

DIAGNÓSTICO DA MATURAÇÃO DO CHORUME POR INDICADORES FÍSICO-QUÍMICOS E PARÂMETROS CRÍTICOS: ESTUDO DE CASO NO ATERRO DA MURIBECA, PE

DOI: <http://dx.doi.org/10.55449/congea.16.25.III-026>

Eduardo Antonio Maia Lins*, Cecília Maria Mota Silva Lins, Alessandra Lee Barbosa Firmo, José Fernando Thomé Jucá, Letícia Cavalcante de Lima Galindo

* Instituto Federal de Pernambuco, Universidade Católica de Pernambuco, Agência Estadual de Meio Ambiente de Pernambuco (CPRH); E-mail: eduardomaialins@gmail.com

RESUMO

Este estudo apresenta um diagnóstico detalhado do lixiviado gerado no Aterro Encerrado da Muribeca, localizado em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco (PE), com ênfase em indicadores físico-químicos e parâmetros críticos. Foram realizadas seis campanhas de monitoramento ao longo de dois anos, com análises de DBOs, DQO, pH e nitrogênio amoniacal, representativos do processo de estabilização do lixiviado, não incluindo análises de metais ou sólidos totais nesta etapa. Os resultados evidenciam uma transição do lixiviado para a fase estabilizada, caracterizada pela redução expressiva da DBO₅, baixa razão DBO₅/DQO e acúmulo significativo de nitrogênio amoniacal. A análise multivariada (correlação de Spearman e PCA) confirmou a predominância de compostos refratários e a complexidade química persistente do chorume, mesmo após mais de uma década de encerramento do aterro. Esses achados indicam a necessidade de tecnologias de tratamento avançadas e multietapas, como processos físico-químicos combinados a sistemas biológicos de alta eficiência. O estudo reforça a importância do monitoramento contínuo de aterros encerrados e contribui para o desenvolvimento de estratégias de reabilitação ambiental e gestão de lixiviados complexos.

PALAVRAS-CHAVE: lixiviado, aterro de resíduos, estabilização do Chorume, análise multivariada.

INTRODUÇÃO

A gestão dos resíduos sólidos urbanos (RSU) permanece como um dos principais desafios ambientais enfrentados pelos municípios brasileiros, sobretudo no que se refere ao tratamento e à disposição final ambientalmente segura. Entre os diversos subprodutos gerados nos aterros sanitários, destaca-se o chorume, um lixiviado líquido altamente poluente cuja composição é notoriamente complexa e variável, apresentando elevadas concentrações de matéria orgânica, compostos nitrogenados, metais pesados, fenóis, ácidos húmicos e fúlvicos, além de patógenos e contaminantes emergentes (Lins, 2003; Renou et al., 2008; Oliveira et al., 2022).

A composição do chorume evolui ao longo do tempo, permitindo classificá-lo em três estágios principais: jovem, intermediário e estabilizado. Chorumes jovens caracterizam-se por alta DBOs, razão DBOs/DQO superior a 0,5, pH ácido e predominância de compostos biodegradáveis. Em contraste, lixiviados estabilizados apresentam baixa DBOs, pH próximo da neutralidade, elevadas concentrações de nitrogênio amoniacal e predominância de compostos refratários (Kjeldsen et al., 2002; Silva et al., 2021). Compreender essa dinâmica é fundamental para o correto dimensionamento e a escolha de tecnologias de tratamento adequadas.

No Brasil, a pesquisa científica sobre o comportamento físico-químico e microbiológico do chorume tem avançado, destacando-se pela busca de soluções integradas para o seu manejo. Lins (2003) introduziu a capacidade de campo como ferramenta para estimar volumes de lixiviado em aterros, enquanto estudos posteriores monitoraram a eficiência de lagoas de estabilização (Lins et al., 2005) e propuseram melhorias em sistemas de tratamento, reforçando a necessidade de intervenções tecnológicas contínuas (Lins; Purificação; Jucá, 2004).

Pesquisas mais recentes, como as de Ribeiro et al. (2019) e Oliveira et al. (2022), aprofundaram a análise de parâmetros-chave — pH, condutividade, DQO, nitrogênio amoniacal, metais e sólidos totais —, utilizando correlações estatísticas e análises multivariadas para classificar o estágio de maturação e a toxicidade do efluente. Essas abordagens têm consolidado indicadores como a razão DBOs/DQO, a turbidez e a concentração de íons inorgânicos como ferramentas diagnósticas robustas.

Diante desse cenário, o presente estudo tem como objetivo diagnosticar o estágio de maturação do lixiviado do Aterro Encerrado da Muribeca, localizado em Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco (PE), por meio da análise integrada de parâmetros físico-químicos críticos, como DBO, DQO, Nitrogênio Amoniacal. A pesquisa busca contribuir para a compreensão do comportamento de lixiviados em aterros desativados, subsidiando o desenvolvimento de tecnologias avançadas de tratamento e estratégias de monitoramento ambiental.

METODOLOGIA

- Localização

O Aterro da Muribeca está localizado no município de Jaboatão dos Guararapes, Pernambuco (PE), a cerca de 20 km do Recife, e foi o principal destino dos resíduos sólidos urbanos da Região Metropolitana do Recife durante mais de duas décadas, de 1985 a 2007. Com uma área aproximada de 64 hectares, o aterro operou inicialmente em regime de aterro controlado, sem sistemas completos de impermeabilização basal, evoluindo posteriormente para soluções de maior controle ambiental. Após o encerramento oficial, em 2007, o aterro manteve a geração de lixiviado e a operação de lagoas de estabilização para tratamento preliminar.

A escolha do Aterro da Muribeca como objeto deste estudo se justifica pela sua relevância histórica e ambiental, pelo tempo de encerramento e pelo passivo associado, oferecendo uma oportunidade única para analisar a evolução do lixiviado em um aterro encerrado há mais de uma década em clima tropical úmido.

Campanhas de Coleta e Estratégia de Amostragem

Foram realizadas seis campanhas de monitoramento entre junho de 2009 e dezembro de 2010, contemplando períodos seco e chuvoso. A região apresenta clima do tipo As' (Köppen), com chuvas concentradas entre março e agosto e precipitação média anual de cerca de 2.200 mm (APAC).

As amostras foram coletadas em três pontos representativos do sistema de lagoas: entrada do lixiviado bruto, lagoa anaeróbia intermediária e lagoa facultativa final. As coletas seguiram a ABNT NBR 9898:1987 – Preservação e Técnicas de Amostragem de Efluentes Líquidos. Foram obtidas amostras compostas a partir de alíquotas pontuais coletadas a cada 15 minutos, durante uma hora. As amostras foram armazenadas em frascos de polietileno de 1 L, previamente lavados com solução de HNO_3 a 10% e enxaguados com água destilada. O acondicionamento foi realizado em caixas isotérmicas com gelo, mantendo temperatura inferior a 4°C até a chegada ao laboratório.

Parâmetros Seleccionados e Justificativa

O estudo concentrou-se na análise de parâmetros físico-químicos seleccionados para caracterizar a maturação do lixiviado: DBO₅, DQO, nitrogênio amoniacal (NH_4^+) e pH. Esses indicadores foram escolhidos com base em estudos clássicos (Kjeldsen et al., 2002; Renou et al., 2008), que apontam esses parâmetros como suficientes para classificar o estágio de estabilização do lixiviado.

Embora parâmetros como metais, sólidos totais dissolvidos e contaminantes emergentes não tenham sido incluídos nesta etapa, a escolha dos indicadores analisados é considerada adequada para o diagnóstico de maturação do chorume em aterros encerrados, sendo recomendada a inclusão de outros parâmetros em estudos complementares.

Procedimentos Analíticos

As análises laboratoriais foram realizadas em laboratório credenciado, seguindo protocolos do Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater (APHA, AWWA, WEF, 2017):

- DBO₅ (SMWW 5210B): Método respirométrico com incubação por cinco dias a 20°C.
- DQO (SMWW 5220D): Determinação por refluxo fechado com dicromato de potássio e leitura espectrofotométrica a 600 nm.
- Nitrogênio Amoniacal (SMWW 4500-NH₃ C e D): Destilação com hidróxido de sódio, coleta em ácido bórico e titulação com ácido sulfúrico.
- pH (SMWW 4500-H⁺ B): Determinação eletrométrica com potenciômetro calibrado.

Todas as análises foram realizadas em triplicata, e o valor final considerado foi a média aritmética. O controle de qualidade incluiu a execução de amostras em branco, padrões de calibração e duplicatas, seguindo recomendações da ABNT NBR ISO/IEC 17025:2017.

Tratamento Estatístico e Análise Multivariada

Os resultados foram organizados em planilhas e tratados com estatística descritiva (média, mediana, desvio-padrão,

coeficiente de variação) para caracterização das tendências e dispersões. Para compreender as relações entre os parâmetros analisados, foi aplicada a Correlação de Spearman, técnica não paramétrica adequada para conjuntos de dados reduzidos e distribuição não normal.

Além disso, foi realizada uma Análise de Componentes Principais (PCA) com o objetivo de sintetizar a variabilidade dos dados em dois componentes principais, permitindo a identificação de padrões temporais e de agrupamentos relacionados ao estágio de maturação do lixiviado.

Os gráficos de tendência temporal, boxplots em escala logarítmica e heatmap de correlação foram gerados com Python (bibliotecas Matplotlib e Seaborn), garantindo maior clareza visual e detalhamento estatístico.

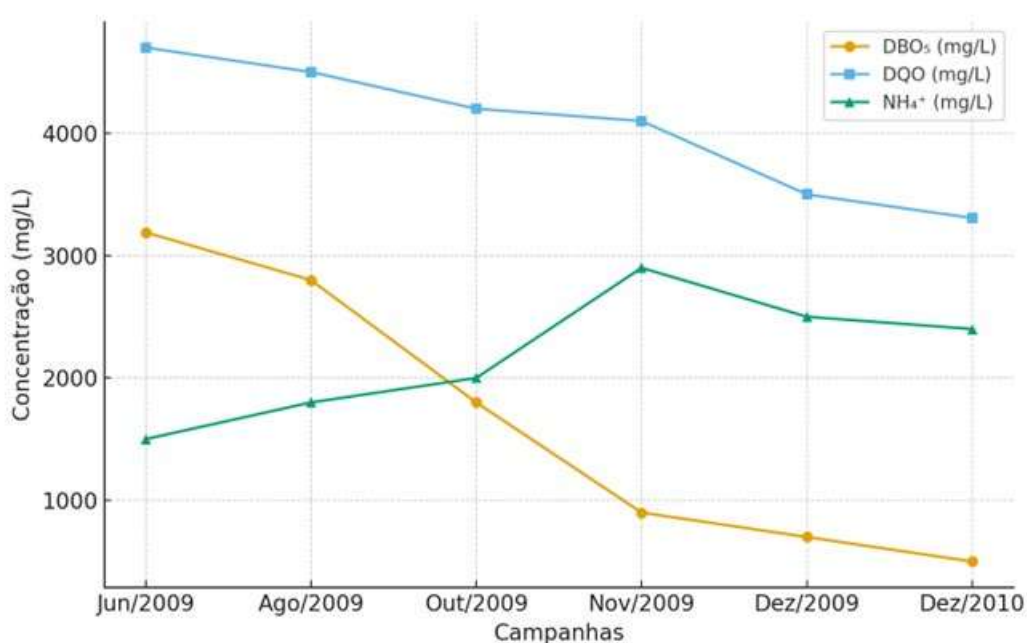
RESULTADOS E DISCUSSÃO

A análise temporal dos parâmetros físico-químicos do chorume do Aterro da Muribeca revelou uma clara tendência de envelhecimento do lixiviado, caracterizada pela redução significativa da biodegradabilidade e pelo aumento da complexidade química. Os gráficos apresentados neste estudo sintetizam as mudanças observadas ao longo de seis campanhas de monitoramento, realizadas em um período de dois anos, e fornecem subsídios técnicos para a compreensão do estágio atual de maturação do lixiviado.

Evolução Temporal de DBO₅, DQO e Nitrogênio Amoniacal

A Demanda Bioquímica de Oxigênio (DBO₅) apresentou uma queda expressiva, de aproximadamente 3.200 mg/L em junho de 2009 para cerca de 500 mg/L em dezembro de 2010 (Figura 1), indicando a degradação da fração orgânica facilmente biodegradável e a transição do chorume para a fase metanogênica ou estabilizada. Este comportamento está em consonância com a literatura, que associa a redução da DBO₅ à decomposição completa dos compostos orgânicos simples e à predominância de moléculas recalcitrantes (Kjeldsen et al., 2002; Renou et al., 2008).

Figura 1 – Evolução temporal de DBO₅, DQO e NH₄⁺.



Fonte: Os Autores (2025).

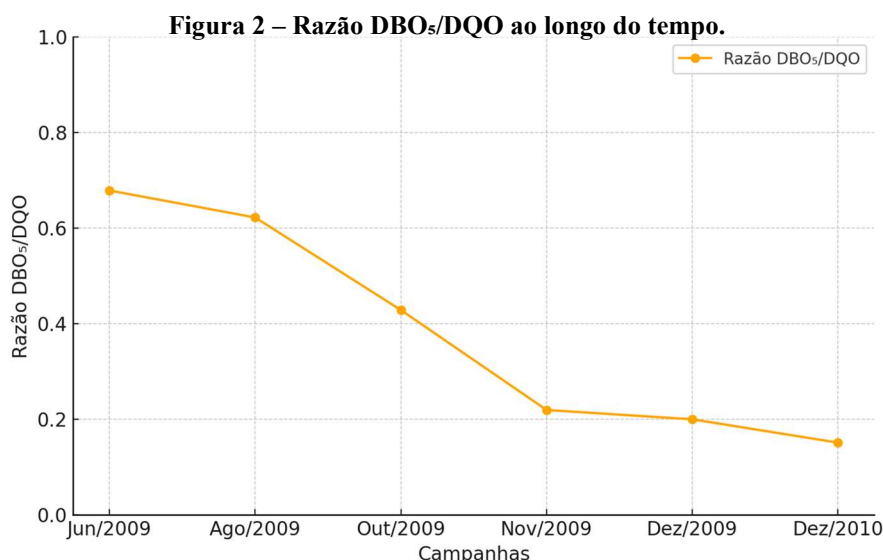
A Demanda Química de Oxigênio (DQO) manteve-se elevada (3.300–4.700 mg/L), evidenciando a persistência de substâncias de difícil degradação, como ácidos húmicos e fúlvicos. Estudos realizados por Oliveira et al. (2022) confirmam que lixiviados de aterros antigos apresentam concentrações elevadas de DQO mesmo após décadas de encerramento, devido à contínua solubilização de compostos complexos.

O nitrogênio amoniacal (NH₄⁺) atingiu picos de até 2.900 mg/L, resultado diretamente ligado à degradação da fração proteica da matéria orgânica. Durante a fase ácida do processo de decomposição, proteínas e aminoácidos sofrem hidrólise e desaminação, liberando nitrogênio orgânico que, em ambiente anaeróbico, é convertido em amônia por meio da amonificação. A ausência de oxigênio limita a nitrificação, favorecendo o acúmulo de NH₄⁺ no lixiviado. Estudos recentes

(Petrilli et al., 2024; Xiang et al., 2025) reforçam que este padrão é característico de aterros antigos, com persistência de concentrações elevadas de nitrogênio mesmo em cenários pós-encerramento.

Razão DBO₅/DQO como Indicador de Maturação

A razão DBO₅/DQO, Figura 2, reduziu-se de valores próximos a 0,7 para cerca de 0,13, confirmando a baixa biodegradabilidade do lixiviado. Esta métrica é amplamente utilizada na classificação do estágio de maturação do chorume, sendo valores inferiores a 0,1 característicos de lixiviados estabilizados (Silva et al., 2021; Wang et al., 2024).



Fonte: Os Autores (2025).

Essa redução tem implicações diretas no tratamento, pois indica a necessidade de sistemas híbridos, combinando processos físico-químicos (coagulação-floculação, osmose reversa, oxidação avançada) com tecnologias biológicas de alta eficiência (MBR, H-SBR). Lins et al. (2005) e Xiang et al. (2025) destacam que a queda da razão DBO₅/DQO é um marco crítico para a tomada de decisão sobre a complexidade das soluções tecnológicas a serem implementadas.

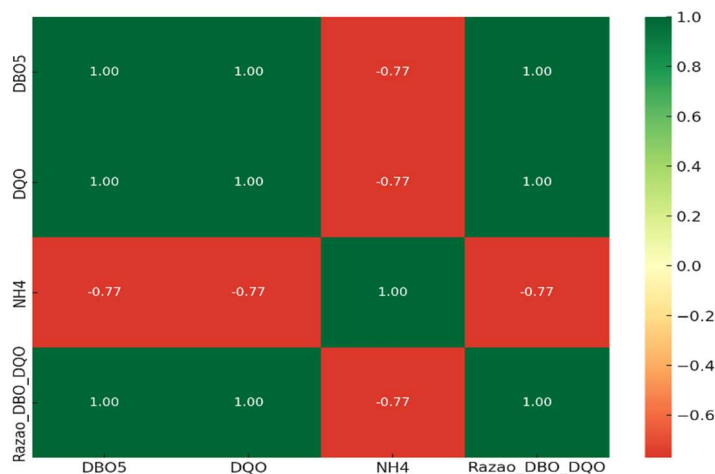
Análise Multivariada: Heatmap de Correlação

A matriz de correlação de Spearman evidencia padrões claros entre os parâmetros monitorados no lixiviado do Aterro da Muribeca, indicando a evolução do efluente para uma fase estabilizada. Observa-se correlação positiva perfeita ($\rho = 1,00$) entre DBO₅, DQO e a razão DBO₅/DQO, resultado esperado pela relação matemática direta entre esses parâmetros. A DQO reflete a carga orgânica total, incluindo compostos refratários, enquanto a DBO₅ mede apenas a fração biodegradável. Dessa forma, a redução simultânea da DBO₅ e da razão DBO₅/DQO, acompanhada da manutenção de valores elevados de DQO, confirma a predominância de moléculas orgânicas complexas e persistentes, característica típica de lixiviados de aterros antigos (Kjeldsen et al., 2002; Renou et al., 2008).

Outro destaque da matriz é a correlação negativa moderada entre o nitrogênio amoniacal (NH₄⁺) e os indicadores de biodegradabilidade ($\rho = -0,77$), evidenciando o acúmulo desse composto à medida que a fração orgânica biodegradável é consumida. Esse comportamento está associado ao processo de amonificação, no qual proteínas e aminoácidos presentes na matéria orgânica são degradados, liberando nitrogênio orgânico que é convertido em amônia em condições anaeróbias.

Em lixiviados estabilizados, a ausência de oxigênio inibe a nitrificação, favorecendo a persistência de altos níveis de NH_4^+ por longos períodos (Renou et al., 2008; Wang et al., 2024; Xiang et al., 2025).

Figura 3 – Matriz de Correlação de Spearman.



Fonte: Os Autores (2025).

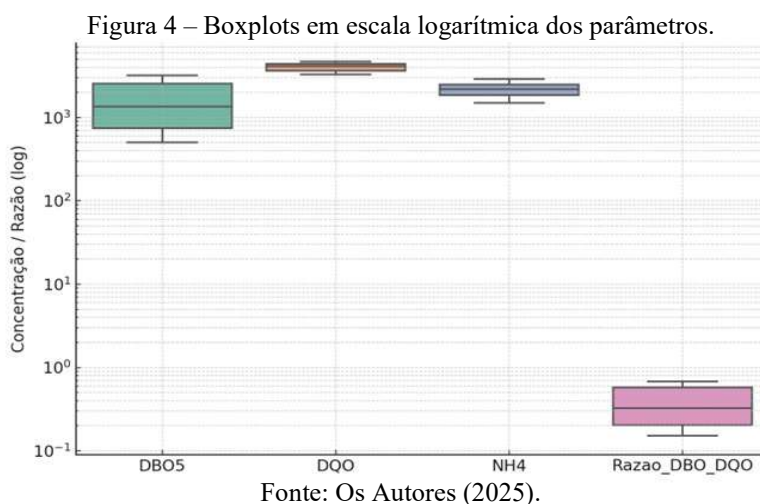
Esses resultados são consistentes com estudos nacionais e internacionais que apontam a relação inversa entre a razão DBO_5/DQO e a concentração de nitrogênio amoniacal como um dos melhores indicadores da maturação do chorume. Lins et al. (2005) já haviam registrado comportamento semelhante no próprio sistema do Aterro da Muribeca, reforçando a relevância desses parâmetros para diagnóstico ambiental em aterros encerrados no Brasil. Mais recentemente, Petrilli et al. (2024) e Kim et al. (2023) ressaltam que, em lixiviados estabilizados, a elevada carga nitrogenada exige processos de tratamento multietapas, incluindo stripping de amônia, membranas de alta pressão ou reatores biológicos de alta taxa, para que sejam atingidos padrões de lançamento ambientalmente seguros.

Em síntese, o heatmap de correlação demonstra que o conjunto de parâmetros selecionado (DBO_5 , DQO , razão DBO_5/DQO e NH_4^+) é robusto para caracterizar o estágio de maturação do lixiviado. A forte associação positiva entre DBO_5 , DQO e sua razão, combinada à relação negativa com o nitrogênio amoniacal, confirma a estabilização bioquímica do chorume do Aterro da Muribeca e reforça a necessidade de tecnologias avançadas para seu tratamento. Esses padrões são consistentes com análises multivariadas utilizadas por Ribeiro et al. (2019) e Oliveira et al. (2022), que demonstram a relevância da abordagem estatística na caracterização de lixiviados e no desenvolvimento de estratégias de tratamento.

Kim et al. (2023) também apontam que análises de correlação são ferramentas-chave para otimizar tecnologias avançadas, como reatores biológicos de batelada sequencial (H-SBR).

Distribuição dos Parâmetros Críticos: Boxplots em Escala Logarítmica

Os boxplots (Figura 4) em escala logarítmica mostram alta variabilidade nos valores de DBO₅ e NH₄⁺, enquanto a DQO permanece elevada, porém com menor dispersão. Essa estabilidade da carga refratária confirma a complexidade química do lixiviado, uma característica típica de aterros encerrados há longo prazo (Petrilli et al., 2024).



A persistência de concentrações de NH₄⁺ acima de 2.000 mg/L representa um desafio significativo para sistemas convencionais de tratamento, pois exerce efeito tóxico sobre micro-organismos nitrificantes. Wang et al. (2024) destacam a necessidade de etapas específicas, como stripping de amônia ou osmose reversa, para reduzir a carga nitrogenada antes do tratamento biológico.

Modelo de Maturação do Lixiviado

O diagrama de evolução do lixiviado ilustra três fases distintas. A fase jovem apresenta alta DBO₅, pH ácido e razão DBO₅/DQO acima de 0,5, típica de lixiviados recém-gerados. Na fase intermediária, há aumento gradual do pH e redução da DBO₅, marcando o início da estabilização química. Na fase estabilizada, observam-se baixa DBO₅, alta DQO, pH neutro a levemente alcalino e altos níveis de NH₄⁺, com razão DBO₅/DQO inferior a 0,1.

Esse modelo é amplamente descrito na literatura (Kjeldsen et al., 2002; Renou et al., 2008) e serve como base para o diagnóstico e dimensionamento de sistemas de tratamento. A caracterização apresentada confirma que o lixiviado da Muribeca está em fase estabilizada, exigindo soluções multietapas para remoção de contaminantes refratários e nitrogenados.

CONSIDERAÇÕES FINAIS

Os resultados obtidos neste estudo confirmam que o lixiviado do Aterro da Muribeca encontra-se em fase estabilizada, evidenciada pela baixa razão DBO₅/DQO, pela redução expressiva da DBO₅ e pelo acúmulo significativo de nitrogênio amoniacal. Esses indicadores refletem a predominância de compostos orgânicos refratários, como ácidos húmicos e fúlvicos, e a persistência de condições anaeróbias que dificultam processos de nitrificação, corroborando com a literatura nacional e internacional.

A análise multivariada demonstrou a relevância do conjunto de parâmetros selecionados (DBO₅, DQO, NH₄⁺ e pH) para diagnóstico de maturação, mesmo sem incluir metais e sólidos totais, o que valida metodologias simplificadas para avaliação de aterros encerrados. Esses achados reforçam a importância de análises estatísticas robustas, como PCA e correlação de Spearman, para compreender padrões temporais e orientar decisões de engenharia.

Diante desse cenário, torna-se evidente a necessidade de sistemas de tratamento multietapas que combinem processos físico-químicos (stripping de amônia, osmose reversa, oxidação avançada) com reatores biológicos de alta eficiência (MBR, H-SBR) para reduzir a carga orgânica e nitrogenada de lixiviados estabilizados. Além disso, o estudo ressalta a

importância de programas de monitoramento contínuo em aterros desativados, sobretudo em regiões tropicais, para evitar impactos prolongados sobre águas superficiais e subterrâneas.

Por fim, os resultados apresentados contribuem para a base de conhecimento técnico-científico sobre lixiviados em aterros brasileiros, fornecendo dados para o aprimoramento das políticas públicas, do licenciamento ambiental e de soluções tecnológicas em gestão de resíduos sólidos urbanos. O Aterro da Muribeca, como estudo de caso, representa um cenário crítico e ilustrativo do passivo ambiental legado por aterros antigos, reforçando a urgência de estratégias integradas de remediação e valorização ambiental.

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 10004: Resíduos sólidos – Classificação**. Rio de Janeiro: ABNT, 2004.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR 9898: Preservação e técnicas de amostragem de efluentes líquidos**. Rio de Janeiro: ABNT, 1987.
- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS (ABNT). **NBR ISO/IEC 17025: Requisitos gerais para a competência de laboratórios de ensaio e calibração**. Rio de Janeiro: ABNT, 2017.
- KIM, S. H. et al. High-rate sequencing batch reactor (H-SBR) for advanced treatment of stabilized landfill leachate. **Waste Management**, v. 165, p. 115–128, 2023. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.07.015>
- KJELDSEN, P. et al. Present and long-term composition of MSW landfill leachate: A review. **Critical Reviews in Environmental Science and Technology**, v. 32, n. 4, p. 297–336, 2002. DOI: <https://doi.org/10.1080/10643380290813462>
- LINS, S. R. **Avaliação da geração de percolado em aterros de resíduos sólidos urbanos com base na capacidade de campo**. 2003. 173 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Pernambuco, Recife, 2003.
- LINS, S. R.; PURIFICAÇÃO, R. C.; JUCÁ, J. F. T. Diagnóstico do sistema de tratamento de chorume do Aterro da Muribeca e propostas de melhoria. In: **XXVII CONGRESSO INTERAMERICANO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL**, 2004, Porto Alegre. Anais... Porto Alegre: ABES, 2004.
- LINS, E. A. M. et al. Monitoramento de lagoas de estabilização no tratamento de chorume – Aterro da Muribeca. In: **CONGRESSO BRASILEIRO DE ENGENHARIA SANITÁRIA E AMBIENTAL (CBESA)**, 23., 2005, Campo Grande, MS. Anais... Rio de Janeiro: ABES, 2005.
- OLIVEIRA, F. C. et al. Composição físico-química de lixiviados em aterros sanitários brasileiros: análise crítica e perspectivas de tratamento. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v. 27, n. 3, p. 1–15, 2022. DOI: <https://doi.org/10.1590/S1413-415220220210814>
- PETRILLI, A. et al. Management of leachate from old sanitary landfills: Current challenges and advanced treatment technologies. **Waste Management**, v. 157, p. 65–78, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.10.009>
- RENOU, S. et al. Landfill leachate treatment: Review and opportunity. **Journal of Hazardous Materials**, v. 150, n. 3, p. 468–493, 2008. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2007.09.077>
- RIBEIRO, R. M. et al. Multivariate analysis of sanitary landfill leachate: Identification of parameters influencing environmental risk. **Environmental Monitoring and Assessment**, v. 191, p. 765–778, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1007/s10661-019-7680-5>
- SILVA, T. A. et al. Chemical and ecological characteristics of leachate from municipal solid waste landfills in tropical regions. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v. 9, n. 5, p. 105–119, 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.105119>
- WANG, J. et al. Characteristics and treatment strategies of stabilized landfill leachate: A review. **Science of the Total Environment**, v. 856, p. 159124, 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.159124>
- XIANG, X. et al. Emerging contaminants in stabilized landfill leachate: Occurrence, risks and treatment challenges. **Chemosphere**, v. 322, p. 138094, 2025. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2024.13809>