

Original Article

Assessment of the Mobility of Potentially Toxic Elements in the Fine Fraction of Landfill-Mined Material Using Standardized Tests: Implications for Use as Landfill Cover Material

Anaxsandra da Costa Lima Duarte^{1,2}, Taise Bomfim de Jesus¹, Alessandra Cristina Silva Valentim², Tahise Neiva Campodonio¹

¹ Universidade Federal de Feira de Santana (UEFS), Feira de Santana, BA, Brazil

² Universidade Federal do Recôncavo da Bahia (UFRB), Cruz das Almas, BA, Brazil

Received February 25, 2026; Accepted August 12, 2026

Abstract

Landfill Mining (LFM) stands out as a promising strategy for material recovery and for mitigating environmental liabilities. Among the materials generated, the fine fraction of mined material (FFM), a landfill-mined-soil-like-fraction recovered during landfill mining, exhibits characteristics indicating its potential use as a component of landfill cover systems. However, the presence and mobility of Potentially Toxic Elements (PTE) may pose environmental risks associated with its use. This study evaluated PTE mobility in FFM through standardized leaching and solubilization tests, in accordance with Brazilian standards NBR 10005 and NBR 10006. Total element concentrations in the solid matrix and their concentrations in leaching and solubilized extracts were determined and subsequently compared with the limits established by applicable standards and values reported in the international literature. Additionally, relevant physicochemical parameters were analyzed in the extracts, and a comparative analysis was conducted of the extract preparation methods employed in LFM studies. The results indicated that PTE mobility was not directly proportional to their total concentrations in the FFM. Elements such as Fe, Ca, Mg, and Zn exhibited low mobilization, whereas Cd, As, and Mn showed mobilization under the specific test conditions. Although most elements exhibited low mobility, the results revealed differential behavior among the elements evaluated, indicating that the FFM should not be considered environmentally homogeneous with respect to PTE mobility. These findings demonstrate that PTE mobility should be a key criterion in the environmental assessment of FFM and that its potential use as a cover material requires compliance with applicable legal requirements, case-by-case assessment, and complementary environmental monitoring. The results further reinforce the importance of adopting standardized protocols and integrating ecotoxicological analyses into the assessment of the environmental safety of FFM within the context of the Circular Economy.

Keywords: Landfill mining; contaminant mobility; leaching extract; solubilized extract; landfill-mined-soil-like-fraction; environmental risk.

*Corresponding author: anaxsandra@ufrb.edu.br

Avaliação da Mobilidade de Elementos Potencialmente Tóxicos na Fração Fina do Minerado por ensaios normatizados:

Implicações para Uso como Material de Cobertura em Aterros Sanitários

Resumo

A Mineração de Aterros Sanitários (MAS) destaca-se como estratégia promissora para a recuperação de materiais e a mitigação de passivos ambientais. Entre os materiais gerados, a Fração Fina do Minerado (FFM) apresenta características que indicam seu potencial para uso como componente de coberturas de aterros sanitários. No entanto, a presença e a mobilidade de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT) podem representar riscos ambientais associados a esse uso. Neste estudo, avaliou-se a mobilidade de EPT na FFM por meio de ensaios normatizados de lixiviação e solubilização, conforme as normas brasileiras NBR 10005 e NBR 10006. Foram determinadas as concentrações totais de elementos na matriz sólida e suas concentrações nos extratos lixiviado e solubilizado, posteriormente comparadas aos limites estabelecidos nas normas aplicáveis e aos valores reportados na literatura internacional. Adicionalmente, foram analisados parâmetros físico-químicos relevantes nos extratos e realizada uma análise comparativa dos métodos de produção dos extratos empregados em estudos de MAS. Os resultados indicaram que a mobilidade dos EPT não é diretamente proporcional às suas concentrações totais na FFM. Elementos como Fe, Ca, Mg e Zn, embora abundantes na matriz sólida, apresentaram baixa mobilização, enquanto Cd, As e Mn apresentaram mobilização sob as condições específicas dos ensaios. Embora a maioria dos elementos tenha apresentado baixa mobilidade, os resultados evidenciaram comportamento diferencial entre os elementos avaliados, indicando que a FFM não deve ser considerada ambientalmente homogênea quanto à mobilidade de EPT. Esses achados demonstram que a mobilidade dos EPT deve constituir um critério central na avaliação ambiental da FFM e que sua eventual utilização como material de cobertura requer o atendimento aos requisitos legais aplicáveis, avaliação caso a caso e monitoramento ambiental complementar. Os resultados reforçam, ainda, a importância da adoção de protocolos padronizados e da integração de análises ecotoxicológicas na avaliação da segurança ambiental da FFM no contexto da Economia Circular.

Palavras-chave: Mineração de Aterros Sanitários; mobilidade de contaminantes; extrato lixiviado; extrato solubilizado; risco ambiental.

INTRODUÇÃO

A Mineração de Aterros Sanitários (MAS) configura-se como uma estratégia alinhada aos princípios da Economia Circular, ao promover a recuperação de materiais, a valorização energética, a requalificação de áreas degradadas e a mitigação de passivos ambientais (Zhou *et al.*, 2015). Essa abordagem consiste na escavação e no reaproveitamento de resíduos previamente dispostos, apresentando potencial para ampliar a vida útil de aterros e recuperar matérias-primas secundárias (Parrodi *et al.*, 2018; Van Passel *et al.*, 2013).

Entre os materiais resultantes da MAS, destaca-se a Fração Fina do Minerado (FFM), constituída por partículas com características semelhantes às do solo e formada principalmente por: (a) produtos finais da decomposição químico-termo-biológica dos resíduos; (b) materiais

utilizados na cobertura das células ao longo da operação do aterro; e (c) partículas finas de metais, vidro e cerâmica não passíveis de separação por processos convencionais (Chandana *et al.*, 2021).

A faixa granulométrica atribuída à FFM varia na literatura internacional, em geral, entre 10 e 60 mm, podendo representar de 40 a 80% da massa total de resíduos escavados (Parrodi *et al.*, 2018). No contexto brasileiro, a FFM é definida como o material passante na peneira de 19 mm, representando 35,6% e 37,2% para resíduos com 8 e 24 anos de aterramento, respectivamente (Leme *et al.*, 2021; Takeda *et al.*, 2022).

Sob a perspectiva da Economia Circular, o aproveitamento da FFM pode reduzir a demanda por solos naturais e favorecer sua utilização como camada de cobertura em aterros, contribuindo potencialmente para a mitigação de emissões de gases de efeito estufa (Burlakovs *et al.*, 2021). Esse potencial está relacionado,

entre outros fatores, à disponibilidade do material no próprio sítio de disposição, à presença de matéria orgânica e à ocorrência de bactérias metanotróficas, capazes de oxidar o CH₄ em CO₂, mesmo em baixas concentrações (1–3%) (Abushammala *et al.*, 2014; Chetri & Reddy, 2021; Pehme *et al.*, 2020; Scheutz *et al.*, 2009).

Entretanto, a composição heterogênea da FFM pode favorecer a presença de contaminantes, incluindo metais, compostos clorados e frações potencialmente reativas (Jain *et al.*, 2023). A disposição inadequada de resíduos perigosos ao longo da vida útil dos aterros pode contribuir para essa contaminação, resultando em materiais com diferentes graus de toxicidade. Quando mobilizados, esses contaminantes podem alcançar o solo e as águas subterrâneas, representando uma preocupação ambiental relevante para o reaproveitamento da FFM (Burlakovs *et al.*, 2016).

Nesse contexto, a avaliação da segurança ambiental da FFM não deve se basear exclusivamente nas concentrações totais dos contaminantes. Ao investigarem a FFM proveniente de quatro aterros na Índia, Somani *et al.* (2023) observaram que Zn e Pb estavam predominantemente associados a frações mais lábeis, indicando maior potencial de mobilização. Resultados anteriores também demonstraram que condições mais ácidas e aeróbicas podem intensificar a liberação de metais (Xiaoli *et al.*, 2007). Esses achados evidenciam a importância de avaliar não apenas o conteúdo total dos elementos, mas também sua capacidade de mobilização sob condições específicas.

No âmbito normativo brasileiro, a NBR 10004-1 (ABNT, 2024a) estabelece os requisitos e as etapas do processo de classificação de resíduos, enquanto a NBR 10004-2 (ABNT, 2024b) estabelece o Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR-10004), incluindo a Lista Geral de Resíduos (LGR) e as informações utilizadas na avaliação da toxicidade. Nesse sistema, a classificação compreende, de forma sequencial, o enquadramento do resíduo na LGR, a avaliação da presença de poluentes orgânicos persistentes, das propriedades físico-químicas e infectocontagiosas e, posteriormente, da toxicidade.

Desse modo, os resultados de ensaios de lixiviação e solubilização, embora relevantes para a caracterização da mobilidade dos constituintes, não permitem, isoladamente, inferir a classificação formal do resíduo quanto à periculosidade. No presente estudo, os valores de referência estabelecidos nas NBR 10005 (ABNT, 2004a) e NBR 10006 (ABNT, 2004b) foram utilizados exclusivamente como critérios comparativos para interpretar a mobilidade e a solubilidade dos EPT

nas condições padronizadas dos ensaios.

Os ensaios de lixiviação e solubilização fornecem, portanto, informações complementares sobre o comportamento dos contaminantes em contato com a fase aquosa, permitindo avaliar sua mobilidade e disponibilidade potencial. Essas informações são particularmente relevantes para aplicações da FFM como material de cobertura, nas quais a percolação da água da chuva pode favorecer a mobilização de constituintes solúveis (Kaczala *et al.*, 2017). Esguerra *et al.* (2021) também indicaram que a viabilidade do reaproveitamento da FFM pode estar mais relacionada à lixiviabilidade dos poluentes do que às suas concentrações totais.

Entretanto, a mobilidade dos constituintes pode variar de acordo com as características da FFM e com as condições empregadas nos procedimentos de extração. Parida *et al.* (2024) demonstraram que frações finas com elevados teores de matéria orgânica, intensa liberação de cor e altas concentrações de sólidos dissolvidos totais, sulfatos e cloretos apresentam maior potencial de lixiviação. Nessas condições, os autores recomendaram que o uso da FFM em aplicações expostas ao ambiente seja realizado de forma controlada e associado a barreiras de baixa permeabilidade. De modo complementar, Orupöld *et al.* (2022) ressaltam a importância da incorporação de análises ecotoxicológicas na avaliação da FFM, de modo a ampliar a caracterização dos riscos ambientais associados ao seu reaproveitamento.

A comparação entre estudos também é dificultada pela diversidade terminológica e metodológica empregada na avaliação da mobilidade. No Brasil, “chorume” refere-se ao líquido gerado pela decomposição dos resíduos, enquanto “lixiviado” corresponde ao chorume acrescido da água de percolação (ABNT, 1992). Já “extrato lixiviado” e “extrato solubilizado” designam, respectivamente, os líquidos obtidos nos ensaios de lixiviação e solubilização (ABNT, 2004a; ABNT, 2004b). Na literatura internacional, leachate e leaching são empregados de forma mais ampla, podendo designar tanto o líquido quanto o processo de lixiviação, o que pode dificultar a comparação direta entre estudos (Kaczala *et al.*, 2017; Somani *et al.*, 2018).

Além disso, os procedimentos de extração variam quanto ao meio extrator, à relação sólido/líquido, ao tempo de contato e a outras condições operacionais, comprometendo a comparabilidade dos resultados e dificultando o estabelecimento de critérios técnicos para o reaproveitamento seguro da FFM. Essa variabilidade é particularmente relevante porque ainda são escassos os

estudos que empregam protocolos padronizados, como aqueles estabelecidos pelas normas brasileiras, para avaliar a mobilidade de contaminantes na FFM.

Soma-se a isso a ausência de diretrizes específicas para sua utilização como material de cobertura em aterros sanitários. Assim, entre os estudos internacionais incluídos nesta análise, torna-se relevante comparar os procedimentos empregados e os resultados obtidos, de modo a identificar convergências e diferenças metodológicas que possam contribuir para a avaliação da aplicabilidade da FFM. Nesse contexto, são necessárias abordagens que integrem a caracterização química da FFM, a avaliação da mobilidade dos contaminantes e a interpretação dos resultados à luz das condições de uso pretendidas.

Diante disso, o presente estudo busca contribuir para a compreensão da mobilidade dos EPT na FFM e fornecer subsídios técnicos para a avaliação preliminar de sua utilização como material de cobertura no âmbito da Economia Circular.

Assim, este estudo teve como objetivo avaliar a mobilidade de EPT na FFM por meio de ensaios de lixiviação e solubilização, conforme as normas brasileiras, visando à avaliação preliminar do risco ambiental associado à sua utilização como material de cobertura em aterros sanitários. Para isso, foram determinados os teores totais desses elementos na matriz sólida, avaliadas sua presença e mobilidade nos extratos, comparados diferentes métodos de produção de extratos descritos na literatura internacional e confrontados os resultados com valores de referência normativos e dados previamente publicados no contexto da MAS.

MATERIAL E MÉTODOS

O procedimento completo para a obtenção do material minerado e de suas frações encontra-se descrito em Duarte *et al.* (2025) e será apresentado aqui de forma sucinta. Os resíduos sólidos foram escavados com auxílio de escavadeira hidráulica de 22 toneladas, em uma única trincheira, aberta na primeira berma de um aterro sanitário localizado no Recôncavo da Bahia. A trincheira apresentava dimensões de 3,0 m de largura, 4,5 m de comprimento e 2,3 m de profundidade abaixo da camada de cobertura.

Foram coletados aproximadamente 3.000 kg de resíduos com cerca de 10 anos de aterramento, sem exclusão de resíduos de grande dimensão, conforme o método proposto por Leme *et al.* (2021) e Takeda *et al.* (2022). Após a escavação e homogeneização, procedeu-se à obtenção de uma amostra representativa

por meio de quarteamento mecanizado em duas etapas, conforme a NBR 10007 (ABNT, 2004c).

O material resultante desse processo, aproximadamente 650 kg, denominado Massa Homogeneizada de Resíduo Minerado (MHRM), foi acondicionado em seis bombonas plásticas de 170 L, devidamente vedadas, a fim de minimizar perdas de umidade e alterações físico-químicas. A MHRM foi submetida à separação tátil-visual em 25 categorias, entre elas a Fração Fina do Minerado (FFM), material passante na peneira de 19,0 mm de abertura (Leme *et al.*, 2021).

Uma subamostra de aproximadamente 3,0 kg de FFM foi refrigerada para os ensaios subsequentes. Desse material, cerca de 100 g foram destinados à determinação do teor de matéria orgânica e do pH da matriz sólida da FFM (Teixeira *et al.*, 2017).

Para a determinação das concentrações totais de EPT, uma alíquota de 150 g foi seca ao ar, macerada e peneirada em malha de 0,063 mm. Do material passante, três subamostras de 0,5 g foram submetidas à digestão com 10 mL de água régia, em sistema de micro-ondas, a 180 °C por 20 min, conforme Soman *et al.* (2018). Após a digestão, as soluções obtidas (denominadas FFM-CT) foram filtradas, ajustadas para volume final de 50 mL com água deionizada e mantidas sob refrigeração até a análise.

As extrações para obtenção dos extratos lixiviado e solubilizado foram realizadas em duplicata. O extrato lixiviado (FFM-EL) foi obtido a partir da mistura de 75 g de FFM (< 9,5 mm) e 1.500 mL de solução extratora ácida (ácido acético glacial e hidróxido de sódio), conforme a NBR 10005 (ABNT, 2004a). A suspensão foi mantida sob agitação por 20 h a 25 °C, seguida de filtração em membrana de 0,6 µm.

O extrato solubilizado (FFM-ES) foi preparado com 250 g de FFM (< 9,5 mm) e 1.000 mL de água deionizada, conforme a NBR 10006 (ABNT, 2004b). Após a agitação inicial, a mistura permaneceu em repouso por sete dias, sendo posteriormente filtrada em membrana de 0,6 µm.

Para cada extração, foram coletadas alíquotas de 150 mL, acidificadas (pH < 2) e subdivididas em três alíquotas de 50 mL, analisadas independentemente, caracterizando a triplicata analítica. As amostras foram mantidas sob refrigeração até a análise elementar.

A adoção de diferentes granulometrias atendeu às exigências normativas e aos objetivos analíticos de cada ensaio. A fração < 0,063 mm foi utilizada na determinação das concentrações totais, visando maior homogeneidade e eficiência da digestão ácida. Para os ensaios de lixiviação e solubilização empregou-se

material com granulometria $< 9,5$ mm, conforme as NBR 10005 e NBR 10006, buscando avaliar a fração potencialmente mobilizável sob condições padronizadas de contato com o meio aquoso.

Dessa forma, a detecção ou concentração de um EPT acima dos valores de referência associados aos ensaios de lixiviação ou solubilização deve ser interpretada como evidência de mobilização ou solubilidade sob as condições específicas do ensaio, e não, isoladamente, como evidência de classificação da FFM como resíduo perigoso. Uma eventual classificação quanto à periculosidade requer a aplicação integral do processo estabelecido na ABNT NBR 10004-1:2024, em articulação com as informações e critérios do SGCR-10004.

A determinação das concentrações dos Elementos Potencialmente Tóxicos (Al, As, Ba, Ca, Cd, Cr, Cu, Fe, K, Mg, Mn, Ni, P, Pb, V e Zn) foi realizada nas três matrizes analíticas avaliadas (FFM-CT, FFM-EL e FFM-ES). As análises foram conduzidas em triplicata, com brancos analíticos, no Laboratório de Estudos do Petróleo (LEPETRO/UFBA) utilizando espectrometria de emissão óptica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES, Agilent Technologies, série 720).

Nos extratos FFM-EL e FFM-ES foram determinados pH, sulfato, nitrogênio total, nitrogênio amoniacal, nitrato, nitrito, fósforo e matéria orgânica (MO). As análises de DBO e DQO foram realizadas exclusivamente no FFM-ES, devido à interferência da solução extratora ácida no FFM-EL. Todos os parâmetros seguiram os métodos padronizados da APHA (2017).

Para a análise comparativa da literatura, os artigos foram selecionados na base Scopus em duas etapas (11/07/2023 e 30/05/2025), utilizando as expressões de busca: “landfill mining AND leachate”, “landfill mining AND leaching”, “landfill mining AND characteristic*” e “landfill mining AND characterization”. Foram considerados apenas artigos originais publicados em periódicos, excluindo-se revisões e duplicatas.

No processo de triagem da literatura, foram inicialmente identificados 24 artigos. Desses, foram excluídos 2 por ausência de dados de caracterização, 8 por abordarem outras frações do minerado, 2 por tratarem de aplicações distintas, 2 por se tratarem de artigos de revisão e 1 por apresentar foco exclusivo em lixiviado de aterro sanitário. Assim, o banco de dados final para a análise comparativa da literatura foi composto por 9 artigos.

Desses estudos, foram extraídas informações como relação líquido/sólido (L/S), tempo e tipo de mistura, método de separação líquido-sólido, parâmetros analisados, normas de referência e classificação do

extrato como semelhante ao FFM-EL ou FFM-ES, segundo o meio extrator.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

A matriz sólida da FFM apresentou teor de matéria orgânica (MO) de 10,1% e pH igual a 8,3, características compatíveis com resíduos submetidos a processos de estabilização durante o aterramento. A comparação entre as concentrações totais de EPT na FFM e aquelas determinadas nos extratos lixiviado e solubilizado (Tabela 1) evidencia que a mobilidade dos elementos não é diretamente proporcional à sua abundância na matriz sólida. É importante destacar que os valores de referência das NBR 10005 e NBR 10006 são apresentados exclusivamente como critérios comparativos para a avaliação da mobilidade e da solubilidade e não implicam, isoladamente, classificação formal da FFM quanto à periculosidade. Elementos como Fe, Al e Cr, embora presentes em elevadas concentrações na FFM (38.388,79; 44.451,67; 70,08 mg/kg, respectivamente), não foram detectados nos extratos, sugerindo baixa mobilização nas condições avaliadas.

A FFM não apresentou concentrações totais de EPT superiores aos valores de investigação estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420 (BRASIL, 2009). Embora a maioria dos elementos avaliados tenha permanecido abaixo dos valores de referência estabelecidos pelas NBR 10005 e NBR 10006, foram observadas exceções para As e Mn no extrato solubilizado e para Cd no extrato lixiviado, evidenciando mobilização desses elementos sob as condições padronizadas dos ensaios. Esses resultados, entretanto, não permitem, isoladamente, inferir a classificação da FFM quanto à periculosidade segundo o sistema estabelecido pela NBR 10004-1: 2024 (ABNT, 2024a).

A detecção de Cd no extrato lixiviado, apesar sua ausência na matriz sólida, reforça a importância de avaliar a fração potencialmente mobilizável dos elementos, uma vez que seu comportamento pode não ser diretamente inferido a partir das concentrações totais. Todos os brancos analíticos para Cd apresentaram valores inferiores ao limite de detecção do método, na faixa de $\mu\text{g/L}$, indicando ausência de contaminação durante o procedimento analítico. A discrepância entre a concentração de Cd determinada na matriz sólida e sua presença no extrato lixiviado pode estar associada à heterogeneidade intrínseca da FFM, uma matriz complexa na qual os EPT podem apresentar distribuição espacial variável entre diferentes fases minerais e

Tabela 1. Concentrações de Elementos Potencialmente Tóxicos na Fração Fina do Minerado e nos respectivos extratos, em comparação com os valores de referência aplicáveis.

Elemento	FFM-CT (mg/kg)	Valor de Investigação (uso industrial) ¹ (mg/kg)	FFM-ES (mg/L)	Valor de referência para extrato solubilizado ² (mg/L)	FFM-EL (mg/L)	Valor de referência para extrato lixiviado ³ (mg/L)
Al	44.451,67	SR	LD	0,20	LD	SR
As	5,77	150,0	0,04	0,01	0,34	1,0
Ba	79,84	750,0	0,58	0,70	3,97	70,0
Ca	13.365,14	SR	485,04	SR	4.461,45	SR
Cd	LD	20,0	LD	0,01	4,82	0,5
Cr	70,08	400,0	LD	0,05	LD	5,0
Cu	86,23	600,0	LD	2,00	0,18	SR
Fe	38.388,79	SR	LD	0,30	LD	SR
K	2.108,66	SR	520,89	SR	1.088,1	SR
Mg	485,28	SR	35,88	SR	133,83	SR
Mn	112,58	SR	0,11	0,10	16,45	SR
Ni	9,49	130,0	LD	SR	LD	SR
P	1.208,01	SR	LD	SR	14,38	SR
Pb	36,56	900,0	LD	0,01	LD	1,0
V	59,1	1.000,0	LD	SR	LD	SR
Zn	389,13	2.000,0	0,28	5,00	37,06	SR
Valor de referência		Acima do valor de referência		Abaixo do valor de referência		

Nota: ¹ CONAMA n° 420, uso industrial (BRASIL, 2009); ² Valores da NBR 10006 (ABNT, 2004b) utilizados neste estudo exclusivamente como critérios comparativos para avaliação da solubilidade; ³ Valores da NBR 10005 (ABNT, 2004a) utilizados neste estudo exclusivamente como critérios comparativos para avaliação da mobilidade sob as condições do ensaio; SR: Sem Referência; LD: abaixo do limite de detecção.

componentes orgânicos, com distintos graus de estabilidade química. Assim, a fração mobilizável de um elemento não necessariamente apresenta relação direta com sua concentração total na matriz sólida.

Além disso, os diferentes procedimentos analíticos empregados envolveram matrizes distintas, incluindo a matriz sólida, o extrato solubilizado e o extrato lixiviado, bem como diferentes soluções extratoras e tempos de contato. Os ensaios de lixiviação e solubilização avaliam, portanto, frações potencialmente mobilizáveis sob condições extrativas padronizadas, podendo favorecer a liberação de espécies associadas a superfícies minerais ou à matéria orgânica. Esse comportamento é consistente com estudos que relatam maior liberação de Cd sob condições de redução do pH, associada à diminuição de sua retenção por componentes minerais e orgânicos (Costa *et al.*, 2007).

Outro aspecto relevante refere-se às diferenças de preparo granulométrico requeridas pelos procedimentos empregados para a caracterização da matriz sólida e para os ensaios de lixiviação e solubilização. Enquanto a determinação das

concentrações totais envolve a redução granulométrica do material para obtenção de uma amostra mais homogênea e representativa da composição global da FFM, os ensaios de extração seguem requisitos normativos específicos quanto ao preparo da amostra, utilizando material com granulometria inferior a 9,5 mm.

Essas diferenças podem influenciar a interação entre a fase sólida e o meio extrator, uma vez que a área superficial disponível e a exposição de fases minerais podem afetar a mobilidade dos Elementos Potencialmente Tóxicos (Coringa *et al.*, 2016). Dessa forma, as diferenças entre os resultados obtidos na matriz sólida e nos extratos podem refletir não apenas as características geoquímicas dos elementos, mas também as particularidades de cada procedimento analítico.

A mobilização observada para o Cd é compatível com o comportamento descrito para diferentes matrizes ambientais, nas quais esse elemento apresenta, em geral, maior mobilidade relativa em comparação a outros metais, como Pb, Cr e Cu, em determinadas condições geoquímicas, devido à menor retenção por componentes minerais e orgânicos (Amaral

Sobrinho *et al.*, 1998).

O pH alcalino (8,22) observado no extrato solubilizado é consistente com resíduos estabilizados e com aproximadamente 10 anos de aterramento (Faitli *et al.*, 2019), condição que tende a reduzir a disponibilidade de diversos metais. Entretanto, o comportamento observado para o As indica que a alcalinidade, isoladamente, não impede a mobilização de determinados elementos, uma vez que esse elemento pode apresentar maior solubilidade em condições levemente alcalinas (Patel *et al.*, 2023).

Em conjunto, esses resultados demonstram que os procedimentos de caracterização da matriz sólida e de extração fornecem informações complementares sobre o comportamento dos EPT. Embora não sejam diretamente equivalentes, os resultados permitem avaliar diferentes aspectos da interação dos elementos com a matriz e com a fase aquosa, contribuindo para a compreensão de sua mobilidade potencial.

A presença de As e Mn em concentrações superiores aos valores de referência da NBR 10006 e de Cd acima do valor de referência presente na NBR 10005 reforça a necessidade de avaliações complementares antes de eventual utilização da FFM como material de cobertura. Embora a matriz sólida tenha atendido aos valores de investigação da Resolução CONAMA nº 420, os resultados dos ensaios de extração demonstram que a avaliação ambiental desse material não deve se restringir à concentração total dos EPT. Deve-se incluir estudos ecotoxicológicos do elutriado e da FFM em fase sólida, bem como estratégias de manejo e monitoramento ambiental, a fim de verificar se a mobilização observada nos ensaios químicos está associada a efeitos biológicos relevantes.

Esses resultados evidenciam a importância de considerar cenários críticos de exposição à água e possíveis alterações das condições geoquímicas, particularmente em cenários de manejo ou pós-tratamento da FFM, como compostagem, digestão anaeróbia e incineração (Mersoni & Reichert, 2017).

Além da avaliação da mobilidade dos contaminantes na FFM estudada, a comparação com os procedimentos empregados em estudos internacionais selecionados permite contextualizar a influência dos parâmetros metodológicos sobre os resultados de extração e sua interpretação.

A análise dos métodos de produção de extratos descritos nos nove estudos internacionais (Tabela 2) revela variabilidade nos procedimentos empregados para a avaliação da FFM. Com base no meio extrator, os estudos podem ser agrupados em: (i) aqueles que utilizam água como meio extrator, aproximando-se do

princípio do ensaio de solubilização (NBR 10006); e (ii) aqueles que empregam soluções ácidas, aproximando-se do princípio do ensaio de lixiviação (NBR 10005).

Entre os nove trabalhos avaliados, predominam os ensaios baseados em extração aquosa (8 dos 9 estudos), voltados à estimativa de liberação de constituintes sob contato com água. Em contraste, o ensaio brasileiro de lixiviação emprega solução extratora ácida, constituindo uma condição de extração mais agressiva para determinados constituintes e permitindo avaliar uma fração potencialmente mobilizável sob condições padronizadas.

Essa variabilidade também se manifesta nos parâmetros operacionais. A relação líquido/sólido (L/S) varia entre 5:1 e 20:1 nos estudos internacionais avaliados, com predominância da relação 10:1, enquanto as normas brasileiras estabelecem relações específicas de 20:1 para lixiviação e 4:1 para solubilização. O tempo de mistura também apresenta ampla variação, entre 2 e 24 h, em contraste com períodos definidos pelas normas brasileiras (18 + 2 h para lixiviação e 7 dias para solubilização).

Também foram observadas diferenças quanto ao tipo de agitação, ao método de separação das fases líquida e sólida e ao tamanho dos poros dos filtros empregados. Esses fatores podem influenciar os resultados de extração, uma vez que relações L/S mais elevadas podem favorecer a transferência de determinados constituintes para a fase líquida, enquanto filtros com maior abertura podem permitir maior passagem de partículas finas e, consequentemente, contribuir para concentrações aparentes mais elevadas de parâmetros associados à fase particulada.

De forma geral, a heterogeneidade metodológica observada nos nove estudos internacionais limita a comparabilidade direta dos resultados e dificulta o estabelecimento de critérios técnicos consistentes para a avaliação do reaproveitamento da FFM. Nesse contexto, a adoção de procedimentos normatizados, como aqueles estabelecidos pelas normas brasileiras, pode contribuir para maior padronização, rastreabilidade e reprodutibilidade das avaliações.

Os estudos analisados também contemplam ampla variedade de parâmetros, incluindo indicadores básicos (pH, condutividade elétrica), compostos e indicadores orgânicos (COT, COD/DQO, DBO), nutrientes (N, P), íons majoritários (Cl^- , SO_4^{2-} , entre outros) e EPT. Esse conjunto evidencia que, entre os nove estudos avaliados, a caracterização da FFM frequentemente ultrapassa a determinação de elementos metálicos, incorporando diferentes indicadores do comportamento ambiental do material.

Tabela 2. Características metodológicas dos ensaios de extração aplicados à Fração Fina do Minerado em estudos internacionais.

Autor	L/S	TM	Equipamento	Separação L-S		Parâmetros	Referência
Ensaios com extração aquosa (semelhantes à NBR 10006 (ABNT, 2004b))							
Kaartinen <i>et al.</i> (2013)	10:1 ADe	24 h 100 rpm	Agitador	Filtração	0,45 µm	pH, CE, POR, COD, COT, SO ₄ ²⁻ , F ⁻ , Cl ⁻ , PC; Metais	Comparação com solo local
Kaczala <i>et al.</i> (2017)	10:1 AD	24 h 100 rpm	Floculador/ teste de jarros	Decantação	NI	pH, CE, POR, DQO, COD, COT, Metais	NI
Somani <i>et al.</i> (2019)	10:1 AD	24 h 100 rpm	Agitador	Decantação Centrifugação	3 h NI	pH, CE, SDT, DQO, NH ₄ ⁺ , Alcalinidade, DT, Ca, Mg, SO ₄ ²⁻ , Br ⁻ , F ⁻ , Cl ⁻ , Metais	Comparação com solo local
Vollprecht <i>et al.</i> (2020)	5:1 AD	2 h	Agitador	Centrifugação Filtração	15 min, 5500 rpm 0,45 µm	pH, CE, POR, COD, PO ₄ ³⁻ , NO ₃ ⁻ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻ , Metais	Reciclagem de solo escavado
Orupöld <i>et al.</i> (2022)	5:1 10:1 AD	24 h	Agitador mecânico	Filtração	1,2 µm	pH, CE, POR, COD, COT, CT, NT, DQO, DBO	Aceitação de resíduo em aterro
Goli <i>et al.</i> (2022)	20:1 AD	24 h	Agitador mecânico	Filtração	2,5 µm	pH, CE, SDT, salinidade, COT, NT, Metais, Ca ²⁺ , Mg ²⁺ , Na ⁺ , Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Aceitação de composto
Parida <i>et al.</i> (2024)	10:1 AD	16 ± 2 h 30 rpm	Agitador rotativo mecânico	Centrifugação Filtração	15 min, 1.000 rpm 2,5; 0,45 e 0,2 µm	pH, CE, Cor, Metais, SDT, Mg, Ca, Na, K, SO ₄ ²⁻	Comparação com solo local
Devahi <i>et al.</i> (2025)	10:1 AD	24 h 100 rpm	Agitador rotativo mecânico	Decantação por 10 h	2,5 µm	pH, CE, SDT, DT, Mg, Ca, DQO, Cl ⁻ , SO ₄ ²⁻	Solo local
Ensaios com extração ácida (semelhante à NBR 10005 (ABNT, 2004a))							
Masi <i>et al.</i> (2014)	20:1 Ácido acético	18 h 30 rpm	NI	NI	0,45 µm	Metais Ecotoxicológicos	Normativo para uso de lodo de esgoto

Nota: AD: água deionizada ou ultrapura; ADe: água desmineralizada; CE: Condutividade elétrica; COD: Carbono Orgânico Dissolvido; COT: Carbono Orgânico Total; DBO: Demanda Bioquímica de Oxigênio; DQO: Demanda Química de Oxigênio; DT: Dureza total; NI: Não informado; NT: Nitrogênio Total; PC: Poder Calorífico; POR: Potencial de Oxirredução; SDT: Sólidos Dissolvidos Totais; TM: Tempo de Mistura.

Além disso, os parâmetros analisados são relacionados a diferentes possibilidades de aplicação da FFM, indicando que a interpretação dos resultados depende do contexto de uso considerado.

A análise comparativa do conjunto dos nove estudos revisados (Tabela 3) evidencia variabilidade nos parâmetros físico-químicos dos extratos. Essas observações devem ser interpretadas com cautela, pois se restringem aos estudos selecionados nesta análise e podem ser influenciadas por diferenças no tempo de aterramento, na composição dos resíduos, nas condições operacionais dos aterros e nos protocolos de extração.

Os valores de pH concentram-se majoritariamente em faixas neutras a alcalinas, compatíveis com resíduos estabilizados. Esse comportamento está alinhado com a evolução típica de aterros, nos quais o pH tende a aumentar com o tempo de

degradação (Ślomożyńska & Ślomożyński, 2004). No presente estudo, o pH do extrato solubilizado (8,22) confirma essa tendência (Tabela 4).

A comparação descritiva entre os extratos da FFM e aqueles obtidos dos solos naturais locais, representados pelo solo de cobertura e pelo solo de referência, sugere diferenças no comportamento geoquímico dos materiais. Entretanto, como não foram realizadas análises estatísticas inferenciais para essas comparações, os resultados devem ser interpretados exclusivamente de forma descritiva.

No ensaio de lixiviação, conduzido sob condições extrativas mais intensas, todos os materiais apresentam pH ácido. Descritivamente, o FFM-EL apresentou concentrações médias superiores de NTK (35,9 mg/L) e NH₄⁺ (7,87 mg/L) em relação aos solos avaliados. Da mesma forma, o teor médio de matéria

Tabela 3. Caracterização química dos extratos de FFM de pesquisas anteriores

Parâmetros físico-químicos	Autores							
	Kaartinen <i>et al.</i> (2013)	Kaczala <i>et al.</i> (2017)	Somani <i>et al.</i> (2019)	Vollprecht <i>et al.</i> (2020)	Orupöld <i>et al.</i> (2022)	Goli <i>et al.</i> (2022)	Parida <i>et al.</i> (2024)	Devahi <i>et al.</i> (2025)
pH	8,1 ^c 8,3 ^d	NI	7,3	7,7	7,4	7,5-7,6 ^a 6,9 ^b	7,6-7,9	8,1
NH ₄ ⁺	NI	NI	33,3	61,5	NI	NI	NI	NI
NO ₃ ⁻	NI	NI	NI	27,08	NI	NI	NI	NI
PO ₄ ³⁻	NI	NI	NI	9,0	NI	NI	NI	NI
DQO	NI	4.924,0- 7.622,0	234	NI	628,6	NI	NI	131,2
DBO	NI	NI	NI	NI	3,0-9,4	NI	NI	NI
NT	NI	NI	NI	NI	NI	16,4-27,3 ^a 48,1 ^b	NI	NI
SDT	NI	NI	1377	NI	NI	388,0-672,0 ^a 1286,67 ^b	1.000,0- 1.250,0	NI
SO ₄ ²⁻	15.000,0 ^c 7.100,0 ^d	NI	368	NI	NI	NI	200,0- 700,0	369,7

Nota: NI: Não informado; ^a em lixão; ^b em aterro; ^c camadas intermediárias; ^d camadas de fundo. Concentrações em mg/L, exceto para pH.

Tabela 4. Caracterização físico-química dos extratos solubilizado (ES) e lixiviado (EL) da Fração Fina do Minerado (FFM), do Solo de Cobertura (SC) e do Solo de Referência (SR)

Parâmetro	Fração Fina do Minerado		Solo de cobertura		Solo de referência	
	FFM-ES	FFM-EL	SC-ES	SC-EL	SR-ES	SR-EL
pH	8,22 ± 0,29	5,46 ± 0,04	6,57 ± 0,41	4,89 ± 0,10	7,01 ± 0,68	4,96 ± 0,04
SO ₄ ²⁻	531,18 ± 16,6	37,51 ± 5,35	22,54 ± 0,19	17,60 ± 0,02	149,20 ± 4,08	14,66 ± 0,01
NTK	95,00 ± 10,00	35,90 ± 0,00	26,40 ± 2,77	7,20 ± 1,05	36,67 ± 16,77	4,93 ± 0,96
NH ₄ ⁺	27,57 ± 0,47	7,87 ± 0,23	8,01 ± 0,30	0,00 ± 0,00	12,17 ± 0,15	0,04 ± 0,00
NO ₃ ⁻	74,50 ± 8,26	1,34 ± 0,17	1,52 ± 0,07	0,07 ± 0,01	6,53 ± 0,40	0,70 ± 0,09
NO ₂ ⁻	1,09 ± 0,27	0,12 ± 0,03	0,01 ± 0,01	0,03 ± 0,01	0,43 ± 0,06	0,03 ± 0,01
DBO	45,00 ± 2,00	ND	4,33 ± 0,58	ND	11,40 ± 1,80	ND
DQO	292,77 ± 7,26	ND	0,70 ± 0,17	ND	197,83 ± 5,75	ND
PO ₄ ³⁻	0,53 ± 0,01	0,79 ± 0,01	0,00 ± 0,00	0,00 ± 0,00	1,43 ± 0,23	0,06 ± 0,01
MO	440,00 ± 40,00	4.093,33 ± 310,70	60,00 ± 20,00	1.900,00 ± 34,64	393,33 ± 70,24	2.333,33 ± 265,58

Nota: ND: não determinado; ES: extrato solubilizado; EL: extrato lixiviado; MO: matéria orgânica. Valores expressos como média ± desvio-padrão. Concentrações em mg/L, exceto para pH

orgânica no FFM-EL (4.093,33 mg/L) foi superior aos valores observados no solo de cobertura (1.900,00 mg/L) e no solo de referência (2.333,33 mg/L). Essa diferença descritiva indica maior presença de matéria orgânica no extrato da FFM. A presença de compostos orgânicos na fase solúvel pode, por sua vez, influenciar o comportamento dos EPT por meio de processos de complexação ou associação com a fase dissolvida, dependendo das condições geoquímicas do meio.

As concentrações de NH₄⁺ (7,87 mg/L) e SO₄²⁻ (37,51 mg/L) no FFM-EL também foram superiores aos valores de referência utilizados para avaliação da qualidade da água de irrigação (5 e 20 mg/L respectivamente) (Ayers & Westcot, 1994; Kaartinen *et al.*, 2013). Entretanto, essa comparação deve ser interpretada apenas como referência indicativa, uma vez que o extrato de lixiviação da FFM não corresponde diretamente à água de irrigação nem representa, por si

só, um cenário de exposição agrícola.

O FFM-ES apresentou pH levemente alcalino (8,22) e concentrações médias mais elevadas de sais dissolvidos e nutrientes ($\text{SO}_4^{2-} = 531,18$; $\text{NTK} = 95,0$; $\text{NH}_4^+ = 27,57$; $\text{NO}_3^- = 74,5$ mg/L) em comparação descritiva com os solos, refletindo maior presença de constituintes solúveis associados à composição da FFM e à decomposição da matéria orgânica. Essas concentrações indicam maior disponibilidade de nutrientes e sais dissolvidos durante o contato com a fase aquosa.

De forma integrada, os resultados indicam que a FFM apresenta, nas condições dos ensaios, maior disponibilidade de compostos nitrogenados, matéria orgânica e sais dissolvidos em comparação aos solos naturais avaliados. Esse comportamento reforça a necessidade de considerar a composição da fase solúvel na avaliação do reaproveitamento da FFM, especialmente em aplicações nas quais possa ocorrer contato prolongado com a água.

Esses resultados devem ser interpretados como evidências de mobilidade potencial sob as condições específicas dos ensaios e não constituem, isoladamente, fundamento para a classificação formal da FFM quanto à periculosidade ou para determinar sua inadequação ao uso como material de cobertura. Assim, a avaliação de seu reaproveitamento deve integrar a caracterização físico-química, a mobilidade dos constituintes e análises ecotoxicológicas, de modo a subsidiar uma avaliação mais abrangente dos riscos ambientais associados ao material (Orupöld *et al.*, 2022).

CONCLUSÃO

A avaliação da mobilidade dos Elementos Potencialmente Tóxicos evidenciou comportamento químico heterogêneo da FFM, com diferenças entre as concentrações totais na matriz sólida e as frações mobilizáveis obtidas nos ensaios de extração. As concentrações totais de EPT determinadas na FFM não ultrapassaram os valores de investigação estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009. Contudo, a detecção de Cd no extrato lixiviado e as concentrações de As e Mn no extrato solubilizado indicam que determinados elementos podem apresentar maior disponibilidade sob as condições experimentais dos ensaios de lixiviação e solubilização.

A não detecção de Cd na matriz sólida, apesar de sua detecção no extrato lixiviado, pode estar relacionada à heterogeneidade da FFM, à representatividade da alíquota analisada ou ao fato de

sua concentração estar abaixo do limite de detecção. Esse resultado reforça a necessidade de considerar, além da composição total, a mobilidade potencial dos constituintes na avaliação ambiental da FFM.

Os ensaios de lixiviação e solubilização constituem ferramentas experimentais para caracterização da mobilidade dos constituintes e, quando interpretados segundo os critérios normativos aplicáveis, contribuem para a avaliação da periculosidade do material. Assim, a presença de determinados elementos nos extratos em concentrações superiores aos critérios estabelecidos deve ser considerada na avaliação da adequação da FFM para usos ambientais.

Os resultados obtidos não são suficientes, isoladamente, para recomendar a utilização da FFM como material de cobertura, cuja adequação depende da integração das informações químicas, ecotoxicológicas e geotécnicas às condições específicas de aplicação. Na ausência de regulamentação específica para materiais provenientes da Mineração de Aterros Sanitários destinados a essa finalidade, estudos futuros devem avaliar diferentes condições de uso e controle, incluindo a comparação da FFM com materiais convencionalmente empregados em coberturas e com solos locais não contaminados.

A avaliação da FFM isoladamente, sem mistura com outros materiais de cobertura, representou uma condição experimental mais conservadora. Investigações futuras devem, portanto, considerar diferentes proporções de mistura com solos ou outros materiais, avaliando seus efeitos sobre a mobilidade dos EPT e a segurança de uso da FFM.

A abordagem integrada adotada neste estudo fornece subsídios para a análise preliminar da segurança ambiental da FFM e para futuras avaliações de sua viabilidade como material de cobertura. Os resultados contribuem para o desenvolvimento de estratégias de recuperação e reaproveitamento de materiais provenientes da Mineração de Aterros Sanitários, em consonância com os princípios da Economia Circular.

CONTRIBUIÇÃO DOS AUTORES

Contribuição dos autores. ACLD: Conceituação, Investigação, Metodologia, Redação – rascunho original; TBJ: Conceituação, Curadoria de dados, Obtenção de financiamento, Redação e Revisão, ACSV: Conceituação, Redação e Revisão, TNC: Conceituação, Curadoria de dados, Recursos. Todos os autores editaram o manuscrito.

REFERÊNCIAS

- Abushammala, M. F. M., Basri, N. E. A., Irwan, D., & Younes, M. K. (2014). Methane Oxidation in Landfill Cover Soils: A Review. *Asian Journal of Atmospheric Environment*, 8(1), 1–14. <https://doi.org/10.5572/ajae.2014.8.1.001>
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (1992). NBR 8419: Apresentação de projetos de aterros sanitários. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. 7 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024a). NBR 10004-1: Resíduos sólidos – Classificação. Parte 1: Requisitos de Classificação. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. 29 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2024b). NBR 10004-2: Resíduos sólidos – Classificação. Parte 2: Requisitos para classificação de periculosidade. Rio de Janeiro: ABNT. 746 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004a). NBR 10005: Procedimento para obtenção de extrato lixiviado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. 16 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004b). NBR 10006: Procedimento para obtenção de extrato solubilizado de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. 3 p.
- Associação Brasileira de Normas Técnicas. (2004c). NBR 10007: Amostragem de resíduos sólidos. Rio de Janeiro, RJ: ABNT. 21 p.
- American Public Health Association. (2017). Standard methods for the examination of water and wastewater (23. ed.). Washington, DC: American Public Health Association.
- Amaral Sobrinho, N. M. B., Velloso, A. C. X., Costa, L. M., & Oliveira, C. (1998). Mobilidade de metais pesados em solo tratado com resíduo siderúrgico ácido. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22(2), 345–353. <https://doi.org/10.1590/S0100-06831998000200021>
- Ayers, R. S., & Westcot, D. W. (1994). Water quality for agriculture (Rev. ed., FAO Irrigation and Drainage Paper, 29). Food and Agriculture Organization of the United Nations.
- Brasil. (2009). Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009. *Diário Oficial da União*, Brasília, n. 249, p. 81-84.
- Burlakovs, J., Kaczala, F., Vincevica-Gaile, Z., Rudovica, V., Orupöld, K., Stapkevica, M., Bhatnagar, A., Kriipsalu, M., Hogland, M., Klavins, M., & Hogland, W. (2016). Mobility of Metals and Valorization of Sorted Fine Fraction of Waste After Landfill Excavation. *Waste and Biomass Valorization*, 7(3), 593–602. <https://doi.org/10.1007/s12649-016-9478-4>
- Burlakovs, J., Pilecka, J., Grinfelde, I., Arbidans, L., Arina, D., & Setyobudi, R. H. (2021). Sustainable landfill fine fraction of waste reuse opportunities covering layer development. *Rural and Environment Engineering*, 36, 303–310. <https://doi.org/10.22616/rrd.27.2021.043>
- Chandana, N., Goli, V. S. N. S., Mohammad, A., & Singh, D. N. (2021). Characterization and Utilization of Landfill-Mined-Soil-Like-Fractions (LFMSF) for Sustainable Development: A Critical Appraisal. *Waste and Biomass Valorization*, 12(2), 641–662. <https://doi.org/10.1007/s12649-020-01052-y>
- Chetri, J. K., & Reddy, K. R. (2021). Advancements in Municipal Solid Waste Landfill Cover System: A Review. *Journal of the Indian Institute of Science*, 101(4), 557–588. <https://doi.org/10.1007/s41745-021-00229-1>
- Coringa, J. D. E. S., Pezza, L., Coringa, E. D. A. O., & Weber, O. L. D. S. (2016). Distribuição geoquímica e biodisponibilidade de metais traço em sedimentos no Rio Bento Gomes, Poconé—MT, Brasil. *Acta Amazonica*, 46(2), 161–174. <https://doi.org/10.1590/1809-4392201502215>
- Costa, C. D. N., Meurer, E. J., Bissani, C. A., & Tedesco, M. J. (2007). Fracionamento sequencial de cádmio e chumbo em solos. *Ciência Rural*, 37(5), 1323–1328. <https://doi.org/10.1590/S0103-84782007000500016>
- Devahi, P., Rathod, D., & Muthukkumaran, K. (2025). Assessment of the leaching behavior of landfill mining waste at Tiruchirappalli City in India. *Indian Geotechnical Journal*, 55(3), 1466–1477. <https://doi.org/10.1007/s40098-024-01014-4>
- Duarte, A. C. L., Jesus, T. B., Silva, A. P., Melo, S. L., & Bomfim, T. O. (2025). Determinação da composição gravimétrica como ferramenta na tomada de decisão em projeto de mineração de aterro sanitário: estudo de caso de aterro em Recôncavo da Bahia. *Anais do 33º Congresso Brasileiro de Engenharia Sanitária e Ambiental*, Brasília/DF, Brasil. https://abes-dn.org.br/anaisletronicos/33cbesa/728_tema_iii.pdf
- Esguerra, J. L., Laner, D., Svensson, N., & Krook, J. (2021). Landfill Mining in Europe: Assessing

- the Economic Potential of Value Creation from Generated Combustibles and Fines Residue. *Waste Management*, 126, 221–230. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.03.013>
- Faitli, J., Nagy, S., Romenda, R., Gombkötő, I., Bokányi, L., & Barna, L. (2019). Assessment of a Residual Municipal Solid Waste Landfill for Prospective ‘Landfill Mining’. *Waste Management & Research*, 37(12), 1229–1239. <https://doi.org/10.1177/0734242X19881197>
- Goli, V. S. N. S., Singh, P., Singh, D. N., & Tak, L. K. (2022). Investigations on characteristics of landfill-mined-soil-like-fractions and their dependency on organic matter. *Process Safety and Environmental Protection*, 162, 795–812. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.04.052>
- Jain, M., Kumar, A., & Kumar, A. (2023). Landfill Mining: A Review on Material Recovery and Its Utilization Challenges. *Process Safety and Environmental Protection*, 169, 948–958. <https://doi.org/10.1016/j.psep.2022.11.049>
- Kaartinen, T., Sormunen, K., & Rintala, J. (2013). Case study on sampling, processing and characterization of landfilled municipal solid waste in the view of landfill mining. *Journal of Cleaner Production*, 55, 56–66. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2013.02.036>
- Kaczala, F., Mehdinejad, M. H., Lääne, A., Orupöld, K., Bhatnagar, A., Kriipsalu, M., & Hogland, W. (2017). Leaching characteristics of the fine fraction from an excavated landfill: Physico-chemical characterization. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 19(1), 294–304. <https://doi.org/10.1007/s10163-015-0418-3>
- Leme, M. A. G., Takeda, C. M., Silva, K. G., Silva, J. C. V., & Miguel, M. G. (2021). Gravimetric characterization of Brazilian municipal solid waste mined from landfill for assessment of reuse potential. 18th International Symposium on Waste Management and Sustainable Landfilling, Cisa Publisher, Cagliari, Sardinia, Italy.
- Masi, S., Caniani, D., Grieco, E., Lioi, D. S., & Mancini, I. M. (2014). Assessment of the possible reuse of MSW coming from landfill mining of old open dumpsites. *Waste Management*, 34(3), 702–710. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2013.12.013>
- Mersoni, C., & Reichert, G. A. (2017). Comparação de cenários de tratamento de resíduos sólidos urbanos por meio da técnica da Avaliação do Ciclo de Vida: O caso do município de Garibaldi, RS. *Engenharia Sanitaria e Ambiental*, 22(5), 863–875. <https://doi.org/10.1590/s1413-41522017150351>
- Orupöld, K., Somani, M., Kaczala, F., Hogland, M., Bhatnagar, A., Hogland, W., Saaremäe, E., & Kriipsalu, M. (2022). Ecotoxicity Assessment of Fine Fractions Obtained from Landfill Mining. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 26(4), 04022030. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000715](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000715)
- Parida, D., Ramana, G. V., & Datta, M. (2024). Investigation on trommeled legacy waste from full-scale mining of old dumpsites: Suitable for valorization or scientific disposal? *Journal of Environmental Management*, 356, 120580. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2024.120580>
- Parrodi, J. C. H., Höllen, D., & Pomberger, R. (2018). Characterization of Fine Fractions From Landfill Mining: A Review of Previous Investigations. *Detritus*, 2(1), 46. <https://doi.org/10.31025/2611-4135/2018.13663>
- Patel, K. S., Pandey, P. K., Martín-Ramos, P., Corns, W. T., Varol, S., Bhattacharya, P., & Zhu, Y. (2023). A review on arsenic in the environment: Contamination, mobility, sources, and exposure. *RSC Advances*, 13(13), 8803–8821. <https://doi.org/10.1039/D3RA00789H>
- Pehme, K.-M., Orupöld, K., Kuusemets, V., Tamm, O., Jani, Y., Tamm, T., & Kriipsalu, M. (2020). Field Study on the Efficiency of a Methane Degradation Layer Composed of Fine Fraction Soil from Landfill Mining. *Sustainability*, 12(15), 6209. <https://doi.org/10.3390/su12156209>
- Scheutz, C., Pedersen, G. B., Costa, G., & Kjeldsen, P. (2009). Biodegradation of Methane and Halocarbons in Simulated Landfill Biocover Systems Containing Compost Materials. *Journal of Environmental Quality*, 38(4), 1363–1371. <https://doi.org/10.2134/jeq2008.0170>
- Ślomożyńska, B., & Ślomożyński, T. (2004). Physico-Chemical and Toxicological Characteristics of Leachates from MSW Landfills. *Polish Journal of Environmental Studies*, 13, 627–637.
- Somani, M., Datta, M., Ramana, G., & Sreekrishnan, T. (2018). Investigations on fine fraction of aged municipal solid waste recovered through landfill mining: Case study of three dumpsites from India. *Waste Management & Research: The*

- Journal for a Sustainable Circular Economy, 36(8), 744–755.
<https://doi.org/10.1177/0734242X18782393>
- Somani, M., Datta, M., Ramana, G. V., & Sreekrishnan, T. R. (2019). Leachate characteristics of aged soil-like material from MSW dumps: sustainability of landfill mining. *Journal of Hazardous, Toxic, and Radioactive Waste*, 23(4), 04019014.
[https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)HZ.2153-5515.0000452](https://doi.org/10.1061/(ASCE)HZ.2153-5515.0000452)
- Somani, M., Hölzle, I., Datta, M., & Ramana, G. V. (2023). An investigation on mobility of heavy metals for assessing the reusability of soil-like material reclaimed from mining of municipal solid waste dumpsites. *Waste Management*, 167, 113–121.
<https://doi.org/10.1016/j.wasman.2023.05.028>
- Takeda, C. M., Leme, M. A. G., Romeiro, D. C., Silva, K. G., & Miguel, M. G. (2022). Variation of the Gravimetric Composition of Landfilled Municipal Solid Waste Over the Time in a Developing Country. *International Journal of Environmental Research*, 16(5), 83.
<https://doi.org/10.1007/s41742-022-00463-0>
- Teixeira, P. C., Donagemma, G. K., Fontana, A., & Teixeira, W. G. (Eds.). (2017). *Manual de métodos de análise de solo (3ª ed.)*. Embrapa Solos.
<https://www.embrapa.br/busca-de-publicacoes/-/publicacao/1085209/manual-de-metodos-de-analise-de-solo>
- Van Passel, S., Dubois, M., Eyckmans, J., De Gheldere, S., Ang, F., Tom Jones, P., & Van Acker, K. (2013). The Economics of Enhanced Landfill Mining: Private and Societal Performance Drivers. *Journal of Cleaner Production*, 55, 92–102.
<https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.03.024>
- Vollprecht, D., Hernández Parrodi, J. C., Lucas, H. I., & Pomberger, R. (2020). Case Study on Enhanced Landfill Mining at Mont-Saint-Guibert Landfill in Belgium: Mechanical Processing, Physico-Chemical and Mineralogical Characterization of Fine Fractions <4.5 mm. *Detritus*, (10), 26–43.
<https://doi.org/10.31025/2611-4135/2020.13940>
- Xiaoli, C., Shimaoka, T., Xianyan, C., Qiang, G., & Youcai, Z. (2007). Characteristics and mobility of heavy metals in an MSW landfill: Implications in risk assessment and reclamation. *Journal of Hazardous Materials*, 144(1–2), 485–491.
<https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.10.056>
- Zhou, C., Xu, W., Gong, Z., Fang, W., & Cao, A. (2015). Characteristics and Fertilizer Effects of Soil-Like Materials from Landfill Mining. *Clean – Soil, Air, Water*, 43(6), 940–947.
<https://doi.org/10.1002/clen.201400510>

Editor-Chefe

Jeamylle Nillin

Editor de Seção

Carla Eliana Davico



This is an open-access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution License.