & Lobo, 2017). Outra técnica amplamente empregada é o sistema Pump and Treat, que consiste na extração da água contaminada por bombeamento, seguida de tratamento físico-químico e/ou biológico antes de sua reintrodução ou descarte seguro (Gerland & Mosher, 1975).

Diante desse contexto, o presente estudo tem como objetivo analisar os impactos da contaminação da água subterrânea em uma área de aterro controlado desativado, caracterizando os principais poluentes presentes e discutindo as estratégias de remediação ambiental mais adequadas ao cenário identificado. A pesquisa busca contribuir para a compreensão dos processos de degradação ambiental associados a antigos sistemas de disposição de resíduos, bem como para a proposição de soluções técnicas voltadas à mitigação dos danos e à reabilitação dos recursos hídricos subterrâneos.

METODOLOGIA

Este estudo foi conduzido com o objetivo de avaliar a contaminação da água subterrânea em um aquífero localizado a jusante de um aterro controlado desativado e propor estratégias de remediação para minimizar seus impactos ambientais. A metodologia adotada seguiu protocolos estabelecidos por normativas nacionais e internacionais de qualidade da água (CETESB, 2024; APHA, 2017), garantindo a representatividade e confiabilidade dos resultados obtidos. A pesquisa foi realizada no Aterro da Muribeca, localizado na cidade de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco (Figura 1). A caracterização do local considerou fatores como a permeabilidade do solo, a profundidade do lençol freático e a presença de sistemas de drenagem para captação de lixiviado. Para compreender a dinâmica da pluma de contaminação, foram analisados dados geológicos e hidrológicos da região, conforme metodologia descrita por Mondelli, Giacheti e Hamada (2016).



Figura 1 - Localização do Aterro Encerrado da Muribeca. Fonte: Google Earth (2025).

- Coleta e Parâmetros

A coleta das amostras de água subterrânea foi realizada utilizando um coletor tipo caneca, um método amplamente empregado em estudos de contaminação hídrica (Costa, Saldanha & Monte, 2020). Para garantir a precisão dos resultados, os frascos utilizados foram previamente descontaminados com ácido nítrico diluído e lavados com água deionizada, seguindo as recomendações da CETESB (2024). As amostras foram transportadas em caixas térmicas com gelo para evitar alterações nos parâmetros analisados, garantindo a estabilidade dos compostos químicos presentes.

Os parâmetros selecionados para análise foram escolhidos com base na literatura científica e nas diretrizes da legislação ambiental vigente. Os seguintes compostos foram avaliados: metais pesados, como cromo e manganês, devido ao seu potencial tóxico e persistência no meio hídrico (Mondelli, Giacheti & Hamada, 2016); e parâmetros físico-químicos, incluindo turbidez, cor, pH e nitrogênio amoniacal, amplamente utilizados como indicadores da presença de matéria orgânica e substâncias dissolvidas na água subterrânea (Costa, Saldanha & Monte, 2020).

- Método de Escolha do Processo de Remediação

A escolha de um processo de remediação eficaz para áreas com contaminação em aquíferos deve ser conduzida de forma sistemática, multidisciplinar e fundamentada em normas técnicas. De acordo com a ABNT NBR 16209:2013, a tomada de decisão foi inserida no contexto do gerenciamento de áreas contaminadas, sendo precedida por etapas de investigação confirmatória e detalhada, que permitam conhecer a natureza, extensão e riscos associados à contaminação.

A tabela de avaliação ponderada das tecnologias de remediação utiliza uma escala adimensional baseada em critérios técnicos e operacionais. Cada tecnologia foi pontuada de 1 (muito ruim) a 5 (excelente) em relação a cada critério estabelecido, de acordo com dados do estudo de caso e literatura técnica. Os critérios avaliados incluem: Eficiência de Remoção, Custo de Implantação, Custo de Operação, Aplicabilidade ao Aquífero, Tempo de Remediação e Complexidade Técnica.

Os pesos atribuídos a cada critério refletem sua importância relativa no contexto da contaminação analisada, totalizando 100% (ou 1,0). A pontuação final de cada alternativa representa a soma ponderada dos desempenhos por critério e não possui unidade física associada, sendo utilizada exclusivamente para fins de comparação entre alternativas e apoio à tomada de decisão. Este procedimento está em conformidade com a ABNT NBR 15515-3:2007, que recomenda o uso de métodos multicritério para avaliação técnica e econômica de soluções de remediação em áreas contaminadas.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

- Análise da Qualidade da Água

Os resultados obtidos na análise do poço artesiano localizado a jusante do Aterro Controlado da Muribeca indicam um cenário de possível contaminação da água subterrânea por lixiviado, caracterizado pela alteração significativa de parâmetros físico-químicos importantes para a definição da potabilidade da água. As análises laboratoriais revelaram que quatro indicadores — manganês, turbidez, cor aparente e pH — apresentaram valores superiores aos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, evidenciando risco à saúde humana e ao meio ambiente.

O parâmetro manganês apresentou valor de 0,45 mg/L, ultrapassando em mais de quatro vezes o valor máximo permitido de 0,10 mg/L. A presença deste metal é típica em lixiviados, sobretudo em ambientes anaeróbios, como apontado por Kjeldsen *et al.* (2002), e sua mobilidade iônica o torna um contaminante de fácil transporte no subsolo. Além disso, em meio ácido, o manganês tende a permanecer dissolvido por mais tempo, ampliando sua capacidade de atingir os aquíferos. Segundo Slack, Gronow e Voulvoulis (2005), esse tipo de contaminação é recorrente em aterros mal monitorados e pode comprometer tanto a estética quanto a segurança sanitária da água.

A cor aparente da água do poço foi outro parâmetro crítico, com valor medido de 253 UH — 17 vezes superior ao limite legal de 15 UH. Essa coloração intensa pode estar relacionada à presença de ácidos húmicos e fúlvicos oriundos da matéria orgânica em decomposição, bem como à presença de metais como ferro e manganês, que conferem tons escuros à água. Conforme Christensen *et al.* (2001), a cor elevada do lixiviado e das águas impactadas está frequentemente associada à fração orgânica complexa do efluente, que não é facilmente removida por filtração natural no solo.

A turbidez observada foi de 71,54 NTU, muito acima do padrão máximo permitido de 5,0 NTU. Esse resultado sugere uma elevada concentração de sólidos em suspensão e colóides orgânicos e metálicos, indicando percolação de partículas do lixiviado através do solo até o aquífero. A elevada turbidez compromete não apenas a estética da água, mas também interfere na eficácia de desinfecção e pode proteger microrganismos patogênicos contra agentes sanitizantes, conforme apontado pela CETESB (2002).

Outro ponto crítico foi o valor do pH da água do poço, registrado em 5,56, abaixo do intervalo legal de 6,0 a 9,5, conforme Figura 2. O pH ácido pode ter origem na infiltração de gases produzidos durante a decomposição anaeróbia dos resíduos, como o dióxido de carbono (CO_2), que, ao se dissolver na água, forma ácido carbônico. Sperling (1996) explica que a acidez da água subterrânea em áreas próximas a aterros é um indicativo direto da presença de gás efluente ou compostos orgânicos não estabilizados. Além disso, valores de pH abaixo do ideal favorecem a solubilização de metais pesados, potencializando os efeitos tóxicos da contaminação.

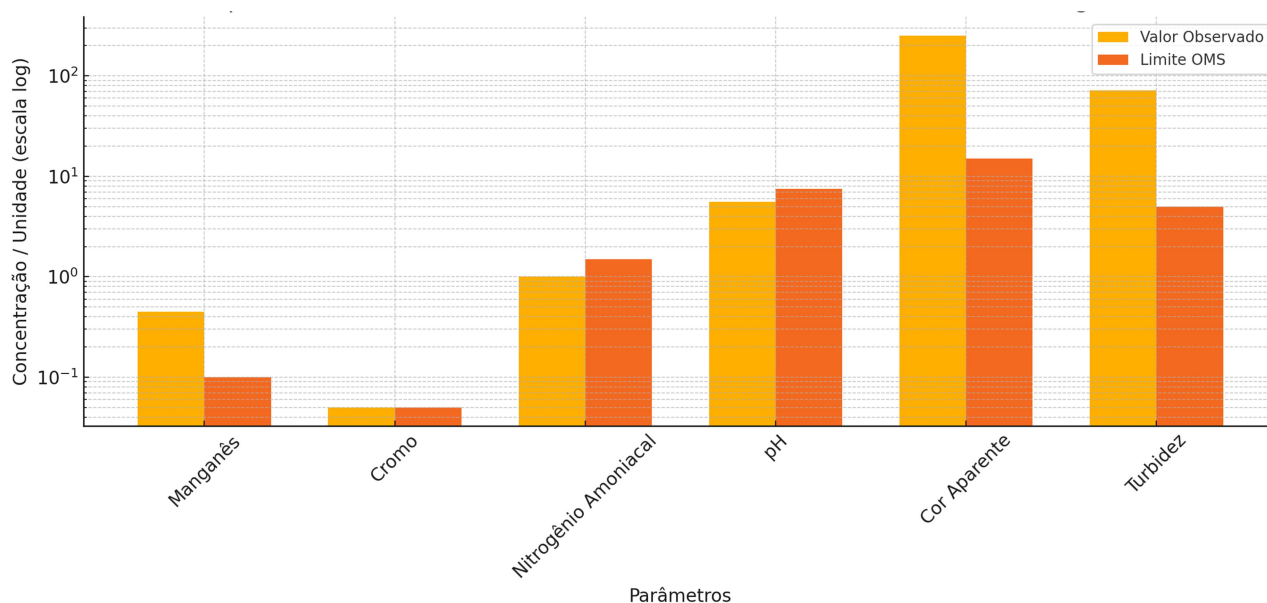


Figura 2. Comparativo Entre Valores Observados E Limites Da OMS (2021) - Escala Logarítmica. Fonte: Os Autores (2025).

Por outro lado, alguns parâmetros se mantiveram dentro dos limites legais. O cromo apresentou concentração de 0,05 mg/L, exatamente no limite estabelecido pela Portaria, o que não permite afirmar com segurança ausência de risco. Como destaca Harmsen (1983), o cromo hexavalente, mesmo em baixas concentrações, pode apresentar efeitos carcinogênicos, o que reforça a necessidade de monitoramento específico da forma química presente. O nitrogênio amoniacal apresentou concentração de 1,0 mg/L, abaixo do limite de 1,5 mg/L. No entanto, sua presença elevada no lixiviado (até 2.075 mg/L) sugere que parte do composto pode ter se transformado em nitrato por processos de nitrificação, comuns em solos bem drenados e oxigenados, como os de textura arenosa — conforme descrito por Bhatt *et al.* (2017).

A comparação entre os valores observados no lixiviado e os desvios nos parâmetros da água do poço permite inferir a existência de uma conexão entre a célula de disposição de resíduos e o aquífero. A percolação do lixiviado, favorecida pela permeabilidade do solo e pela ausência de barreiras impermeabilizantes efetivas, representa uma das principais vias de contaminação da água subterrânea em aterros antigos, como já destacado por Gerland e Mosher (1975). Além disso, Christensen *et al.* (2001) argumentam que a pluma de contaminação gerada pelo lixiviado pode se manter ativa por décadas, mesmo após a desativação do aterro, exigindo estratégias complexas e custosas de remediação.

- Escolha do Processo de Remediação

A Tabela 1 apresenta os resultados da avaliação ponderada de alternativas de remediação aplicadas ao caso do Aterro da Muribeca, conforme os critérios definidos pela ABNT NBR 15515-3:2007.

Tabela 1: Resultados da avaliação ponderada de alternativas de remediação.

	Eficiência de Remoção	Custo de Implantação	Custo de Operação	Aplicabilidade ao Aquífero	Tempo de Remediação	Complexidade Técnica	Pontuação Final
BRPs	1	0,45	0,6	0,8	0,45	0,3	3,6
Pump and Treat	1,25	0,3	0,3	1	0,3	0,4	3,55
Bioremediação In Situ	0,75	0,6	0,75	0,6	0,6	0,2	3,5
Fitorremediação	0,5	0,75	0,75	0,4	0,75	0,1	3,25

Fonte: Os Autores (2025).

A melhor pontuação foi obtida pelas BRPs (3,60 pontos). Esta técnica destaca-se pela alta eficiência na retenção de metais pesados e compostos orgânicos, baixa necessidade de manutenção e boa compatibilidade com aquíferos rasos e solos arenosos, como os observados na área de estudo. O custo inicial de instalação é moderado, mas é compensado pela operação passiva e pelo tempo relativamente curto necessário para estabilização da pluma, conforme descrito por Ribeiro *et al.* (2019).

O sistema Pump and Treat, tradicionalmente utilizado em remediações hidráulicas, obteve pontuação ligeiramente inferior (3,55 pontos). Sua principal vantagem está na eficiência imediata de extração e tratamento da água contaminada, sendo especialmente eficaz em situações em que os contaminantes (ex: manganês, ferro e cromo) já atingiram concentrações elevadas no aquífero. No entanto, o alto custo de implantação e operação contínua, aliado à necessidade de infraestrutura e energia, compromete sua viabilidade econômica em médio e longo prazos (Gerland; Mosher, 1975).

A bioremediação in situ alcançou 3,50 pontos, posicionando-se como uma alternativa economicamente atraente e ambientalmente sustentável. Esta técnica apresenta excelente desempenho em áreas com predominância de compostos orgânicos biodegradáveis, como matéria orgânica dissolvida e amônia. No entanto, sua eficácia está condicionada a fatores ambientais, como pH, presença de oxigênio e temperatura, o que pode limitar sua aplicação em ambientes ácidos ou anaeróbios, como os observados no local impactado (Pivello; Lobo, 2017).

Por fim, a fitorremediação, embora apresente baixo custo e simplicidade técnica, foi a alternativa com menor pontuação (3,25 pontos). Esta técnica é mais apropriada para áreas superficiais e de recarga, com baixa carga contaminante, sendo pouco eficaz para plumas profundas ou com altos teores de metais. Ainda assim, pode ser considerada como técnica complementar, atuando na contenção superficial e na recuperação da vegetação da área degradada (Moody *et al.*, 2017).

Dessa forma, os resultados da avaliação apontam que a combinação de BRPs como técnica principal, associada à bioremediação e fitorremediação como estratégias complementares, configura uma solução eficaz e equilibrada para contenção e mitigação da contaminação da água subterrânea na área de estudo. Essa abordagem integrada permite aliar eficiência técnica, sustentabilidade e viabilidade econômica, em consonância com os princípios da gestão ambiental e com os requisitos estabelecidos nas normas da ABNT.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo evidenciou a existência de uma relação direta entre a disposição inadequada de resíduos no Aterro Controlado da Muribeca e a contaminação da água subterrânea no entorno, em especial do poço artesiano localizado a jusante da célula de resíduos. Os parâmetros físico-químicos analisados demonstraram inconformidades em relação aos limites estabelecidos pela Portaria GM/MS nº 888/2021, com destaque para a elevação das concentrações de manganês, a alta turbidez, a acidez (pH inferior ao ideal) e a cor aparente acentuada, características compatíveis com a percolação de lixiviado através do solo.

A caracterização do lixiviado confirmou a presença de carga orgânica e inorgânica significativa, bem como metais pesados em concentrações elevadas, sugerindo que o material residual em decomposição continua exercendo pressão sobre o sistema hidrogeológico, mesmo após a desativação do aterro. Tal condição é agravada pela possível ausência de barreira de base ou por falhas em sua integridade, favorecendo a migração vertical e horizontal dos contaminantes.

Diante da complexidade do cenário, foi realizada uma avaliação técnica e ponderada de quatro tecnologias de remediação: Pump and Treat, Barreiras Reativas Permeáveis (BRPs), Tratamento Biológico In Situ e Fitorremediação.

A análise multicritério, fundamentada na ABNT NBR 15515-3:2007, indicou que as BRPs representam a melhor alternativa técnica, conciliando eficiência na retenção de metais e compostos orgânicos com viabilidade econômica e baixa manutenção. O sistema Pump and Treat, embora altamente eficaz, apresenta custos operacionais elevados, enquanto a bioremediação mostrou-se promissora para a degradação de compostos orgânicos, desde que o meio seja adequadamente caracterizado. A fitorremediação, embora com desempenho limitado para plumas profundas, pode ser considerada como técnica complementar.

Recomenda-se, portanto, a adoção de um plano de remediação integrado, combinando BRPs como solução de base, associadas à bioremediação in situ em áreas com alta carga orgânica e à fitorremediação nas zonas de recarga e entorno superficial. Essa abordagem permite maior cobertura espacial, reduz impacto financeiro e promove a recuperação gradual do aquífero afetado. Além disso, sugere-se o estabelecimento de um programa de monitoramento contínuo da qualidade da água subterrânea, com análise periódica de metais, pH, turbidez, compostos orgânicos e parâmetros microbiológicos, em consonância com as diretrizes da ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017 e dos órgãos ambientais competentes.

Por fim, ressalta-se a importância da elaboração de políticas públicas voltadas à recuperação de áreas impactadas por antigos aterros, com incentivo à pesquisa, ao uso de tecnologias sustentáveis e à requalificação ambiental de zonas degradadas, especialmente em áreas urbanas densamente povoadas como Jabotão dos Guararapes. A experiência apresentada neste estudo pode servir como referência técnica para a remediação de outros sítios contaminados por lixiviado em cenários semelhantes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. ABNT. NBR 16209:2013. **Investigação confirmatória de passivos ambientais em áreas com potencial de contaminação.**
2. ABNT. NBR 15515-3:2007. **Áreas contaminadas – Parte 3: Procedimentos para remediação de áreas contaminadas.**
3. ABNT. NBR 15515-1:2007. **Procedimentos para investigação de passivos ambientais.**
4. APHA - American Public Health Association. (2017). **Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater.** 23ª edição, Washington, D.C.
5. BRASIL. Ministério da Saúde. **Portaria GM/MS nº 888, de 4 de maio de 2021.**
6. CETESB - Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. (2024). **Guia de Coleta e Conservação de Amostras de Água.** São Paulo, SP.
7. Christensen, T. H. et al. Biogeochemistry of landfill leachate plumes. **Environmental Science & Technology**, 2001.
8. Costa, R. S., Saldanha, D. L., & Monte, M. B. (2020). A sazonalidade de contaminantes em águas subterrâneas e superficiais no entorno de um aterro sanitário na região amazônica. **Revista Ibero-Americana de Ciências Ambientais** 11(6):371-382. DOI:10.6008/CBPC2179-6858.2020.006.0030
9. Gerland, H. E., & Mosher, J. J. (1975). Groundwater Contamination: Prevention and Remediation. **Environmental Science & Technology**, 9(3), 241-246.
10. Kjeldsen, P. et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, 2002.
11. Madeira, M. F. (2020). Contaminação de águas subterrâneas por lixiviado de aterros desativados: estudo de caso no aterro sanitário de Itabira, MG. **Revista Brasileira de Geociências**, 50(2), 89-104.
12. Mondelli, G., Giacheti, H. L., & Hamada, J. (2016). Monitoramento da qualidade das águas subterrâneas no entorno de aterros sanitários: estudo de caso em Bauru, SP. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, 21(3), 445-460.
13. Pivello, V. R., & Lobo, P. C. (2017). Biorremediação de águas subterrâneas contaminadas: Aplicações e desafios. **Revista Brasileira de Engenharia Ambiental**, 11(2), 210-225.
14. Ribeiro, A. P., Souza, A. C., & Almeida, J. P. (2019). Eficiência de barreiras reativas permeáveis na remoção de metais pesados em águas subterrâneas contaminadas. **Journal of Environmental Science**, 45(1), 112-125.
15. Slack, R. J.; Gronow, J. R.; Voulvoulis, N. Household hazardous waste in municipal landfills: Contaminants in leachate. **Science of The Total Environment**, 2005.
16. Sperling, M. V. **Introdução à qualidade das águas e ao tratamento de esgotos.** Belo Horizonte: UFMG, 1996.
17. Pivello, V. R.; Lobo, M. S. Bioremediação in situ de áreas contaminadas: revisão e perspectivas. **Revista Ambiente & Água**, 2017.