

SÉRIE Tecnologia Ambiental

Avaliação ecotoxicológica de resíduos e rejeitos do setor mineral: Conceitos e desafios

**Cristina Lúcia Silveira Sisinno
Eduardo Cyrino Oliveira-Filho
Daniele Leonel da Rocha
Tiago Natal-da-Luz
Cláudia Duarte da Cunha**



SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

**Avaliação ecotoxicológica de resíduos e rejeitos do
setor mineral: Conceitos e desafios**

PRESIDÊNCIA DA REPÚBLICA

Luiz Inácio Lula da Silva

Presidente

MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA E INOVAÇÃO

Luciana Santos

Ministra de Estado

Luis Manuel Rebelo Fernandes

Secretário Executivo

Isa Assef dos Santos

Subsecretária de Unidades de Pesquisa e Organizações Sociais

CETEM – CENTRO DE TECNOLOGIA MINERAL

Silvia Cristina Alves França

Diretora

Robson Araujo D'Avila

Coordenador de Administração - COADM

Andréa Camardella de Lima Rizzo

Coordenadora de Planejamento, Gestão e Inovação - COPGI

Paulo Fernando Almeida Braga

Coordenador de Processamento e Tecnologias Minerais - COPTM

Marisa Nascimento

Coordenadora de Processos Metalúrgicos e Ambientais - COPMA

Leonardo Luiz Lyrio da Silveira

Coordenador de Rochas Ornamentais - CORON

Arnaldo Alcover Neto

Coordenador de Análises Minerais - COAMI

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

ISSN 0103-7374

STA - 144

Avaliação ecotoxicológica de resíduos e rejeitos do setor mineral: Conceitos e desafios

Cristina Lúcia Silveira Sisinno

Bióloga, D. Sc. em Ciências, Pesquisadora Bolsista PCI do CETEM/MCTI.

Eduardo Cyrino Oliveira-Filho

Biólogo, D. Sc. em Ciências, Pesquisador da EMBRAPA Cerrados (Brasília - DF).

Daniele Leonel da Rocha

Química, D. Sc. em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Tecnologista do CETEM/MCTI.

Tiago Natal-da-Luz

Biólogo, D. Sc. em Ecologia, Diretor da *Clover Strategy* (Coimbra - Portugal).

Cláudia Duarte da Cunha

Engenheira Química, D. Sc. em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos, Tecnologista do CETEM/MCTI.

CETEM/MCTI

2026

SÉRIE TECNOLOGIA AMBIENTAL

Editor: Flávio de Almeida Lemos

Subeditor: Antonieta Middea

CONSELHO EDITORIAL: Saulo Rodrigues P. Filho (UNB), Jorge Rubio (UFRGS), José Ribeiro Aires (CENPES), Luis Enrique Sánchez (EPUSP), Virginia Sampaio Ciminelli (UFMG), Luís Alberto Dantas Barbosa (UFBA), Ricardo Melamed (UNB), Marcello F. Veiga (University of British Columbia-Canadá), Bruce Marshall (University of British Columbia-Canadá).

Não existe uma definição única que se enquadre na ampla diversidade que o tema “Tecnologias Ambientais” abrange. Em primeiro lugar, o campo das Tecnologias Ambientais é caracterizado por um alto grau de diversidade e heterogeneidade. Em geral, o termo é usado para incluir tecnologias e aplicações que supostamente ajudam a reduzir o impacto negativo da atividade industrial e dos serviços, de usuários privados ou públicos, no meio ambiente. O conceito se refere, normalmente, a tecnologias “no final do processo” (end-of-pipe) integradas a tecnologias limpas e de recuperação de áreas contaminadas. No entanto, também pode abranger questões de sentido mais amplo, como monitoramento, medição, mudança de produtos ou gerenciamento de sistemas ambientais. As tecnologias ambientais são, portanto, de natureza interdisciplinar e podem ser aplicadas em qualquer etapa da cadeia produção-consumo. Tendo isso em mente, a *Série de Tecnologia Ambiental* tem por objetivo congrega especialistas, tais como: pesquisadores, tecnologistas, professores etc., do CETEM em particular, para que divulguem suas pesquisas em áreas tão diversas para servirem como estímulo para os novos e futuros pesquisadores.

There is no single definition that fits the wide diversity that the theme “Environmental Technologies” covers. First, the field of Environmental Technologies is characterized by a high degree of diversity and heterogeneity. In general, the term is used to include technologies and applications that are supposed to help reduce the negative impact of industrial activities and services, by private or public users, on the environment. The concept usually refers to technologies “at the end of the process” (end-of-pipe) integrated with clean technologies and recovery of contaminated areas. However, it can also cover broader issues such as monitoring, measuring, changing products or managing environmental systems. Environmental technologies are, therefore, of an interdisciplinary nature and can be applied at any stage of the production-consumption chain. Bearing this in mind, the “Environmental Technology Series” aims at bringing together specialists, such as: researchers, technologists, professors etc., from CETEM in particular, to disseminate their research in such diverse areas to serve as a stimulus for new and future researchers.

O conteúdo desse trabalho é de responsabilidade exclusiva do(s) autor(es).

Copyright © 2026 CETEM/MCTI

Todos os direitos reservados.

Qualquer parte desta publicação pode ser reproduzida, desde que citada a fonte e atribuídos os devidos créditos. (Lei n. 9.610, de 19/2/1998)

Valéria Cristina de Souza
Diagramação e Editoração Eletrônica

André Luiz Costa Alves
Projeto Gráfico

Informações:

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Av. Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Homepage: www.cetem.gov.br

CIP – Catalogação na Publicação

A945

Avaliação ecotoxicológica de resíduos e rejeitos do setor mineral: conceitos e desafios / Cristina Lúcia Silveira Sisinno [et al.] – Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2026.
82 p. – (Série Tecnologia Ambiental; 144).

ISBN 978-65-5919-119-2.

1. Avaliação ecotoxicológica. 2. Resíduos. 3. Setor mineral.
4. Reuso 5. Impacto ambiental. I. Sisinno, Cristina L.S. II. Oliveira-Filho, Eduardo Cyrino. III. Rocha, Daniele, L. IV. Natal-da-Luz, Tiago. V. Cunha, Cláudia. VI. Centro de Tecnologia Mineral. VII. Série.

CDD 628.44

Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca do CETEM/MCTI
Bibliotecário(a) Rosana Silva de Oliveira CRB7 – 5849

SUMÁRIO

RESUMO	7
ABSTRACT	8
1 INTRODUÇÃO	9
2 RESÍDUOS E REJEITOS DO SETOR MINERAL	12
2.1 Resíduos	13
2.2 Rejeitos	15
3 AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA	17
3.1 Conceitos	17
3.2 Organismos-Teste	21
3.3 Aplicações	27
4 METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA	33
4.1 Amostras Líquidas	34
4.2 Amostras Sólidas	34
5 A AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA NA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS	37
6 IMPACTO AMBIENTAL E ESTUDOS DE CASOS	43
7 DESAFIOS PARA O APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS E REJEITOS DE MINERAÇÃO	55
8 CONSIDERAÇÕES FINAIS	62
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	63

RESUMO

Nos últimos anos, devido ao aumento na demanda por insumos minerais houve um grande crescimento das atividades da mineração e em consequência, o incremento da geração de emissões atmosféricas, efluentes líquidos e de resíduos e rejeitos originados deste setor. O setor mineral produz uma grande quantidade de resíduos e rejeitos com potencial de afetar a qualidade do ar, do solo e das águas superficiais e subterrâneas. Deste modo, é notória a preocupação com as questões relativas à produção e destinação dos materiais advindos da atividade mineral, para que sejam evitados não apenas todos os custos associados a eles, bem como os impactos negativos à saúde humana e ao meio ambiente ocasionados pelo seu gerenciamento inadequado. Uma das práticas que tem sido adotada é a inclusão destes materiais em novos ciclos produtivos, em atendimento aos preceitos da Economia Circular. Entretanto, muitos destes materiais carregam substâncias químicas presentes naturalmente nas rochas e a avaliação ecotoxicológica não tem sido aplicada em muitos casos – apesar do amplo arcabouço de normas técnicas brasileiras na área de ecotoxicologia –, principalmente devido ao desconhecimento na sua utilização e pelas lacunas nos instrumentos regulatórios. Nesta perspectiva, a utilização de ensaios ecotoxicológicos é um importante instrumento para avaliar os possíveis efeitos adversos destes materiais originados do setor mineral, para que estes sejam reaproveitados de forma segura, principalmente no caso de sua utilização na agricultura, ou em outras aplicações onde estes possam se transformar em fontes secundárias de contaminação para o ambiente.

Palavras-chave

Avaliação ecotoxicológica, resíduos, setor mineral, reuso, impacto ambiental.

ABSTRACT

In recent years, the growing demand for mineral inputs has led to a significant expansion of mining activities and, consequently, to an increase in atmospheric emissions, liquid effluents, and the generation of waste and tailings from this sector. The mineral industry produces substantial quantities of waste and tailings with the potential to affect the quality of air, soil, and both surface and groundwater. Therefore, concerns regarding the production and disposal of materials from mining activities are well justified not only to avoid the economic costs associated with these by-products but also to prevent the negative impacts on human health and the environment resulting from their improper management. One strategy increasingly adopted to address this issue is the incorporation of these materials into new production cycles, in accordance with the principles of the Circular Economy. However, many of these materials contain chemical substances naturally present in rocks, and ecotoxicological assessments have often not been conducted – despite the existence of a comprehensive framework of Brazilian technical standards in the field of ecotoxicology –, mainly due to limited knowledge about their use and existing gaps in regulatory instruments. In this context, the application of ecotoxicological tests represents an important tool for assessing the potential adverse effects of materials derived from the mineral sector. Such evaluations are essential to ensure their safe reuse, particularly in agriculture and other applications where these materials could become secondary sources of environmental contamination.

Keywords

Ecotoxicological evaluation, waste, mineral sector, reuse, environmental impact.

1 | INTRODUÇÃO

A mineração é uma atividade econômica e industrial que engloba um conjunto de atividades destinadas a pesquisar, descobrir, mensurar, extrair, tratar ou beneficiar e transformar recursos minerais, de forma a torná-los benefícios econômicos e sociais (IBRAM, 2016).

Nos últimos anos, devido ao aumento na demanda por insumos minerais, houve um grande crescimento das atividades da mineração, inclusive com relação à viabilidade à lavra e ao beneficiamento de minérios com teores sucessivamente mais baixos (IBRAM, 2016). Como consequência do aumento destas atividades houve o incremento da geração de emissões atmosféricas, de efluentes líquidos e de resíduos e rejeitos em estado sólido ou semissólido originados deste setor.

De acordo com os dados de 2022, do Escritório de Estatística da União Europeia (Eurostat), a segunda maior fração de resíduos produzidos na Europa provém do setor de mineração (22,7%, atrás apenas do setor de construção e demolição com 38,4%) (EU, 2022).

Segundo descrito no Plano Nacional de Resíduos Sólidos, os resíduos sólidos gerados durante as atividades de mineração podem ser resíduos minerais e resíduos não minerais, sendo que para os resíduos minerais ainda há uma divisão entre os estéreis (resíduos sólidos da extração) e os rejeitos (resíduos sólidos do tratamento/beneficiamento) (BRASIL, 2022).

A atividade mineral pode ser encontrada, em maior ou menor escala e em diferentes modalidades, por todo o Estado de Minas Gerais, fazendo dele a principal unidade da federação em extração e comercialização de bens minerais, principalmente de minerais

metálicos (MINAS GERAIS, 2020). O Estado de Minas Gerais é o único que realiza e disponibiliza ao público pela Fundação Estadual do Meio Ambiente (FEAM, órgão ambiental de MG) o Inventário Estadual de Resíduos de Mineração (BRASIL, 2022).

Segundo dados da FEAM, o total de resíduos de mineração inventariados no Estado de Minas Gerais foi de mais de 562 milhões de toneladas no período de janeiro a dezembro de 2017; número que considera 307 empresas sediadas no Estado, em função das 6 tipologias avaliadas (lavra subterrânea; lavra a céu aberto; extração de areia, cascalho e argila, para utilização na construção civil; extração de água mineral potável de mesa; unidades operacionais em área de mineração, inclusive unidades de tratamento de minerais; exploração e extração de gás natural ou de petróleo). Deste total, 289,9 milhões de toneladas foram de rejeito, representando 51,55%; 272,2 milhões de toneladas (48,41%) de estéril e 242,1 mil toneladas (0,04%) foram de resíduos (MINAS GERAIS, 2018).

De acordo com a Política Nacional de Resíduos Sólidos (PNRS) a não geração dos resíduos deve ser a ação prioritária no gerenciamento dos resíduos, seguida da redução (BRASIL, 2010). Entretanto, tanto as atividades relacionadas à não geração como à redução de resíduos ainda se mostram incipientes no Brasil, não havendo indicadores que demonstrem o volume de material que deixou de ser descartado ou que foi reduzido (BRASIL, 2022). Este cenário também se aplica aos resíduos produzidos no setor mineral. A redução na geração dos resíduos, muitas vezes, pode ocorrer por melhorias nos processos, renovação de equipamentos, melhor rendimento na obtenção do recurso mineral de interesse, por meio de pesquisa e desenvolvimento, entre outros (BRASIL, 2022).

Na ordem da hierarquia da PNRS, após a não geração e a redução está a reutilização dos resíduos (BRASIL, 2010). Desta forma, e com base nos preceitos da Economia Circular, há uma necessidade crescente de que o setor de mineração também incremente ações para que seus materiais sejam incorporados em outros ciclos produtivos e não apenas destinados de forma adequada.

Entretanto, deve-se ressaltar que estes materiais podem conter substâncias presentes naturalmente nas rochas que podem ser tóxicas e por isso devem ser avaliados previamente para prevenir possíveis efeitos adversos decorrentes de sua utilização.

Nos tempos atuais a questão da sustentabilidade é um desafio relevante para o mercado de mineração, onde destaca-se a importância da formação de um ecossistema de aproveitamento de toda a cadeia de minério e resíduos de mineração, conforme as boas práticas ambientais, sociais e de governança (ESG – *Environment, Social and Governance*) e da Economia Circular. O caminho passa pela inovação em processos e técnicas de reciclagem e reaproveitamento para reutilização destes materiais, de forma segura e sustentável.

Deste modo, a avaliação ecotoxicológica é um importante instrumento para avaliar o impacto no ambiente do reaproveitamento destes materiais em outros ciclos produtivos e de forma segura, como por exemplo no caso de sua aplicação na agricultura ou em outras aplicações onde estes possam se transformar em fontes secundárias de contaminação para o ambiente e afetar o equilíbrio dos ecossistemas e a saúde humana.

2 | RESÍDUOS E REJEITOS DO SETOR MINERAL

Na atividade de mineração, grandes volumes e massas de materiais são extraídos e movimentados. A quantidade de resíduos gerada pela atividade depende do processo utilizado para extração do minério, da concentração da substância mineral estocada na rocha matriz e da localização da jazida em relação à superfície (IBRAM, 2022).

Diferentes materiais em estado sólido e semissólido são produzidos durante os processos que envolvem as atividades do setor mineral. Estes materiais são originados do processo de extração – o estéril – e do tratamento ou beneficiamento – o rejeito. Eles podem ser representados, de um modo geral, por pilhas de minérios pobres, estéreis, rochas, sedimentos, solos, aparas e lamas das serrarias de rochas ornamentais (p. ex. mármore e granito), as polpas de decantação de efluentes, as sobras da mineração artesanal de pedras preciosas e semipreciosas – principalmente em regiões de garimpo – e finos e ultrafinos não aproveitados no beneficiamento (IBRAM, 2016).

Deve-se ressaltar, contudo, a distinção entre as tipologias de minérios metálicos e não metálicos, onde a geração de rejeitos e estéreis são diferentes (BRASIL, 2022). A mineração dos não metálicos é potencialmente geradora de estéreis, enquanto os rejeitos da mineração de metálicos são gerados na transformação mineral, que se destaca por ser a sequência da cadeia produtiva da mineração (IBRAM, 2016).

Além destes materiais, outros resíduos resultantes da operação das plantas de mineração são, em geral: pneus, baterias utilizadas em veículos e maquinários, lodos de estação de tratamento de

efluentes, resíduos de madeira, sucatas e resíduos de óleo etc. (BRASIL, 2022; CARVALHO *et al.*, 2017). A seguir são apresentados alguns conceitos necessários para a distinção destes materiais.

2.1 | Resíduos

De acordo com a norma ABNT NBR 17100-1 – Gerenciamento de Resíduos – Parte 1 – Requisitos Gerais, o material será considerado resíduo caso seja descartado (ABNT, 2023).

Segundo a ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Parte 1 – Requisitos de Classificação, “resíduo sólido é todo material, objeto ou bem descartado, resultante de atividades humanas em sociedade, cuja destinação final se procede, se propõe a proceder ou se está obrigado a proceder no estado sólido ou semissólido, bem como gases contidos em recipientes e líquidos cujas particularidades tornem inviável o seu lançamento na rede pública de esgotos ou em corpos d’água, ou que exijam, para isso, soluções técnica ou economicamente inviáveis em face da melhor tecnologia disponível” (ABNT, 2024a).

Os resíduos de mineração são gerados nas atividades de pesquisa, extração ou beneficiamento de minérios (BRASIL, 2010).

Alguns materiais são descritos na norma ABNT NBR 10004 – Resíduos Sólidos – Parte 2 – Sistema Geral de Classificação de Resíduos (SGCR) como resíduos do setor de mineração, passíveis de serem classificados como resíduos perigosos ou resíduos não perigosos (com entrada única ou espelho, de acordo com as orientações descritas na citada norma), como por exemplo:

- Estéreis da extração de minérios metálicos e não metálicos;
- Estéreis da extração de minérios geradores de ácidos, resultantes da transformação de sulfuretos (formadores de drenagem ácida);
- Resíduos da transformação física e química de minérios metálicos (beneficiamento do minério);
- Outros resíduos contendo substâncias perigosas, resultantes da transformação física e química de minérios metálicos;
- Outros resíduos não especificados contendo substâncias ou propriedades que conferem periculosidade;
- Poeiras, pós e outros resíduos resultantes da transformação física e química de minérios metálicos;
- Lamas vermelhas da produção de alumina;
- Rejeitos de mineração geradores de ácidos, resultantes da transformação de sulfuretos (formadores de drenagem ácida);
- Outros rejeitos contendo substâncias perigosas etc. (ABNT, 2024b).

2.2 | Rejeitos

A Resolução ANM Nº 85/2021 descreve que o rejeito é o material descartado durante e/ou após o processo de beneficiamento (BRASIL, 2021), que tem como objetivo o concentrado de interesse, por meios de processos químicos e/ou mecânicos (BRASIL, 2018). Trata-se de um material que, sob as condições econômicas e tecnológicas vigentes no momento de sua geração, não apresenta opções para aproveitamento econômico (BRASIL, 2018; DIAS *et al.*, 2022).

As características dos rejeitos variam de acordo com o tipo de mineral e de seu beneficiamento, podendo ser finos – compostos de siltes e argilas, depositados sob a forma de lama (polpa) –, ou formados por materiais arenosos, apresentando granulometria mais grossa, denominados então como rejeitos granulares (CARVALHO *et al.*, 2017).

Dentre os resíduos minerais relacionados às atividades de mineração declarados pelas empresas junto ao IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis) descritos como estéreis estão os resíduos da extração de minérios metálicos e de minérios não metálicos; e como rejeitos estão os rejeitos contendo substâncias perigosas e os rejeitos não perigosos (BRASIL, 2022).

No caso de resíduos não minerais deste setor, os principais descritos são:

- Solos e rochas contendo substâncias perigosas;
- Misturas de resíduos contendo, pelo menos, um resíduo perigoso;
- Resíduos líquidos contendo substâncias perigosas;

- Resíduos contendo hidrocarbonetos;
- Óleo de motores, transmissões e lubrificação usados ou contaminados; e
- Sucatas metálicas ferrosas (BRASIL, 2022).

Segundo Carvalho *et al.* (2017), estéreis são materiais inertes provenientes do decapeamento superficial da lavra, que são mantidos na própria mina – geralmente em pilhas –, ou são utilizados no preenchimento de cavas exauridas.

Apesar do Brasil possuir uma baixa taxa de geração de estéril, quando comparado aos demais países produtores, os altos volumes de produção de minério de ferro foram responsáveis por um volume superior a trezentos milhões de toneladas em 2014. Considerando uma densidade do estéril de $1,3 \text{ t/m}^3$, isso corresponderia a um volume de cerca de 230 milhões de m^3 , superior a 150 estádios iguais ao Maracanã (CARVALHO *et al.*, 2017).

3 | AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA

3.1 | Conceitos

A ecotoxicologia é o estudo do destino e dos efeitos de uma substância química sobre os ecossistemas. Mais recentemente Di Giulio e Newman (2021) especificam ainda mais o conceito, deixando claro que o denominado estudo se refere aos efeitos sobre a biosfera e seus componentes. A definição da ciência tem sofrido constantes adaptações e atualizações ao longo do tempo, mas o termo ecotoxicologia foi inicialmente proposto por René Truhaut, em 1969, como um ramo da toxicologia ligado à ecologia, e voltado para conhecer os efeitos adversos das substâncias sobre os ecossistemas (TRUHAUT, 1977).

Embora o termo ecotoxicologia tenha sido criado somente em 1969, o estudo dos efeitos das substâncias químicas sobre organismos aquáticos já vinha sendo objeto de trabalho da ecologia e mais especificamente da toxicologia aquática, uma ciência formada nas bases da clássica toxicologia humana. Dados de literatura apresentam estudos de efeitos de substâncias sobre organismos aquáticos desde a 2ª Guerra Mundial (OLIVEIRA-FILHO, 2013).

Desse modo, as avaliações de ecotoxicidade tiveram como foco inicial os ensaios com organismos vivos para determinar o efeito letal após exposição à altas doses ou concentrações dos agentes químicos testados: os conhecidos ensaios de toxicidade aguda. Todavia, com a evolução dos tempos e o constante aumento do número de substâncias químicas lançadas no ambiente, foi possível observar que era necessário antecipar-se ao efeito letal, de modo a prevenir ou evitar possíveis danos aos ecossistemas.

A partir daí surgem os ensaios crônicos, buscando não observar a letalidade, mas sim, possíveis efeitos fisiológicos causados por exposições prolongadas à pequenas doses ou concentrações. O foco agora passaria a ser os danos sobre aspectos celulares, bioquímicos, comportamentais ou reprodutivos, que podem reduzir populações, sem necessariamente serem letais aos indivíduos.

Hoje, a ecotoxicologia já se encontra bastante avançada e modernizada. Ensaio com várias espécies, avaliações de risco ecológico ou mesmo os ensaios moleculares, tem levado os estudos para níveis bem mais específicos, aplicados e com maior precisão científica.

A inserção dos ensaios ecotoxicológicos na legislação ambiental de vários países, incluindo o Brasil, também foi um fator de aumento da relevância desta ciência no âmbito internacional. A partir desse momento a ecotoxicologia passa a ser efetivamente reconhecida e necessária como uma ferramenta aplicada na identificação e resolução de problemas ambientais.

A avaliação ecotoxicológica consiste na exposição de organismos-teste (espécies padronizadas) representativas do ambiente a várias concentrações de uma ou mais substâncias (misturas de substâncias, muito comum no caso de amostras ambientais), durante um determinado período de tempo. Posteriormente são observados efeitos sobre as funções biológicas fundamentais, como crescimento, reprodução e sobrevivência, que afetam diretamente as características das diversas comunidades aquáticas e terrestres. Em geral, recomenda-se a realização de ensaios com diferentes níveis tróficos da cadeia (OLIVEIRA-FILHO, 2013).

Estes ensaios descrevem uma relação concentração-resposta, na qual um efeito biológico (*endpoint*) é medido (HENNEBERT, 2018) e podem ser agudos (de curta duração, em relação à vida útil do organismo testado) ou crônicos (longa duração, incluindo parte ou todo o ciclo de vida do organismo) (BANDARRA *et al.*, 2019).

Uma vez que cada espécie apresenta uma sensibilidade diferente a diferentes tipos de substâncias, é incorreto extrapolar a resposta de uma espécie para outra. Por este motivo, é recomendada a utilização de uma bateria de ensaios, incluindo os realizados em matriz aquosa e em amostras sólidas e semissólidas com organismos de diferentes níveis tróficos/funcionais, considerando diferentes tipos de efeitos (p. ex. fisiológico e comportamental) e diferentes cenários de exposição (p. ex. curto e longo prazo), de modo a serem obtidos resultados mais confiáveis (MOSER; RÖMBKE, 2009).

Os resultados das avaliações ecotoxicológicas são geralmente expressos das seguintes formas:

- CL50: Concentração Letal 50% – concentração da amostra/substância-teste, nominal ou real, que causa um efeito (por exemplo, na sobrevivência) em 50% dos organismos-teste, nas condições de ensaio. A concentração nominal é a concentração não quantificada com análise química, enquanto a concentração real é quantificada com esta análise (ABNT, 2022);
- CEx ou CE_p: Concentração de Efeito para x% – concentração da amostra/substância-teste que causa um efeito em x% dos organismos-teste dentro de um determinado período de exposição, quando comparado ao controle. Por exemplo, a CE₅₀ é uma concentração

estimada que causa um efeito (por exemplo, inibição da reprodução), em 50% de uma população exposta às condições do ensaio (ABNT, 2019, 2024e);

- CENO: Concentração de Efeito Não Observado – maior concentração da amostra/substância-teste imediatamente abaixo da CEO, em que nenhum efeito é observado (ABNT, 2024e);
- CEO: Concentração de Efeito Observado – menor concentração da amostra/substância-teste que tem um efeito estatisticamente significativo (probabilidade $p < 0,05$) (ABNT, 2024e).

Além destas expressões mais comuns, na norma da ABNT NBR ISO 17616 – Qualidade do Solo – Guia para a Seleção e a Avaliação de Bioensaios para Caracterização Ecotoxicológica de Solos e Materiais de Solo, também existe a expressão LID: Menor Valor de Diluição Ineficaz (do inglês *Lower Ineffective Dilution*) – menor valor do fator de diluição para o qual o ensaio indica uma redução relevante da ecotoxicidade (por exemplo, 20% de inibição de luminescência) (ABNT, 2010).

Ao final do ensaio, para uma amostra sem diluição (determinação qualitativa), se não houver diferença estatisticamente significativa em relação ao controle, o resultado pode ser expresso como “não tóxico”. Se houver diferença significativa, o resultado deve ser expresso como “tóxico”. Caso ocorra diferença significativa no parâmetro avaliado (p. ex. letalidade) em relação ao controle, dentro do período estipulado do ensaio (p. ex. até 48 h, após o início do ensaio), o resultado pode ser considerado como “efeito agudo” (ABNT, 2022).

Os ensaios ecotoxicológicos com organismos vivos podem fornecer informações mais precisas e realísticas sobre os efeitos das variáveis ambientais que são capazes de afetar a toxicidade das substâncias aos componentes vivos de um ecossistema. Desse modo, apenas por meio desses ensaios pode-se indicar uma resposta mais precisa da toxicidade dos contaminantes presentes no ambiente e biodisponíveis para os organismos vivos (SISINNO *et al.*, 2019).

O desenvolvimento de um ensaio ecotoxicológico com base em metodologias reconhecidas permite a produção de resultados que possam expressar a confiabilidade e a qualidade do ensaio (SISINNO; SÁFADI, 2013). Vários organismos-teste terrestres e aquáticos podem ser utilizados em ensaios padronizados por normas técnicas brasileiras da Associação Brasileira de Normas Técnicas (ABNT) para a avaliação da ecotoxicidade. Além das normas brasileiras, normas internacionais da ISO (*International Organization for Standardization*) e OECD (*Organisation for Economic Co-Operation and Development*) também têm sido amplamente utilizadas no Brasil.

3.2 | Organismos-Teste

Organismos-teste, também chamados como espécies-teste, são utilizados para medir ou avaliar a ecotoxicidade de substâncias químicas. Nesse contexto, dependendo do ecossistema que seja alvo da substância a ser testada, podem ser utilizados organismos aquáticos ou terrestres.

Os bioensaios ou ensaios de toxicidade, consistem na exposição de uma população de organismos específica ou multiespecífica a determinadas doses ou concentrações de uma substância, por um

período de tempo definido. Em geral, tais espécies são previamente definidas e padronizadas em protocolos de ensaio, principalmente por serem organismos com biologia e ecologia bem conhecidas e estudadas, além de serem de fácil manutenção em laboratório.

Os organismos selecionados para os ensaios ecotoxicológicos devem ter um conjunto de características específicas, destacando-se uma elevada e constante sensibilidade a diferentes substâncias, disponibilidade e abundância, facilidade de cultivo e adaptação a condições laboratoriais, uniformidade e estabilidade genética das populações laboratoriais, representatividade relativamente ao seu nível trófico/funcional e, idealmente, relevância, considerando o compartimento ambiental avaliado (COSTA *et al.*, 2008; LAPA *et al.*, 2002).

Os organismos utilizados nos ensaios podem ser provenientes diretamente do ambiente natural, cultivados em laboratório ou adquiridos de produtores especializados. Independentemente da procedência, é fundamental que eles sejam mantidos em condições apropriadas e que sua aquisição seja feita com fornecedores de qualidade, que garantam sua manutenção adequada antes que os organismos sejam utilizados nos ensaios (SISINNO; SÁFADI, 2013).

A sensibilidade dos organismos-teste deve ser avaliada por meio de uma substância de referência como, por exemplo, cloreto de sódio (ABNT, 2022) ou ácido bórico (ABNT, 2019). A escolha da substância de referência deve ser realizada com critério, levando em conta potenciais riscos à saúde humana e ao meio ambiente (ABNT, 2022).

De forma a representar os ecossistemas de uma maneira significativa, recomenda-se que sejam realizados ensaios com

pelos menos três espécies diferentes, e que cada uma seja representante de um nível trófico diferente. Entre os decompositores, se destacam as espécies de microrganismos *Aliivibrio fischeri* (anteriormente *Vibrio fischeri*), onde o ensaio avalia o efeito sobre a bioluminescência; *Spirillum volutans*, onde são observados os efeitos sobre a mobilidade; *Pseudomonas putida*, onde é avaliado o efeito sobre o consumo de oxigênio. No caso dos organismos produtores, as microalgas se colocam entre os grupos mais utilizados, tanto para ecossistemas dulcícolas como marinhos. Nesse grupo, em geral, são observados efeitos sobre a inibição do crescimento e as espécies mais utilizadas são as clorofíceas de água doce *Raphidocelis subcapitata* (anteriormente *Pseudokirchneriella subcapitata* e *Selenastrum capricornutum*), *Chlorella vulgaris* e *Scenedesmus subspicatus*, além das marinhas *Skeletonema costatum*, *Tetraselmis chuii*, *Phaeodactylum tricornutum* e *Isochrysis galbana*. Os ensaios com microalgas são considerados ensaios crônicos de curta duração, pois avaliam o efeito sobre a multiplicação celular (crescimento da colônia).

Com relação ao grupo dos consumidores primários, ou seja, os herbívoros aquáticos, microcrustáceos são os organismos mais utilizados nos ensaios de ecotoxicidade. Com os microcrustáceos são aplicados ensaios para avaliar a letalidade e a mobilidade, ou efeitos crônicos, para avaliar a reprodução. Os cladóceros dos gêneros *Daphnia* sp. e *Ceriodaphnia* sp. são os principais representantes, com várias espécies: *D. magna*, *D. similis*, *D. pulex* ou *C. dubia*. Entre os crustáceos marinhos, espécies do gênero *Artemia* sp. e *Hyalella azteca* também são utilizados, sendo essa última indicada para avaliação da ecotoxicidade de sedimentos. Microcrustáceos como *Mysidopsis juniae* e *Mysidium gracile*, juntamente com outros anfípodos e copépodos marinhos e

estuarinos também têm sido utilizados para a avaliação de amostras de ecossistemas aquáticos.

Sobre a avaliação de sedimentos contaminados, os grupos mais utilizados são invertebrados bentônicos como as larvas do inseto *Chironomus sp.*, o crustáceo *Gammarus lacustris* (além de *H. azteca*, citada anteriormente) e os moluscos *Biomphalaria sp.*

Ouriços-do-mar (*Lytechinus variegatus* e *Echinometra lucunter*) e embriões de bivalves também podem ser usados em avaliações com amostras marinhas.

Os consumidores secundários mais conhecidos dos ecossistemas aquáticos são os peixes. Com grandes variações de tamanhos, inúmeras espécies têm sido utilizadas nos ensaios ecotoxicológicos. Em geral, nas avaliações ecotoxicológicas, os peixes representam os vertebrados dos ecossistemas aquáticos. Tamanho representatividade tem gerado contínua evolução nos ensaios envolvendo esse grupo de organismos. Na ecotoxicologia tem-se priorizado as espécies menores e de manejo mais fácil para utilização em laboratório. Nesse contexto, destaca-se o *Danio rerio* (anteriormente *Brachydanio rerio*), também conhecido como *zebrafish* ou paulistinha. Os principais ensaios envolvem a avaliação de efeitos sobre adultos, larvas e embriões, com a observação de diferentes desfechos, indo desde a letalidade (Figura 1) até a geração de malformações embrionárias. Outras espécies de peixes como *Poecilia reticulata* e *Pimephales promelas* também são usadas em ensaios de ecotoxicidade, com normas padronizadas disponíveis.

Com relação aos organismos terrestres, grande parte dos estudos são realizados com minhocas (*Eisenia fetida* e *E. andrei*) para avaliação da toxicidade aguda, crônica ou do comportamento de fuga. A Figura 2 mostra um ensaio de comportamento de fuga com minhocas.



Fonte: Eduardo C. Oliveira-Filho, 2010.

Figura 1. Ensaio de letalidade com peixes (*Danio rerio*).



Fonte: Cristina Sisinno, 2008.

Figura 2. Ensaio de comportamento de fuga com minhocas (*Eisenia fetida*).

Outros invertebrados como enquitreídeos (*Enchytraeus crypticus* e *E. albidus*) e colêmbolos (*Folsomia candida*), e espécies de plantas, incluindo monocotiledôneas (p. ex. *Avena sativa*) e dicotiledôneas (p. ex. *Lycopersicon esculentum*) também estão sendo utilizados para avaliação ecotoxicológica de amostras sólidas. As Figuras 3 e 4 mostram os organismos *E. crypticus* e *F. candida*, respectivamente.



Fonte: Patrícia Ferreira, 2025 (*Clover Strategy*).

Figura 3. Enquitréideos (*E. crypticus*) (Aumento de 10x).



Fonte: Patrícia Ferreira, 2025 (*Clover Strategy*).

Figura 4. Colêmbolos (*F. candida*) (Aumento de 10x).

Ensaio com outros organismos como caracóis (*Cornu aspersum*, conhecido antes como *Helix aspersa*), nematódeos (*Caenorhabditis elegans*), rotíferos (*Brachionus calyciflorus*) e bactérias (*Arthrobacter globiformis*) também são sugeridos para serem aplicados em amostras de solos e materiais de solo, além de ensaios de genotoxicidade com as bactérias *Salmonella choleraesuis* subsp. *choleraesuis* e *Salmonella typhimurium* TA 98 e TA 100 (ABNT, 2010, 2025b; ISO, 2019a) (ver item 3.3).

Destaca-se que nos últimos anos também tem sido discutida a questão da sustentabilidade na área da ecotoxicologia, com a sugestão do uso de ensaios que necessitem de uma quantidade menor de amostras (p. ex. com o uso de organismos-teste menores); sejam fáceis de manusear, econômicos e rápidos; e que possam gerar menos resíduos (p. ex. plástico originado dos recipientes de ensaio). Marques *et al.* (2018) citam o ensaio com *A. globiformis* – uma bactéria de solo aeróbica e não patogênica que sintetiza uma enzima extracelular durante diferentes processos metabólicos –, e Höss e Römbke (2019) descrevem o ensaio com *C. elegans* como alguns destes ensaios, adequados para avaliar amostras de solos e resíduos sólidos.

3.3 | Aplicações

Os ensaios ecotoxicológicos podem ser utilizados para várias finalidades, entre elas o monitoramento de descargas ou lançamentos de substâncias no ambiente, a prevenção de impactos de possíveis acidentes ou usos incorretos de substâncias químicas, ou mesmo a simples comparação entre os efeitos de diferentes substâncias.

Atualmente, no Brasil, a legislação exige a realização de ensaios ecotoxicológicos nas seguintes condições:

- Registro e avaliação do potencial de periculosidade ambiental (PPA) de agrotóxicos, seus componentes e afins (Portaria Normativa IBAMA nº 84/1996, incluindo as alterações publicadas na Portaria nº 6/2012) (BRASIL, 1996);

- Concessão do registro de dispersantes químicos empregados nas ações de combate a derrame de petróleo no mar (Instrução Normativa IBAMA nº 1/2000) (BRASIL, 2000);
- Classificação dos corpos de água, diretrizes ambientais para o seu enquadramento e estabelecimento das condições e padrões de lançamento de efluentes (Resolução CONAMA nº 357/2005, alterada pela Resolução 410/2009 e pela 430/2011) (BRASIL, 2005);
- Descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural (Resolução CONAMA nº 393/2007) (BRASIL, 2007);
- Condições e padrões de lançamento de efluentes líquidos (Resolução CONAMA nº 430/2011) (BRASIL, 2011);
- Gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional (Resolução CONAMA nº 454/2012) (BRASIL, 2012);
- Condições ambientais de uso e descarte de fluidos, cascalhos e pastas de cimento nas atividades de perfuração marítima de poços de produção de petróleo e gás (Instrução Normativa IBAMA nº 1/2018) (BRASIL, 2018).

A Resolução CONAMA nº 420, de 28 de dezembro de 2009, que dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo, indica que nas situações em que a existência de determinada Área Contaminada sob Investigação (AI) ou Área Contaminada sob Intervenção (ACI) possa implicar em impactos significativos aos recursos ambientais, o gerenciamento do risco poderá se basear nos resultados de uma Avaliação de Risco Ecológico (ARE), a

critério do órgão ambiental competente (BRASIL, 2009). O Estado de São Paulo possui uma norma técnica própria para a ARE, com o procedimento de investigação que deve ser executado quando um bem ecológico a ser protegido for identificado, durante a execução das etapas do Gerenciamento de Áreas Contaminadas. Devem ser selecionadas Linhas de Evidência, ou seja, informações específicas (Química, Ecotoxicológica e Ecológica) que dizem respeito a algum aspecto importante do ambiente, as quais serão utilizadas para a avaliação das hipóteses definidas. A Linha de Evidência Ecotoxicológica envolve a realização de ensaios em laboratório com amostras da área de estudo, ensaios *in situ*, ou experimentos em laboratório, tais como mesocosmo ou fortificação da amostra (SÃO PAULO, 2022).

Deve-se destacar que alguns órgãos ambientais estaduais brasileiros também possuem seus instrumentos legais próprios para o controle dos efluentes líquidos lançados por fontes poluidoras, como é o caso dos pertencentes aos estados de São Paulo, Rio de Janeiro, Santa Catarina, Paraná, Rio Grande do Sul e Minas Gerais.

Os ensaios com organismos aquáticos são utilizados para avaliar a ecotoxicidade de substâncias químicas, amostras líquidas, efluentes líquidos, ou possíveis materiais sólidos com potencial para contaminar recursos hídricos por escoamento superficial ou percolação (lixiviação). Com o advento da Resolução CONAMA n° 357, amostras de águas de rios, lagos ou qualquer ecossistema aquático também passaram a ser testadas, visando determinar a inocuidade ou não da amostra para as espécies avaliadas.

Entretanto, torna-se necessário, que as ferramentas legislativas estejam em contínua atualização, pois os ensaios ecotoxicológicos vem constantemente sendo inovados, assim como as substâncias químicas que aumentam em diversidade, volume, de forma contínua e em quantidade exponencial. Desse modo, novas propostas para ensaios ou baterias de ensaios devem acompanhar essa evolução dos potenciais contaminantes lançados no ambiente. Além disso, há a necessidade da regulação de produtos químicos ainda não regulados e da complementação de regulamentos para os produtos já controlados, que muitas vezes são avaliados pelo aspecto da saúde humana, mas não pelo aspecto ambiental.

A avaliação ecotoxicológica pode ser utilizada tanto para atendimento legal como para indicar, de forma proativa, que um material não acarretará efeitos adversos aos organismos vivos de um determinado ecossistema, no qual este material será depositado ou aplicado. Apesar do uso já bem estabelecido dos ensaios ecotoxicológicos como instrumentos de avaliação e controle do impacto de amostras líquidas (p. ex. efluentes líquidos e águas superficiais) no Brasil, principalmente por causa de demanda legal, sua utilização para avaliação da qualidade de amostras de solos e resíduos sólidos ainda é pouco demandada.

Os ensaios ecotoxicológicos com oligoquetas (letalidade, reprodução, comportamento de fuga e bioacumulação) têm sido utilizados no Brasil principalmente no setor acadêmico, mas também podem ter aplicações, por exemplo, no setor regulatório de registro de substâncias (p. ex. agrotóxicos) (SISINNO *et al.*, 2019).

Entretanto, a aplicação dos ensaios ecotoxicológicos com organismos terrestres como ferramenta de avaliação e controle, ainda não é realizada com a mesma demanda com que são requisitados os ensaios com organismos aquáticos, basicamente, por falta de demanda legal e pouco conhecimento, inclusive, dos técnicos dos órgãos ambientais sobre os dados produzidos e sua interpretação (SISINNO *et al.*, 2019).

A caracterização ecotoxicológica de solos e materiais de solo em relação aos seus usos pode ser realizada com baterias de ensaios ecotoxicológicos com organismos terrestres e aquáticos, segundo a ABNT NBR ISO 15799 – Qualidade do Solo – Guia para a Caracterização Ecotoxicológica de Solos e Materiais de Solo (ABNT, 2025b). Segundo esta norma, solo é a camada superior da crosta terrestre, composta de partículas minerais, matéria orgânica, água, ar e organismos; e material de solo é o material proveniente do solo e deslocado e/ou alterado pela atividade humana, incluindo solos escavados, materiais dragados, solos manufaturados, solos tratados e materiais de aterro (ABNT, 2025b).

De modo geral, a avaliação ecotoxicológica de solos e materiais de solo se baseia na avaliação de substâncias potencialmente nocivas móveis e biodisponíveis, nos casos em que estes materiais podem afetar as águas subterrâneas e/ou superficiais e nos casos em que poluentes são adicionados aos solos (p. ex. pelo uso agrícola de resíduos como lodo, compostos etc.) (ou seja, função de retenção), e/ou possíveis efeitos adversos sobre os organismos que vivem no solo (ou seja, função de habitat) (ABNT, 2010).

A bateria de ensaios proposta visa a avaliação das funções de habitat e retenção. A função de habitat do solo está relacionada com a sua capacidade para servir como um habitat para

microrganismos, plantas, animais edáficos e de suas interações (biocenoses). A função de retenção do solo, por sua vez, visa à proteção das águas superficiais e subterrâneas, pela sua capacidade de absorver poluentes, de tal modo que não possam ser mobilizados via água e transferidos para a cadeia alimentar (ABNT, 2025b). Esta avaliação poderia ser utilizada, por exemplo, no monitoramento e controle da eficiência do tratamento do solo (*off-site*, *on-site*, *in-situ*) após o processo de remediação e na avaliação da qualidade do solo/material de solo ou dos efeitos da contaminação de acordo com seu uso ou reutilização (ABNT, 2025b).

Estudos realizados com materiais originados de resíduos que podem ser aplicados na agricultura como fertilizantes (p. ex. composto orgânico de resíduos sólidos urbanos, biossólidos e pós de rocha) mostram a importância da utilização dos ensaios ecotoxicológicos para avaliar possíveis impactos na biota (ALBERT; BLOEM, 2023; ALVARENGA *et al.*, 2016; CHELINHO *et al.*, 2019; NIVA *et al.*, 2021). Segundo a legislação de Portugal, a determinação da fitotoxicidade com o uso dos ensaios ecotoxicológicos com plantas (p. ex. emergência e crescimento de vegetais) é um dos parâmetros exigidos para fertilizantes considerados corretivos orgânicos, como composto orgânico de resíduos sólidos, produto do substrato usado na produção de cogumelos e vermicomposto (PORTUGAL, 2022).

4 | METODOLOGIAS PARA A AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA

Conforme comentado anteriormente, na realização dos ensaios ecotoxicológicos haverá a necessidade de se promover o contato dos organismos-teste com a amostra contaminada, para avaliação dos efeitos adversos causados por esta exposição.

Ao final do ensaio, o resultado é considerado válido se atender aos requisitos descritos em cada método como, por exemplo, a letalidade dos adultos no controle não exceder um determinado percentual ao final do ensaio; a taxa de reprodução devendo atingir um número mínimo de organismos por recipiente-controle; e o coeficiente de variação da reprodução no controle não exceder um determinado percentual.

Deve-se destacar que sintomas físicos ou patológicos visíveis ou de mudanças distintas no comportamento também devem ser observados nos organismos-teste durante o ensaio.

Conforme já destacado anteriormente, por razões de aceitação e qualidade dos dados, devem ser utilizados métodos de ensaios ecotoxicológicos padronizados (RÖMBKE, 2018).

Além de métodos padronizados, muitas vezes é uma exigência para verificação da competência técnica que envolve a qualidade dos resultados que o ensaio seja acreditado e, em alguns casos, também possuir credenciamento do órgão ambiental estadual (p. ex. como é exigido pelo Instituto Estadual do Ambiente – INEA, órgão ambiental do Estado do Rio de Janeiro).

É importante citar também a necessidade dos corretos procedimentos que antecedem a realização dos ensaios ecotoxicológicos. Algumas orientações estão descritas na norma ABNT NBR 15469 – Ecotoxicologia – Coleta, Preservação e Preparo de Amostras (ABNT, 2021).

4.1 | Amostras Líquidas

Os ensaios para avaliar a ecotoxicidade de amostras líquidas (águas superficiais e subterrâneas, efluentes líquidos, substâncias químicas) consistem na exposição dos organismos-teste à amostra integral ou à várias diluições da amostra-teste com uma água de diluição (que deve ser preparada de acordo com as orientações do método e possuir parâmetros físico-químicos, como pH, dentro de determinados limites). Utilizando informações conhecidas da amostra ou o intervalo de concentrações estabelecido em um ensaio preliminar, pode ser preparada uma série de soluções-teste de uma razão de diluição estabelecida (ABNT, 2022).

O ensaio deve ser realizado por um determinado período e nas condições estipuladas pelo método de ensaio (p. ex. fotoperíodo, temperatura).

4.2 | Amostras Sólidas

A avaliação ecotoxicológica de amostras em estado sólido (como solo, resíduos ou rejeitos) ou semissólidas (como lodo e material sedimentado) pode ser realizada com a comparação entre os efeitos da exposição de organismos-teste adequados entre amostras não contaminadas (controle) e contaminadas (amostras-teste). Esta comparação pode ser feita entre o controle e a amostra

integral ou igualmente com uma série de diluições da amostra avaliada, como é realizado com as amostras líquidas.

Para solos contaminados, os efeitos são determinados no solo-teste (amostra) e no solo-controle. De acordo com o objetivo do estudo, o controle e o substrato para diluição do solo contaminado podem ser tanto um solo de referência (solo não contaminado comparável ao solo-teste) quanto um solo-padrão. O solo-padrão é um solo coletado em campo ou solo artificial cujas propriedades principais (pH, textura, conteúdo de matéria orgânica) estão dentro de uma faixa conhecida, de acordo com o estabelecido no método de ensaio (ABNT, 2024e).

O substrato denominado como solo artificial pode ser usado como solo-padrão, sendo que para condições tropicais tem sido adotado o Solo Artificial Tropical (SAT), com a substituição em sua composição da turfa de esfagno – como está preconizado nas normas OECD e ISO sobre ensaios ecotoxicológicos com organismos do solo –, pelo pó da casca de coco (ABNT, 2024e).

No caso de resíduos e rejeitos, como não há um material de referência que possa ser usado como controle, muitas vezes o ensaio é realizado apenas na amostra integral, sem diluição, não sendo possível calcular um valor, sendo determinado apenas uma avaliação qualitativa. Em alguns casos, pesquisadores usaram um solo produzido artificialmente (solo-controle) como meio para a diluição com as amostras de resíduos ou um solo padrão natural (p. ex. LUFA) (PANDARD *et al.*, 2006; RÖMBKE, 2018; WILKE *et al.*, 2008).

Os ensaios com as amostras sólidas também são realizados em um determinado período de tempo, de acordo com cada método (p. ex. para avaliar a toxicidade aguda ou crônica). Condições como faixa de temperatura, fotoperíodo determinado, alimentação

dos organismos durante o ensaio e umidade das amostras também são fatores que precisam ser controlados como exigências em diferentes ensaios.

4.2.1 | Preparo do eluato

Para realizar os ensaios com amostras sólidas (resíduos sólidos e solos) usando organismos aquáticos, é necessário produzir um extrato aquoso dos resíduos. Neste processo, será realizado o contato entre um sólido e um líquido sob condições pré-definidas, ocorrendo a mobilização parcial ou total de certas espécies químicas para a fase aquosa, permitindo sua solubilização (BANDARRA *et al.*, 2019; MANSKINEN; NURMESNIEMI; PÖYKIÖ, 2011). Este procedimento pretende mimetizar o processo ao qual os resíduos estão sujeitos ao serem depositados no solo, por ação de intempéries, capazes de tornar os componentes solúveis em água e, desse modo, atingir os recursos hídricos (subterrâneos e superficiais) por percolação (lixiviação) ou escoamento superficial (*run off*). Este extrato aquoso é denominado eluato ou elutriato e pode servir como um indicador preliminar da contaminação das águas subterrâneas ou da água encontrada nos poros do solo antes da exposição das águas superficiais ou potáveis (ABNT, 2025b).

Existem diferentes metodologias para o preparo do eluato, sendo que para solos há um procedimento descrito na norma ABNT NBR 15469 (ABNT, 2021). Orientações da ISO e da Comunidade Europeia também descrevem metodologias de preparação de eluatos, como as descritas na ISO/TS 21268-1, ISO/TS 21268-2 e CEN 14735 (CEN, 2021; ISO, 2019b, 2019c).

O eluato preparado, por sua vez, poderá ser novamente diluído em uma série, antes da exposição dos organismos aquáticos.

5 | A AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA NA CLASSIFICAÇÃO DE RESÍDUOS SÓLIDOS

A avaliação ecotoxicológica tem sido pouco utilizada para a classificação de resíduos sólidos no Brasil e muitos questionamentos ainda permanecem para sua aplicação nos países da União Europeia (UE).

A classificação de um resíduo tem como finalidade indicar a(s) característica(s) a ser(em) gerenciada(s) para evitar risco(s) ao meio ambiente e à saúde pública. O processo de classificação de resíduos acarreta consequências importantes nas operações posteriores do seu gerenciamento, principalmente nos aspectos relacionados ao manuseio, à análise de viabilidade para seu reaproveitamento e valorização, e a escolha da forma de destinação mais adequada, considerando a hierarquia do gerenciamento de resíduos (ABNT, 2024a).

De acordo com a definição encontrada na norma brasileira da ABNT NBR 10004-1 – Resíduos Sólidos – Classificação. Parte 1: Requisitos de Classificação, “resíduo perigoso é aquele que apresenta potencial de causar um efeito adverso à saúde humana e/ou ao meio ambiente, uma vez que possui uma ou mais característica(s) de periculosidade” e a ecotoxicidade é uma característica que confere periculosidade aos resíduos. Um resíduo será considerado ecotóxico quando possuir capacidade de provocar efeito adverso nos organismos presentes em um ou em vários compartimentos do ambiente (ABNT, 2024a).

Na aplicação da classificação de resíduos segundo a norma da ABNT, para determinação da característica de ecotoxicidade são considerados apenas os efeitos adversos aos organismos presentes no ambiente aquático (ABNT, 2024b). Este direcionamento

seguiu os mesmos procedimentos aplicados na legislação europeia estabelecida pela Diretiva 2008/98/CE relativa aos resíduos (UE, 2008).

A revisão da Lei de Resíduos europeia teve como objetivo a promoção de uma classificação harmonizada de resíduos perigosos entre os Estados-Membros (STIERNSTROM; WIK; BENDZ, 2016), tendo por base a legislação da UE do Sistema Mundial Harmonizado de Classificação, Rotulagem e Embalagem de Produtos Químicos (GHS) da Organização das Nações Unidas (ONU) (UE, 2019).

A característica de periculosidade (*hazard property*) HP 14 é a base para determinar os potenciais impactos negativos dos resíduos no ambiente e um dos maiores desafios ao nível da legislação da UE tem sido a definição da metodologia para avaliar esta característica, uma vez que as abordagens entre os Estados-Membros da UE têm diferido bastante, sendo necessárias linhas de orientação com critérios claros (BANDARRA *et al.*, 2019). Segundo especialistas europeus, considera-se que a maioria das entradas perigosas na Lista Europeia de Resíduos resultam da característica de periculosidade HP 14 (ecotóxico) (HENNEBERT, 2018; PANDARD *et al.*, 2006). Por isso, a avaliação desta característica constitui-se de grande relevância.

Em geral, as características de periculosidade podem ser avaliadas de acordo com a composição do resíduo em substâncias potencialmente perigosas ou de acordo com ensaios de laboratório (HENNEBERT *et al.*, 2014). Estes últimos, entretanto, apresentam custos mais elevados e precisam atender as leis sobre ética na pesquisa, que incluem a redução do uso de animais (vertebrados) em experimentos. Segundo a ABNT NBR 10004-1 sempre que possível deve-se evitar a utilização de

métodos de ensaio que utilizem animais *in vivo* para identificação das características de perigo e, caso seja necessário utilizar animais, devem ser obedecidos os padrões bioéticos previstos na legislação brasileira e nas convenções internacionais (ABNT, 2024a). Na Europa também há esta preocupação e em alguns países a avaliação da HP 14 com os ensaios ecotoxicológicos é restringida, uma vez que se considera que estes levantam preocupações éticas. No entanto, as espécies testadas nos Estados Membros que utilizam os ensaios ecotoxicológicos na avaliação da HP 14 não são abrangidas pela Diretiva 2010/63/UE, relativa à proteção dos animais utilizados para fins científicos (UE, 2010), com exceção do peixe *Poecilia reticulata* utilizado na República Checa (BANDARRA *et al.*, 2019).

Os resíduos podem conter uma variedade de substâncias com variáveis composições e na abordagem química a estimativa das substâncias presentes nos resíduos considera sua forma elementar (HENNEBERT *et al.*, 2014), sendo sua especificação usualmente ignorada (BANDARRA *et al.*, 2023).

Além disso, os resíduos podem apresentar substâncias químicas desconhecidas e, mesmo quando conhecidas, não há certeza quanto a sua ecotoxicidade, pois essas substâncias estão presentes em misturas complexas e em matrizes cuja disponibilidade e interação resultantes são difíceis de prever (RÖMBKE *et al.*, 2018). Assim, caso os ensaios ecotoxicológicos sejam realizados com um respectivo resíduo, seus resultados irão prevalecer (RÖMBKE *et al.*, 2018).

Deve-se destacar que os ensaios de ecotoxicidade levam em conta a abordagem dos efeitos de todas as substâncias, as suas potenciais interações (aditivas, sinérgicas e antagonísticas), e a fração do resíduo que está disponível para os organismos (biodisponível)

(WILKE *et al.*, 2008). Deste modo, estes ensaios são relevantes para a avaliação de resíduos com matrizes complexas, contendo substâncias cuja determinação é muito difícil ou impossível por meio de análises químicas (BIO by Deloitte, 2015). Esta abordagem é, provavelmente, a mais representativa com relação à resposta da biota aos resíduos depositados no ambiente (BANDARRA *et al.*, 2019).

Uma vez que não existe acordo regulamentar em relação aos ensaios a serem realizados para avaliação da característica de periculosidade HP14, há divergências nos diferentes estudos que têm sido publicados sobre esta temática (RÖMBKE; MOSER; MOSER, 2009).

Especialistas europeus têm comentado sobre este critério de ecotoxicidade, indicando que apenas a comparação teórica dos percentuais das substâncias presentes nas amostras dos resíduos avaliados não seria adequada e que vários organismos deveriam ser utilizados nesta avaliação, ou seja, uma bateria de ensaios incluindo organismos aquáticos e terrestres (BANDARRA *et al.*, 2023; HUGUIER *et al.* 2015; MOSER; RÖMBKE, 2009; PANDARD *et al.*, 2006; PANDARD; RÖMBKE, 2013; RÖMBKE; MOSER; MOSER, 2009; RÖMBKE, 2018; WUTTKE; WALTHER, 2013).

Se aplicável, esta bateria de ensaios deve abranger espécies dos três principais níveis tróficos (microrganismos, plantas e animais – representando decompositores, produtores e consumidores) e níveis de toxicidade, desde toxicidade aguda até crônica e genotoxicidade (ALBERT; BLOEM, 2023).

Uma seleção de três ensaios por compartimento – incluindo três aquáticos/com eluato, e três terrestres/com a amostra sólida –, é indicada por Römcke (2018) como uma abordagem prática e econômica para avaliar amostras de resíduos sólidos.

Entre as várias propostas e abordagens regulamentares encontradas em alguns países europeus, as espécies *Raphidocelis subcapitata* (microalga verde), *Daphnia magna* (microcrustáceo) e *Aliivibrio fischeri* (bactéria luminescente) são os organismos mais frequentemente sugeridos para os ensaios representativos dos ecossistemas aquáticos, enquanto que *Avena sativa* e *Brassica napus* (plantas), *Eisenia fetida* (minhoca) e *Arthrobacter globiformis* (bactéria) são os organismos mais vezes sugeridos em ensaios com amostras de solo (BANDARRA *et al.*, 2019).

Diferentes baterias de ensaios ecotoxicológicos têm sido usadas em Estados Membros da UE, por exemplo na França e na Alemanha (PANDARD *et al.*, 2006; RÖMBKE, 2018), na avaliação ecotoxicológica de resíduos, considerando ensaios com eluatos de resíduos e resíduos sólidos. Entre as baterias usadas, destacam-se os resultados de um ensaio interlaboratorial internacional realizado com três tipos de resíduos (cinzas de incineração contaminadas com metais pesados; solo com alta concentração de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos; e resíduo de madeira preservada contendo cobre e outros metais pesados). Os resultados indicaram que os organismos mais sensíveis aos resíduos testados foram *D. magna* e *R. subcapitata*. Foi sugerida a substituição do ensaio de letalidade com minhocas por outro com invertebrados de solo que seja mais sensível (ensaio de fuga com minhocas ou ensaio de contato com *A. globiformis*) (MOSER; RÖMBKE, 2009).

O ensaio com *Daphnia magna* é o único utilizado por todos os Estados Membros da UE que usam baterias de ensaios ecotoxicológicos para avaliar a HP 14 (República Tcheca, França, Espanha e Alemanha) (BANDARRA *et al.*, 2019). No entanto, são considerados diferentes valores-limite (BIO by Deloitte, 2015).

A avaliação da periculosidade dos resíduos baseada exclusivamente na abordagem química pode resultar na sobrestimação da ecotoxicidade ao considerar o “cenário do pior caso possível” e, em contrapartida, na sua subestimação, por não considerar, por exemplo, as interações entre as substâncias presentes nos resíduos (BANDARRA *et al.*, 2019).

Diferentes especialistas têm recomendado uma abordagem combinada, englobando análises químicas e biológicas, para compensar as limitações de ambas as abordagens e, assim, classificar os resíduos o mais adequadamente possível (MOSEER *et al.*, 2011). Contudo, é fundamental a definição de uma bateria mínima de ensaios bem como de valores-limites harmonizados para a avaliação da HP 14 (BANDARRA *et al.*, 2019; BEGGIO *et al.*, 2021). Até o momento, não há uma orientação clara e específica sobre a abordagem experimental para a avaliação da ecotoxicidade para a UE, ficando cada país com a responsabilidade de decidir caso a caso sobre o uso dos ensaios para a caracterização ecotoxicológica (BANDARRA *et al.*, 2023).

Finalmente, é importante ressaltar que uma avaliação do resíduo como “não ecotóxico” não o classifica automaticamente como “não perigoso”, uma vez que todas as outras características de periculosidade devem ser avaliadas, independentemente da avaliação ecotoxicológica (WUTTKE; WALTHER, 2013).

6 | IMPACTO AMBIENTAL E ESTUDOS DE CASOS

A lavra é o conjunto de atividades e operações para o aproveitamento industrial das jazidas, sendo a etapa mais intensiva em geração de efluentes, tanto sólidos quanto líquidos e gasosos (CARVALHO *et al.*, 2017).

Com a crescente demanda por insumos minerais houve um grande crescimento das quantidades produzidas pelos processos de exploração e aproveitamento de substâncias minerais. Como consequência, a geração de resíduos e rejeitos – cada vez mais com menor granulometria –, aumentou significativamente e surgiu a necessidade de removê-los das áreas de produção para outros locais, em muitos casos próximos a cursos d'água. Deste modo, estes materiais passaram a ser transportados e depositados para distâncias cada vez maiores das fontes geradoras (IBRAM, 2016).

Os estéreis podem ser encaminhados para depósitos de estéreis, atendendo a ABNT NBR 13029 – Mineração – Elaboração e Apresentação de Projeto de Disposição de Estéril em Pilha. Esta norma estabelece os requisitos para elaboração e apresentação de projeto de pilha para disposição de estéril gerado por lavra de mina a céu aberto ou de mina subterrânea, visando atender às condições de segurança, operacionalidade, economia e desativação, minimizando os impactos ao meio ambiente (ABNT, 2024d).

Os rejeitos, de um modo geral, podem ser dispostos em:

- Minas subterrâneas;
- Cavas exauridas de minas;
- Pilhas;

- Por empilhamento a seco (método *dry stacking*);
- Disposição em pasta; e
- Em barragens de contenção de rejeitos (do tipo a montante, a jusante e em linha de centro) (IBRAM, 2016).

A maior parte da disposição de rejeitos da mineração mundial é realizada em barragens de contenção de rejeitos, cuja principal função é a sua contenção e a reservação da água para o reuso na mina e/ou no beneficiamento como função secundária. Muitos rejeitos são transportados para a área de disposição com um alto teor de água (10% a 25% de sólidos) (IBRAM, 2016). A norma da ABNT NBR 13028 – Mineração – Elaboração e Apresentação de Projeto de Barragens para Disposição de Rejeitos, Contenção de Sedimentos e Reserva de Água – Requisitos, visa atender às condições de segurança, operacionalidade, economicidade e desativação dos projetos, minimizando os impactos ao meio ambiente (ABNT, 2024c).

As barragens de contenção de rejeitos ainda são as mais usadas e podem ser construídas utilizando-se solos, estêreis ou o próprio rejeito (IBRAM, 2016). A ampla utilização de barragens para a deposição de rejeitos provoca os seguintes aspectos negativos:

- Supressão da vegetação;
- Destruição de habitats da fauna;
- Redução da biodiversidade;
- Elevado uso de água;
- Poluição de recursos hídricos e
- Riscos para as comunidades situadas a jusante (CARVALHO *et al.*, 2017).

Nas barragens de rejeitos podem ser encontradas outras substâncias que podem afetar a qualidade das águas, como soluções contendo cianetos, metais pesados ou com o pH muito ácido (IBRAM, 2016).

Os impactos ambientais e os riscos associados às barragens de rejeitos e depósitos de estéreis são significativos para a indústria da mineração (IBRAM, 2016). Como exemplo de grandes catástrofes ambientais e humanas relacionadas às barragens de rejeitos podem ser citados os casos ocorridos nas localidades de Mariana e Brumadinho, em Minas Gerais.

Os rejeitos de minério de ferro liberados pelas rupturas das barragens de Fundão (Mariana – MG) e da Mina Córrego do Feijão (Brumadinho – MG) têm características semelhantes, como material particulado fino, com predominância de partículas silte-argilosas e de Al, Fe e Mn. Isto se deve porque ambos os complexos minerais estão situados no Quadrilátero Ferrífero, região rica em depósitos de ferro (VERGILIO *et al.*, 2020).

A barragem de Fundão que colapsou em 05 de novembro de 2015 no município de Mariana despejou cerca de 40 milhões de m³ de rejeitos por onde o fluxo deste material percorreu até o mar, impactando principalmente o Rio Doce (BUCH *et al.*, 2021), enquanto a barragem da Mina Córrego do Feijão, na cidade de Brumadinho, colapsou em 25 de janeiro de 2019, despejando cerca de 12 milhões de m³ de rejeitos que ocuparam uma área de cerca de 3,2 km² e impactaram principalmente o Rio Paraopeba (QUINTARELLI; SILVA JUNIOR; VIGLIO, 2023). Ao todo a lama de rejeitos da Mina Córrego do Feijão percorreu mais de 300 km, afetando cerca de 26 municípios, sendo estimado que aproximadamente 1,8 milhões de hectares tenham sido impactados, com 300 hectares de vegetação nativa sendo afetada

(BUCH *et al.*, 2024). As substâncias tóxicas presentes na lama de rejeitos da barragem de Fundão contaminaram a água, o solo e a vegetação, sendo observadas alterações físico-químicas que influenciaram a estrutura do solo, tornando-o improdutivo (ANDRADE, 2018). O mesmo impacto ocorreu no caso da Mina Córrego do Feijão, sendo evidenciadas alterações nas concentrações de metais tanto no solo (BUCH *et al.*, 2024), como na água e nos sedimentos do Rio Paraopeba (QUINTARELLI; SILVA JUNIOR; VIGLIO, 2023; VERGILIO *et al.*, 2020).

Em relação às pedreiras, os principais impactos ambientais da produção de rochas ornamentais se devem a grande quantidade dos resíduos gerados. Além do impacto visual, típico da mineração, ocorre também a produção de ruídos e poeiras e desgastes das estradas devido ao transporte dos blocos (CASTRO *et al.*, 2011).

Outro importante impacto causado pela mineração é a geração da drenagem ácida de mina (DAM), que é um processo químico resultante da oxidação de minerais sulfetados na presença de água, gerando uma solução ácida rica em metais dissolvidos e ácido sulfúrico, agindo como agente lixiviante dos minerais presentes no resíduo. Isso ocorre em locais onde o mineral de interesse está associado a sulfetos, como na remoção de ouro, carvão, cobre, zinco e urânio. Uma DAM pode ser gerada em pilhas e depósitos (barragens) de rejeitos, galerias de minas subterrâneas, pilhas de lixiviação, pilhas de estoque de minério e cavas de mina a céu aberto. Se não for controlada, pode contaminar corpos hídricos futuros, tornando a água imprópria para uso por longos períodos, assim como a acidulação de solos e mobilização de metais pesados. Tanto minas subterrâneas quanto a céu aberto

apresentam sérios riscos ambientais, enquanto minas abandonadas são mais propensas à geração de DAM (NATARAJAN, 2018; TRINDADE; SOARES, 2004).

Hilson e Monhemius (2006) ressaltam que diversos acidentes ambientais ocorrem em sistemas de recuperação de ouro de minérios e concentrados devido ao uso do cianeto como reagente de lixiviação. Processos metalúrgicos podem gerar tiocianato por meio de reações do cianeto com o enxofre presente nos minérios, sendo esse difícil de ser removido devido a sua estabilidade.

De acordo com Dias-Júnior *et al.* (1998), a presença de metais no solo pode ser tóxica aos microrganismos, interferindo em processos como a mineralização de matéria orgânica e/ou ciclos do nitrogênio, afetando assim a disponibilização de nutrientes no ambiente rizosférico. Em um estudo realizado por Mergulhão, Silva e Lyra (2019), foi avaliada a comunidade microbiana presente em um solo impactado pela mineração de gesso, a partir de amostras de solo nativo, ao redor da mineradora e no rejeito, assim como na interface entre o rejeito e a área degradada. Foi observado como resultado que o número de microrganismos decaiu drasticamente nas áreas afetadas pela mineração de gesso. Os autores também salientaram a importância de um solo rico em microrganismos, uma vez que os mesmos são responsáveis pela disponibilização e ciclagem de nutrientes do solo.

Os ensaios ecotoxicológicos podem avaliar a toxicidade dos materiais e a contaminação e/ou possíveis efeitos adversos à biota, provenientes de um compartimento ambiental ou uma área contaminada. Estudos de casos em áreas contaminadas pela atividade mineral e em resíduos e rejeitos originados deste setor podem ser realizados com diferentes organismos aquáticos e terrestres. Contudo, observa-se que os estudos de avaliação da

ecotoxicidade têm se concentrado em amostras de água e sedimentos (BROOKS; ESCUDERO-ONATE; LILICRAP, 2019) e em solos contaminados das áreas afetadas (ALVES *et al.*, 2023; NIEMEYER *et al.*, 2010; MABOETA; OLADIPO; BOTHA, 2018).

Efeitos adversos em diferentes níveis tróficos foram evidenciados com o uso de ensaios ecotoxicológicos com algas, microcrustáceos e peixe em amostras de água do Rio Doce, coletadas em diferentes épocas após o acidente com a barragem de Fundão (Mariana – MG), demonstrando o impacto imediato e em longo prazo (após seis meses) da ruptura da barragem de rejeitos (VERGILIO *et al.*, 2021). Alves *et al.* (2023) observaram redução na reprodução de organismos de solo (*Folsomia candida* e *Enchytraeus crypticus*) em amostras a 100% com rejeitos de mineração originados do acidente com a barragem de Fundão, enquanto os resultados do estudo de Buch *et al.* (2021) na mesma área com o colêmbolo *Proisotoma minuta* (outro organismo de solo) indicaram uma resposta significativa para a avaliação do comportamento de fuga com amostras a 100%.

No estudo de Vergilio *et al.* (2020) na área de Brumadinho, os ensaios ecotoxicológicos mostraram que a água e o sedimento do Rio Paraopeba afetados pelos rejeitos da barragem foram tóxicos para algas (*Raphidocelis subcapitata*), microcrustáceos (*Daphnia similis*) e peixes (*Danio rerio*). Peixoto *et al.* (2022) encontraram efeitos letais, subletais e teratogênicos em *D. rerio*, avaliados em amostras de água superficial de vários pontos afetados pelo despejo da mesma barragem.

Ensaio com a bactéria *Arthrobacter globiformis* com amostras de solos contaminados de minas localizadas na Tunísia (mina ativa de fósforo com produção de fosfogesso), Portugal (mina de urânio

abandonada) e Marrocos (mina de ferro abandonada) foram realizados por Marques *et al.* (2014).

Larvas de *Chironomus riparius* foram utilizadas em um estudo realizado na França em uma mina de carvão para avaliar a ecotoxicidade da DAM originada da pilha de rejeitos e do rio afetado por seu despejo, indicando efeitos letais e subletais, como inibição do crescimento (GAUTHIER-MANUEL *et al.*, 2021). Alvarenga *et al.* (2021) utilizaram os ensaios com *Daphnia magna* e *Vibrio fischeri* (atualmente *Aliivibrio fischeri*) para avaliar a ecotoxicidade dos córregos afetados pela DAM originada de uma mina de pirita, em Portugal, e os resultados indicaram uma alta toxicidade para os organismos testados.

Uma bateria de ensaios envolvendo os de crescimento de plantas e germinação de semente (*Lepidium sativum*), letalidade e comportamento de fuga com minhocas (*Eisenia fetida*), inibição da luminescência com bactérias (*Vibrio fischeri*) e imobilização com microcrustáceo (*Daphnia magna*) foi realizada por Alvarenga *et al.* (2008) na mesma área em Portugal e os resultados mostraram que todos foram adequados para verificar a qualidade do solo contaminado.

Bori *et al.* (2017) avaliaram o extrato aquoso de solos e de águas de drenagem na área de uma mina abandonada de F-Ba-Pb e Zn, em Osor, na Espanha. A avaliação de ecotoxicidade foi realizada com minhocas, artrópodes e várias espécies de plantas, e com as espécies *Vibrio fischeri* (bactéria), *Raphidocelis subcapitata* (alga) e *Daphnia magna* (microcrustáceo). Com minhocas foi observada a mortalidade de 40% na concentração de 100% de solo e para a reprodução o efeito foi observado com sensibilidade extrema. Para o artrópode *Folsomia candida* o efeito agudo não foi observado, mostrando baixa sensibilidade. Com relação ao estudo

com as plantas, as espécies *Brassica rapa* e *Trifolium pratense* se mostraram mais sensíveis na emergência das sementes, mas no estudo de inibição do crescimento, todas as espécies testadas apresentaram redução em relação ao grupo controle. O ensaio de inibição de crescimento com microalgas se mostrou bastante efetivo. O ensaio de imobilização com *D. magna* apresentou menor sensibilidade e no ensaio de inibição da bioluminescência com a bactéria *V. fischeri* não foi possível a obtenção de uma resposta, se mostrando como o menos sensível às amostras testadas.

Loureiro, Ferreira e Soares (2005) também realizaram um estudo com *Daphnia magna*, *Vibrio fischeri* e *Folsomia candida* em amostras de solo e elutriado de solo de uma mina abandonada em Portugal. A bactéria *V. fischeri* mostrou maior sensibilidade ao solo e ao elutriado com baixa concentração de metais pesados, enquanto o ensaio com *D. magna* indicou efeitos adversos na mobilidade e reprodução nas amostras de solos e elutriados com altas e baixas concentrações de metais. O ensaio com *F. candida*, por sua vez, não indicou toxicidade para a reprodução dos organismos.

Oliveira-Filho *et al.* (2010) estudaram a toxicidade do pó de calcinação, um fino pó escuro, gerado pelo processo pirometalúrgico de obtenção do ferroníquel. Os autores avaliaram a toxicidade aguda, a citotoxicidade e a genotoxicidade desse material, que era então mantido à céu aberto na área da mineradora, sobre o peixe *Oreochromis niloticus* (Tilápia do Nilo). Não se observou letalidade, citotoxicidade ou genotoxicidade, sugerindo a baixa solubilidade do material em solução aquosa. A presença significativa do pó no trato digestivo e a irritação das lamelas branquiais foram os principais efeitos observados.

Dando seqüência ao estudo publicado no ano de 2010, Oliveira-Filho *et al.* (2013) avaliaram a possibilidade da metabolização dos

resíduos do pó de calcinação no trato digestivo dos peixes. A ideia era mensurar se esse processo poderia liberar algum quantitativo de metais para o corpo dos organismos e gerar uma potencial bioacumulação. Os resultados mostraram que embora o material tenha sido consumido, o mesmo não foi metabolizado e não houve acumulação de metais no corpo dos peixes, após 30 dias da exposição em água limpa.

Deve ser dada especial atenção aos produtos provenientes do setor mineral que podem ser utilizados na agricultura, como o fosfogesso e o pó de rocha. O fosfogesso ($\text{CaSO}_4 \cdot 2\text{H}_2\text{O}$) é gerado durante a produção de ácido fosfórico, sendo constituído principalmente de sulfato de cálcio di-hidratado. Este material pode conter metais pesados e acidez residual (pH 2-3) e seu tratamento é um desafio para a sustentabilidade da indústria mineral (MELGAÇO; QUITES; LEÃO, 2020). Segundo Silva *et al.* (2022), além de Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT), como As e Pb, no fosfogesso podem ser encontradas nanopartículas (NPs) e radionuclídeos.

Ensaio de ecotoxicidade com solos alterados com fosfogesso e elutriatos foram realizados com organismos terrestres (*Eisenia andrei*, *Enchytraeus crypticus*, *Folsomia candida*, *Hypoaspis aculeifer*, *Zea mays* e *Lactuca sativa*) e aquáticos (*Vibrio fischeri*, *Daphnia magna*, *Raphidocelis subcapitata* e *Lemna minor*). As espécies mais sensíveis foram *D. magna* e *E. andrei*, indicando efeitos agudos (imobilização) e crônicos (inibição da reprodução), respectivamente para as avaliações das amostras de elutriato e solo. Apesar da presença de metais de interesse (p. ex. zinco e cádmio), os elevados níveis de cálcio encontrados em ambos os meios testados sugerem que este elemento foi o principal responsável pelos efeitos ecotoxicológicos observados (HENTATI *et al.*, 2015).

A aplicação do pó de rocha como fertilizante pode alterar a quantidade de sais dissolvidos, a textura do solo, assim como seu pH. Porém, um fator importante a se considerar é que minerais formadores de rochas podem ser possíveis fontes de EPT, particularmente os metais pesados, e dependendo da dosagem aplicada pode ser considerado um risco ambiental (DUPLA *et al.*, 2024; OLIVEIRA-FILHO; NIVA; MARTINS, 2023; VITÓ *et al.*, 2020). Outro efeito negativo é o possível impacto ao pilar biológico da fertilidade do solo, prejudicando a saúde das culturas e atividade biológica do solo, atuando negativamente no ciclo de nutrientes e na bioturbação (DUPLA *et al.*, 2024).

Ramos *et al.* (2021) descrevem que NPs originadas de minerais de argila (aluminossilicatos cristalinos), silicatos não cristalinos, óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio, carbonatos de cálcio e magnésio podem ser encontradas nos pós de rocha e, inclusive, servir como agentes carreadores de metais para os compartimentos ambientais. Ainda persistem muitas lacunas de informação com relação ao comportamento das NPs lançadas no ambiente e seus possíveis impactos negativos na biota. Infelizmente, a biota não está totalmente adaptada para interagir de maneira segura e sem consequências com grande parte deste novo tipo de material, especialmente sob as condições de quantidade produzida, uso e descarte atualmente observadas (SISINNO *et al.*, 2024).

A aplicação em altas doses e de maneira repetitiva do pó de rocha pode ocasionar problemas como:

- Acúmulo de substâncias tóxicas;
- Aumento da possível percolação de compostos tóxicos ou de nutrientes para as águas subterrâneas e o carreamento para as águas superficiais;
- O aumento da solubilidade implica no aumento da biodisponibilidade de componentes tóxicos para a microbiota (SISINNO; CUNHA, 2024).

Oliveira-Filho *et al.* (2022) utilizaram *Danio rerio* para avaliar a solubilidade, a toxicidade e a potencial acumulação de metais contidos no pó da rocha biotita xisto. Os resultados obtidos indicaram a presença de metais em excesso logo após o término da exposição de 96 horas, mas após 15 e 30 dias em água limpa, os valores foram reduzidos, retornando aos patamares do grupo não exposto, sugerindo a excreção do material ingerido durante o período de exposição (OLIVEIRA-FILHO *et al.*; 2022).

Estudos realizados por Niva *et al.* (2021) usaram a faixa de concentração de 0%; 0,1%; 1,0%; 10% e 100% de pós de rocha (biotita xisto e fonolito) para avaliação ecotoxicológica com organismos do solo (minhocas, colêmbolos e enquitreídeos). Os resultados indicaram efeitos negativos aos organismos, sendo que para colêmbolos e enquitreídeos os efeitos adversos foram verificados em concentrações de 10% ou com o uso de pós de rocha puros (100%). O efeito observado foi associado a maior presença de sais, especialmente no fonolito e em mudanças na textura do solo quando altas concentrações foram usadas.

Sisinno *et al.* (2025) avaliaram a toxicidade crônica de pós de rochas passíveis de serem utilizados na agricultura com ensaios de reprodução com colêmbolos e enquitreídeos, usando como organismos-teste as espécies *Folsomia candida* e *Enchytraeus crypticus*,

respectivamente e as mesmas faixas de diluição do estudo de Niva *et al.* (2021). Os resultados preliminares indicaram toxicidade crônica para *F. candida* na concentração de 100% para todas as amostras, entretanto, esta condição não ocorreu com *E. crypticus*. O estudo destaca a importância da aplicação das doses apropriadas dos pós de rocha e a inclusão de indicadores biológicos no processo de registro de fertilizantes no Brasil.

Alguns estudos ecotoxicológicos realizados com pós de rocha, estão compilados nas Orientações para Avaliação da Periculosidade Ambiental de Remineralizadores de Solos sobre Organismos Terrestres e Aquáticos (OLIVEIRA-FILHO; NIVA; MARTINS, 2023).

7 | DESAFIOS PARA O APROVEITAMENTO DOS RESÍDUOS E REJEITOS DE MINERAÇÃO

Um fator importante para reduzir a geração de resíduos da mineração é o aprofundamento no conhecimento geológico, de forma que a exploração dos minérios seja realizada com maior acurácia e precisão (IBRAM, 2016).

Entretanto, uma vez que ainda se observa uma grande geração de resíduos e rejeitos originados do setor mineral devido ao aumento da demanda tanto de minerais metálicos como não metálicos, um dos grandes desafios do setor é o aproveitamento destes materiais para novos usos.

Segundo Carvalho *et al.* (2017), além da diminuição de custos operacionais (*opex*) e de capital (*capex*) das minas, a indústria da mineração deverá prover soluções para minimizar o volume de material movimentado da mina e de resíduos. O volume crescente de resíduos gerados na mineração demanda o aprimoramentos nos mecanismos de gestão e desenvolvimento de tecnologias alternativas para disposição de baixo risco e para a sua recuperação (CARVALHO *et al.*, 2017).

Algumas das estratégias para a gestão dos resíduos de mineração descritas no Plano Nacional de Resíduos Sólidos visam estimular o desenvolvimento de tecnologias e processos para minimizar a geração de rejeitos e a conseqüente disposição em barragens; estimular o aproveitamento e reciclagem de estéreis e rejeitos de mineração; e regulamentar o aproveitamento do rejeito, do estéril e dos resíduos de mineração (BRASIL, 2022). Com relação ao último item, pode-se citar a Resolução nº 85/2021 da Agência Nacional de Mineração (ANM) onde estão estabelecidos os critérios para o aproveitamento de rejeitos de mineração (BRASIL, 2021).

Segundo o IBRAM, o entendimento que o rejeito de hoje pode ser o minério de amanhã exige que uma nova visão seja incorporada, com a necessidade do desenvolvimento de projetos de PD&I, incluindo os relacionados à Avaliação do Ciclo de Vida (ACV) para a redução da geração e identificação de novos usos para estes materiais (IBRAM, 2016). A ACV é uma metodologia de gestão ambiental usada para avaliar os impactos ambientais de um produto, processo ou serviço ao longo de todas as suas etapas, desde a extração de matérias-primas até o descarte final (“do berço ao túmulo”) (ABNT, 2025a).

Também é importante ressaltar que, segundo o IBRAM, somente um pequeno número de bens minerais tem sido utilizado como produtos circulares (IBRAM, 2022). A abordagem sistêmica da Economia Circular implica na manutenção de um fluxo circular de recursos, recuperando, retendo ou agregando valor, e contribuindo para o desenvolvimento sustentável (ABNT, 2024f).

Com relação à questão dos resíduos e rejeitos da indústria da mineração, segundo Carvalho *et al.* (2017), pode-se observar, tanto no Brasil quanto em outros países mineradores, um movimento de investimento no desenvolvimento e na difusão de tecnologias e processos com foco na recuperação e reaproveitamento de resíduos e elementos dispersos, incluindo processos para destinação alternativa de uso e tecnologias de baixo risco ambiental para a disposição de resíduos.

A recuperação de metais críticos (considerados importantes e que são vulneráveis a interrupção de fornecimento) a partir de resíduos da mineração e processamento são cada vez mais vistos como um recurso valioso (KARA *et al.*, 2023). Um exemplo das possibilidades referentes à reutilização de resíduos da mineração é a utilização da tecnologia eletrólise de óxido fundido (MOE, da

sigla em inglês para *Molten Oxide Electrolysis*), para extrair seletivamente metais como o nióbio e o tântalo a partir de rejeitos de mineração (BRASIL MINERAL, 2024).

Dentre as possibilidades de recuperação de metais de interesse, a biolixiviação surge como uma alternativa ecologicamente correta e econômica aos métodos hidrometalúrgicos e pirometalúrgicos convencionais, uma vez que utiliza microrganismos e seus metabólitos para extrair metais minérios e rejeitos (FUNARI *et al.*, 2023). Uma revisão desenvolvida por Roberto e Shippers (2022) apresentou a aplicação de recuperação de cobre a partir da biolixiviação em países como Chile, China, Peru e Zâmbia, demonstrando sua eficiência. Processos metalúrgicos podem gerar tiocianato (SCN^-) por meio de reações do cianeto com o enxofre presente nos minérios, sendo esse difícil de ser removido devido a sua estabilidade. Como exemplo de utilização de microrganismos, um trabalho realizado por Alcoba, Ferreira e Vullo (2025) aplicou estirpes de *Pseudomonas mandelli* M1 e *Pseudomonas veronii* M3, bactérias nativas isoladas, em ensaios de degradação de tiocianato oriundos de atividades de mineração de ouro em San Juan (Argentina), alcançando remoções acima de 90% do contaminante.

No caso do minério de ferro, alguns projetos têm avançado quanto à aplicação de tecnologia de concentração magnética de minérios para maior recuperação de finos e ultrafinos, incluindo processamento de resíduos de pilhas ou barragens. Apesar de ser uma solução interessante, em aspectos econômicos e tecnológicos, ela é limitada no que concerne a volume (CARVALHO *et al.*, 2017). Rejeitos de minério de ferro também têm sido estudados como componentes para a fabricação de insumos para a construção civil. Estes rejeitos podem ser usados na fabricação de argamassa e em diversos tipos de produtos como blocos de

pavimentação e blocos de alvenaria (IBRAM, 2016) e também como pigmento para tinta e sais férricos para o saneamento básico (BRASIL, 2022).

Uma tecnologia para transformação de rejeitos e estéreis de minerações de ferro, bauxita, fosfato e calcário em produtos como cimento (para construção de blocos, vigas, passeios e estradas), areia (que pode alimentar a indústria de vidros e de *chips* de computador) e pigmentos (para a produção de tintas) já foi desenvolvida. Entretanto, por limitações de mercado – entre outros motivos, pela rigidez locacional da mina –, e pelo baixo preço desses insumos derivados, a utilização restringe-se a um mercado próximo (CARVALHO *et al.*, 2017).

O setor de rochas ornamentais se caracteriza por grandes volumes de perda de material, tanto na etapa de extração como no beneficiamento. A taxa de aproveitamento média dos rejeitos oriundos de pedreiras de rochas ornamentais se estima em 30%; o que resulta em enormes volumes de rejeitos grossos nas frentes de lavra. Durante a etapa de beneficiamento, os rejeitos são finos, provenientes da serragem dos blocos em chapas e do polimento (CASTRO, 2011). Vários estudos mostram que existem alternativas para o seu aproveitamento, com sua inclusão nas indústrias da cerâmica, do vidro, da construção civil, metalúrgica, química, agricultura, artesanato, confecção de pavimentos e tijolos, dentre outros (IBRAM, 2016).

Os estéreis também podem ser utilizados na recuperação de voçorocas e preenchimento de cavas exauridas de minas (IBRAM, 2016) e aproveitados com função paisagística (BRASIL, 2022).

Estudos demonstraram a utilização de pós de rocha para a recuperação de áreas degradadas, para melhorar a estrutura do

solo e combater a erosão, e para a redução das emissões de carbono associadas com a produção de fertilizantes (DUPLA *et al.*, 2024; RAMOS *et al.*, 2022; THEODORO *et al.*, 2021).

Resíduos de pó de pedra, originados da britagem de resíduos de rochas ornamentais foram usados como substituição da areia, na produção de argamassa (BRASIL, 2022). Outro exemplo é a utilização dos resíduos como agregado para a pavimentação asfáltica (BRASIL, 2022).

Alguns resíduos/rejeitos do setor mineral, se atenderem às especificações definidas pelo Ministério da Agricultura e Pecuária (MAPA), poderão ser utilizados como fertilizantes e componentes de materiais secundários para serem utilizados na agricultura. Isto se aplica, por exemplo, a alguns rejeitos provenientes da flotação – processo físico-químico de superfície, usado na separação de minerais, no qual partículas minerais aderem às bolhas de ar e formam agregados que flutuam sob a forma de espuma – da indústria mineral (IBRAM, 2016).

Outros resíduos da extração de rochas também podem ser utilizados como fontes de nutrientes como, por exemplo o fósforo e o potássio, encontrados em rochas fosfáticas e silicáticas (RIBEIRO *et al.*, 2020). Tais resíduos podem ser utilizados para fertilizar o solo, em um processo conhecido como rochagem, a partir de agrominerais (ou remineralizadores). Para tanto, na rizosfera das plantas ocorrem diferentes processos que contribuem para a dissolução do mineral, uma vez que a interação entre os microrganismos presentes no solo atua originando ligantes complexantes (sideróforos e ácidos orgânicos) afetando o pH (devido a produção de ácidos orgânicos ou inorgânico) ou a partir de reações de oxirredução (RIBEIRO *et al.*, 2020). Todavia,

é necessária a realização de mais estudos relacionados aos efeitos em longo prazo da aplicação de pós de rocha como fertilizantes (DUPLA *et al.*, 2024).

Outros exemplos de resíduos que podem ser utilizados na agricultura são o pó de rocha calcário, utilizado como corretivo do pH de solos (IBRAM, 2016), e resíduos de mármore, para calagem de solos (BRASIL, 2022). O fosfogesso tem sido aplicado como fonte de cálcio, como condicionador de solos, como fertilizante para o crescimento de plantas (fonte de nutrientes) etc. (SILVA *et al.*, 2022).

Práticas de circularidade envolvendo resíduos da mineração têm sido desenvolvidas cada vez mais e servem para incentivar todo o setor, conforme descrito em um documento do IBRAM (2022). Entretanto, em um estudo realizado por Dias, Nogueira e Becheleni (2022), foi observado que a maior parte das empresas de mineração (minério de ferro, minério de ouro e lítio) participantes do estudo (60%) enfrenta desafios para o reuso de diversos resíduos produzidos pelos seus respectivos processamentos de minérios.

Dentre as principais dificuldades para o reuso estão: a logística, como principal, e em seguida o custo, as restrições operacionais e a legislação. Neste estudo, as ações de reuso de resíduos relatadas foram:

- Aumento da produção anual (recuperação de minério de ferro de barragem através dos métodos de concentração);
- Reconformação de taludes, o preenchimento de cavas exauridas para RAD (Recuperação de Áreas Degradadas) pela mineração e a pavimentação de acessos;

- A fabricação de blocos, pisos, meio fio, alambrados e outros artefatos direcionados à construção civil (DIAS; NOGUEIRA; BECHELENI, 2022).

Para a prática do reuso de resíduos, foi relatado que as empresas se baseiam em algumas motivações, cujas principais foram:

- A preservação do solo;
- A preservação da água;
- O atendimento à legislação ambiental;
- A redução do consumo de água; e
- A segurança dos trabalhadores (DIAS; NOGUEIRA; BECHELENI, 2022).

8 | CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com a crescente demanda dos recursos minerais, a indústria da mineração deverá estar atenta ao aumento dos impactos causados por suas atividades, incluindo a crescente produção de resíduos e rejeitos.

A indústria mineral precisa acompanhar os desafios do desenvolvimento sustentável e incrementar a reutilização dos seus resíduos e rejeitos. Muitos destes materiais podem ser utilizados em novos ciclos produtivos, entretanto, é essencial que seja garantido que sua nova finalidade não se transforme em uma fonte secundária de contaminação ambiental que pode afetar, inclusive, a saúde humana.

Com base no seu uso seguro, resíduos e rejeitos originados do setor mineral que possam impactar não apenas a qualidade do solo, mas das águas superficiais e subterrâneas também deveriam ser avaliados antes de serem destinados para uma nova utilização.

Ensaio ecotoxicológicos são ferramentas importantes para a avaliação do equilíbrio dos ecossistemas e estão sendo aplicados em vários casos no setor mineral, tanto para o monitoramento de áreas em atividade (p. ex. controle de efluentes e qualidade de corpos d'água superficiais) e abandonadas, como na avaliação dos impactos ambientais causados por acidentes originados por empreendimentos minerários.

Espera-se que a aplicação destes ensaios seja melhor difundida no setor mineral e que sejam desenvolvidas novas pesquisas que auxiliem na ampliação de sua utilização neste setor.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBERT, S.; BLOEM, E. Ecotoxicological methods to evaluate the toxicity of bio-based fertilizer application to agricultural soils – A review. **Science of the Total Environment**, v. 870, 163076, 2023.

ALCOBA, Y.Y.D.; FERREIRA, M.L.; VULLO, D.L. Effective thiocyanate biodegradation mediated by bacteria associated to Argentinean mining areas potentially applicable to wastewater biotreatment. **Clean Technologies and Environmental Policy**, v.27, p.1693-1705, 2025.

ALVARENGA, P.; PALMA, P.; GONÇALVES, A.P.; FERNANDES, R.M.; VARENNES, A.; VALLINI, G.; DUARTE, E.; CUNHA-QUEDA, A.C. Evaluation of tests to assess the quality of mine-contaminated soils. **Environmental Geochemical Health**, v.30, p.95-99, 2008.

ALVARENGA, P.; MOURINHA, C.; FARTO, M.; PALMA, P.; SENGO, J.; MORAIS, M.-C.; CUNHA-QUEDA, C. Ecotoxicological assessment of the potential impact on soil porewater, surface and groundwater from the use of organic wastes as soil amendments. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.126, p.102-110, 2016.

ALVARENGA, P.; GUERREIRO, N.; SIMÕES, I.; IMAGINÁRIO, M.J.; PALMA, P. Assessment of the environmental impact of acid mine drainage on surface water, stream sediments, and macrophytes using a battery of chemical and ecotoxicological indicators. **Water**, v.13, 1436, 2021.

ALVES, O.R.; OGURA, A.P.; PINTO, T.J.S.; ESPÍNDOLA, E.L. Terrestrial species exposed to mining tailings: Assessing the potential ecotoxicological impacts of the Fundão Dam collapse in Brazil. **Journal of Trace Elements and Minerals**, v. 6, 100102, 2023.

ANDRADE, T.C.G. **Impactos socioambientais decorrentes do rompimento da barragem de Fundão no Município de Barra Longa, Minas Gerais**. 2018. Dissertação apresentada no Programa de

Pós-graduação em Ambiente Construído e Patrimônio Sustentável da Escola de Arquitetura da Universidade Federal de Minas Gerais. Disponível em: https://repositorio.ufmg.br/handle/1843/MMMD-B9KGLU?locale=pt_BR. Acesso em: 10 nov. 2025.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 17616**: Qualidade do solo: Guia para a seleção e a avaliação de bioensaios para caracterização ecotoxicológica de solos e materiais de solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2010.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 11267**: Qualidade do solo: Inibição da reprodução de Collembola (*Folsomia candida*) por poluentes do solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2019.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15469**: Ecotoxicologia: Coleta, preservação e preparo de amostras. Rio de Janeiro: ABNT, 2021.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 15499**: Ecotoxicologia aquática: Toxicidade crônica de curta duração: Método de ensaio com peixes. Rio de Janeiro: ABNT, 2022.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 17100-1**: Gerenciamento de resíduos: Parte 1: Requisitos gerais. Rio de Janeiro: ABNT, 2023.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-1**: Resíduos sólidos: Parte 1: Requisitos de classificação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 10004-2**: Resíduos sólidos: Parte 2: Sistema geral de classificação de resíduos (SGCR). Rio de Janeiro: ABNT, 2024b.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13028**: Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de barragens para disposição de rejeitos, contenção de sedimentos e reserva de água: Requisitos Rio de Janeiro: ABNT, 2024c.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR 13029**: Mineração: Elaboração e apresentação de projeto de disposição de estéril em pilha. Rio de Janeiro: ABNT, 2024d.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 16387**: Qualidade do solo: Efeitos de contaminantes em Enchytraeidae (*Enchytraeus* sp.): Determinação dos efeitos na reprodução. Rio de Janeiro: ABNT, 2024e.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 59004**: Economia circular: Vocabulário, princípios e orientações para implementação. Rio de Janeiro: ABNT, 2024f.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 14040**: Gestão ambiental: Avaliação do ciclo de vida: Princípios e estrutura. Rio de Janeiro: ABNT, 2025a.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **ABNT NBR ISO 15799**: Qualidade do solo: Guia para a seleção e a avaliação de bioensaios para caracterização ecotoxicológica de solos e materiais de solo. Rio de Janeiro: ABNT, 2025b.

BANDARRA, B.S.; PEREIRA, J.L.; MARTINS, R.C.; QUINA, M.J. Avaliação ecotoxicológica para classificação de resíduos. **CAPTAR**, v.8, n.2, p.51-66, 2019.

BANDARRA, B.S.; PASSOS, H.; VIDAL, T.; MARTINS, R.C.; QUINA, M.J.; PEREIRA, J.L.; RÖMBKE, J. Evaluation of a battery of biotests to improve waste ecotoxicity assessment (HP 14), using incineration bottom ash as a case study. **Journal of Environmental Management**, v.344, 118513, 2023.

BEGGIO, G.; BONATO, T.; GIARDINA, S.; GRENNI, P.; MARIANI, L.; MAGGI, L.; HENNEBERT, P.; LORO, F.; PIVATO, A. Challenges and perspectives of direct test methods for assessing waste hazardous properties (HP). **Detritus**, v.15, 2021.

BIO by Deloitte. **Study to assess the impacts of different classification approaches for hazard property "HP 14" on selected waste streams – Final report.** Prepared for the European Commission (DG ENV), in collaboration with INERIS. 2015. Disponível em: <https://ec.europa.eu/environment/pdf/waste/studies/hazard%20property.pdf>. Acesso em: 22 out. 2025.

BORI, J.; VALLÈS, B.; NAVARRO, A.; RIVA, M. C. Ecotoxicological risks of the abandoned F-Ba-Pb-Zn mining área of Osor (Spain). **Environmental Geochemistry and Health**, v.39, p.665-679, 2017.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Portaria Normativa IBAMA nº 84/1996. Registro e avaliação do potencial de periculosidade ambiental (PPA) de agrotóxicos, seus componentes e afins, e institui o sistema permanente da avaliação e controle dos agrotóxicos, segundo dispositivos do decreto nº 98.816 em seu art. 2º. 1996. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=99498>. Acesso em: 20 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instrução Normativa 1, de 14 de julho de 2000. Estabelece critérios a serem adotados pelo IBAMA para concessão de registro de dispersantes químicos empregados nas ações de combate a derrames de petróleo e seus derivados no mar. 2000. Disponível em: <http://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/IBAMA/IN0001-140700.PDF>. Acesso em: 25 set. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 357 de 17 de março de 2005. Dispõe sobre a classificação dos corpos de água e diretrizes ambientais para o seu enquadramento, bem como estabelece as condições e padrões de lançamento de efluentes, e dá outras providências. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 18 mar. 2005. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=450. Acesso em: 20 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 393, de 08 de agosto de 2007. Dispõe sobre o descarte contínuo de água de processo ou de produção em plataformas marítimas de petróleo e gás natural, e dá outras providências. Complementa a Resolução CONAMA nº 357/05 (art. 43, § 4o). **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 09 ago. 2007. Disponível em: https://www.cbhdoce.org.br/wp-content/uploads/2018/08/CONAMA_RES_CONS_2007_393.pdf. Acesso em: 30 out. 2025.

BRASIL. Presidência da República. Lei nº 12.305 de 2 de agosto de 2010. Institui a Política Nacional de Resíduos Sólidos, altera a Lei Nº 9.605 de 12 de fevereiro de 1998; e dá outras providências. 2010. Disponível em: https://www.planalto.gov.br/ccivil_03/_ato2007-2010/2010/lei/112305.htm. Acesso em: 16 jan. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 420 de 28 de dezembro de 2009. Dispõe sobre critérios e valores orientadores de qualidade do solo quanto à presença de substâncias químicas e estabelece diretrizes para o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas por essas substâncias em decorrência de atividades antrópicas. **Diário Oficial da União**, Seção 1, Brasília, 30 dez. 2009. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/sophia/cnia/legislacao/CONAMA/REA0420-281209.PDF>. Acesso em: 17 set. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 430 de 13 de maio de 2011. Dispõe sobre as condições e padrões de lançamento de efluentes, complementa e altera a Resolução nº 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente – CONAMA. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 16 mai. 2011. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=627. Acesso em: 17 set. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Conselho Nacional do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 454 de 01 de novembro de 2012. Estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional. **Diário Oficial [da] República Federativa do Brasil**, Brasília, 08 nov. 2012. Disponível em: https://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=667. Acesso em: 17 jul. 2025. Acesso em: 25 out. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis. Instrução Normativa 1, de 2 de janeiro de 2018. Define diretrizes que regulamentam as condições ambientais de uso e descarte de fluidos, cascalhos e pastas de cimento nas atividades de perfuração marítima de poços e produção de petróleo e gás, estabelece o Projeto de Monitoramento de Fluidos e Cascalhos, e dá outras providências. Disponível em: <https://www.ibama.gov.br/component/legislacao/?view=legislacao&legislacao=137998>. Acesso em: 20 out. 2025.

BRASIL. Ministério das Minas e Energia. Agência Nacional de Mineração. Resolução ANM nº 85 de 2 de dezembro de 2021. Dispõe sobre procedimentos para o aproveitamento de rejeitos e estéreis. 2021. Disponível em: <https://www.gov.br/anm/pt-br/resolucao-da-anm-ganha-selo-de-qualidade-regulatoria-do-ministerio-da-economia/resolucao-anm-no-85-02-12-2021.pdf/view>. Acesso em: 16 jan. 2025.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Secretaria de Qualidade Ambiental. **Plano Nacional de Resíduos Sólidos**. Brasília DF, 2022. Disponível em: <https://portal-api.sinir.gov.br/wp-content/uploads/2022/07/Planares-B.pdf>. Acesso em: 25 set. 2025.

BRASIL MINERAL. **Boston Metal inaugura fábrica de metais a partir de rejeitos de mineração**. 07/03/2024. Disponível em: <https://www.brasilmineral.com.br/noticias/boston-metal-inaugura-fabrica-de-metais-a-partir-de-rejeitos-de-mineracao>. Acesso em: 26/02/2025.

BROOKS, S.J.; ESCUDERO-OÑATE, C.; LILLICRAP, A.D. An ecotoxicological assessment of mine tailings from three Norwegian mines. **Chemosphere**, v.233, p.818-827, 2019.

BUCH, A.C.; NIEMEYER, J.C.; MARQUES, E.D.; SILVA-FILHO, E.V. Ecological risk assessment of trace metals in soils affected by mine tailings. **Journal of Hazardous Materials**, v. 403, 123852, 2021.

BUCH, A.C.; SIMS, D.B.; RAMOS, L.M.; MARQUES, E.D.; RITCHER, S; ABDULLAH, M.M.S.; SILVA-FILHO, E.V. Assessment of environmental pollution and human health risks of mine tailings in soil after dam failure of the Córrego do Feijão Mine (in Brumadinho, Brazil). **Environmental Geochemistry and Health**, v.46, n.72, p.1-23, 2024.

CARVALHO, P. S. L.; MESQUITA, P. P. D. M.; DIRQUES, R.; REGIS, D.; MEIRELLIS, T. L. **Sustentabilidade Socioambiental da Mineração**. Mineração – BNDES Setorial 47, p. 333-390. Rio de Janeiro: BNDES, 2017. Disponível em: <https://web.bndes.gov.br/bib/jspui/handle/1408/15361>. Acesso em: 30 jan. 2025.

CASTRO, N.F.; MARCON, D.B.; FREIRE, L.C.; LIMA, E.F.; ALMEIDA, P.F. Impacto do APL de rochas ornamentais do Espírito Santo nas comunidades. In: **APL's – Recursos Minerais Sustentabilidade Territorial**, p.139-176, v. II, 2011. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/1014/1/CCL0073-00-12.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

CHELINHO, S.; PEREIRA, C.; BREITENBACH, P.; BARETTA, D.; SOUSA, J.P. Quality standards for urban waste composts: The need for biological effect data. **Science of the Total Environment**, v.694, 133602, 2019.

COMITÉ EUROPÉEN DE NORMALISATION. **CEN 14735**. Characterization of waste: Preparation of waste samples for ecotoxicity tests. Brussels: Comité Européen de Normalisation, 2021.

COSTA, C.R.; OLIVI, P.; BOTTA, C.M.R.; ESPINDOLA, E.L.G. A toxicidade em ambientes aquáticos: discussão e métodos de avaliação. **Química Nova**, v.31, n.7, p.1820-1830, 2008.

DIAS-JÚNIOR, H.E.; MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O.; SILVA, R. Metais pesados, densidade e atividade microbiana em solo contaminado por rejeitos de indústria de zinco. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v.22, p.631-640, 1998.

DIAS, I.B.; NOGUEIRA, J.A.; BECHELENI, E.M.A. Análise dos desafios encontrados pelas mineradoras para viabilizar o reuso dos resíduos. In: Encontro Nacional de Tratamento de Minérios e Metalurgia Extrativa, 19., 2022, Armação dos Búzios. Anais [...]. Armação dos Búzios: CETEM/UFRJ/PUC. Disponível em: <https://publicacoes.entmme.org/filebase/2022/DIAS,%20IB%20NOGUEIRA,%20JA%20BECHELENI,%20EMA%20-%20ANALISE%20DOS%20DESAFIOS%20ENCONTRADOS%20PELAS%20MINERADORAS%20PARA%20VIABILIZAR%20O%20REUSO%20DOS%20RESIDUOS-146460>. PDF. Acesso em: 10 nov. 2025.

DUPLA, X.; CLAUTRE, R.; BONVIN, E.; GRAF, I.; BAYON, R.; GRAND, S. Let the dust settle: Impact of enhanced rock weathering on soil biological, physical, and geochemical fertility. **Science of the Total Environment**, v.954, 176297, 2024.

EUROPEAN UNION. EUROSTAT. **Waste Statistics**. 2022. Disponível em: https://ec.europa.eu/eurostat/statistics-explained/index.php?title=Waste_statistics#Total_waste_generation. Acesso em: 23 jan. 2025.

FUNARI, V.; TOLLER, S.; VITALE, L.; SANTOS, R.M.; GOMES, H.I. Urban mining of municipal solid waste incineration (MSWI) residues with emphasis on bioleaching technologies: A critical review. **Environmental Science and Pollution Research**, v.30, p.59128-59150, 2023.

GAUTHIER-MANUEL, H.; RADOLA, D.; CHOLET, F.; BUATIER, M.; VAUTHIER, R. A multidisciplinary approach for the assessment of origin, fate and ecotoxicity of metal(loid)s from legacy coal mine tailings. **Toxics**, v.9, 164, 2021.

HENNEBERT, P.; SLOOT, H.A.; REBISCHUNG, F.; WELTENS, R.; GEERTS, L. Hazard property classification of waste according to the recent propositions of the EC using different methods. **Waste Management**, v.34, p.1739-1751, 2014.

HENNEBERT, P. Proposal of concentration limits for determining the hazard property HP 14 for waste using ecotoxicological tests. **Waste Management**, v.74, p.74-85, 2018.

HENTATI, O.; ABRANTES, N.; CAETANO, A.L.; BOUGUERRA, S.; GONÇALVES, F.; RÖMBKE, J.; PEREIRA, R. Phosphogypsum as a soil fertilizer: Ecotoxicity of amended soil and elutriates to bacteria, invertebrates, algae and plants. **Journal of Hazardous Materials**, v.294, p.80-89, 2015.

HILSON, G.; MONHEMIUS, A.J. Alternatives to cyanide in the gold mining industry: What prospects for the future? **Journal of Cleaner Production**, v.14, n.12-13, p.1158-1167, 2006.

HÖSS, S.; RÖMBKE, J. Effects of waste materials on *Caenorhabditis elegans* (Nematoda) using the ISO standard soil toxicity test. **Environmental Science and Pollution Research**, v.26, n.25, p.26304-26312, 2019.

HUGUIER, P.; MANIER, N.; CHABOT, L.; BAUDA, P.; PANDARD, P. Ecotoxicological assessment of organic wastes spread on land: Towards a proposal of suitable test battery. **Ecotoxicology and Environmental Safety**, v.113, p.103-111, 2015.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Gestão e Manejo de Rejeitos da Mineração**. Brasília: IBRAM. 2016. 128 p. Disponível em: <https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2021/02/Gestao-e-Manejo-de-Rejeitos-da-Mineracao-2016.pdf>. Acesso em: 17 jan. 2025.

INSTITUTO BRASILEIRO DE MINERAÇÃO. **Práticas em Circularidade no Setor Mineral**. E. Book, 1.ed. Brasília: IBRAM. 2022. Cinthia de Paiva Rodrigues, Cláudia Franco de Salles Dias, Christiane Malheiros, Orgs. Disponível em: https://ibram.org.br/wp-content/uploads/2022/09/IBRAM_Praticas-em-Circularidade-no-Setor-Mineral_WEB.pdf. Acesso em: 28 set. 2025.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO 17616**. Soil quality: Guidance on the choice and evaluation of bioassays for ecotoxicological characterization of soils. Geneve: ISO, 2019a.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 21268-1**. Soil quality: Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil materials: Part 1: Batch test using a liquid to solid ratio of 2 l/kg dry matter. Geneve: ISO, 2019b.

INTERNATIONAL ORGANIZATION FOR STANDARDIZATION. **ISO/TS 21268-2**. Soil quality: Leaching procedures for subsequent chemical and ecotoxicological testing of soil and soil-like materials: Part 2: Batch test using a liquid to solid ratio of 10 l/kg dry matter. Geneve: ISO, 2019c.

KARA, T.; KREMSER, K.; WAGLAND, S.T.; COULON, F. Bioleaching metal-bearing wastes and by-products for resource recovery: A review. **Environmental Chemistry Letters**, v.21, p.3329-3350, 2023.

LAPA, N.; BARBOSA R.; MORAIS, J.; MENDES, B.; MÉHU, J.; SANTOS OLIVEIRA, J.F. Ecotoxicological assessment of leachates from MSWI bottom ashes. **Waste Management**, v.22, p.583-593, 2002.

LOUREIRO, S.; FERREIRA, A.L.G.; SOARES, A.M.V.M. Evaluation of the toxicity of two soils from Jales Mine (Portugal) using aquatic bioassays. **Chemosphere**, v.61, p.168-177, 2005.

MABOETA, M.S.; OLADIPO, O.G.; BOTHA, S.M. Ecotoxicity of mine tailings: Unrehabilitated versus rehabilitated. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.100, n.5, p.702-707, 2018.

MANSKINEN, K.; NURMESNIEMI, H.; PÖYKIÖ, R. Total and extractable non-process elements in green liquor dregs from the chemical recovery circuit of a semi-chemical pulp mill. **Chemical Engineering Journal**, v.166, p.954-961, 2011.

MARQUES, C.R.; CAETANO, A.L.; HALLERD, A.; GONÇALVES, F.; PEREIRA, R.; RÖMBKE, J. Toxicity screening of soils from different mine áreas – A contribution to track the sensitivity and variability of *Arthrobacter globiformis* assay. **Journal of Hazardous Materials**, v.274, p.331-341, 2014.

MARQUES, C.R.; EL-AZHARI, N.; MARTIN-LAURENT, F.; PANDARD, P.; MELINE, C.; PETRE, A.L.; ECKERT, S.; ZIPPERLE, J.; VÁNA, M.; MALY, S.; SINDELÁROVA, L.; AMENORI, A.S.; HOFMAN, J.; KUMAR, A.; DOAN, H.; MCLAUGHLIN, M.; RICHTER, E.; RÖMBKE, J. A bacterium-based contact assay for evaluating the quality of solid samples – Results from an international ring-test. **Journal of Hazardous Materials**, v.352, p.139-147, 2018.

MELGAÇO, L.A.O.; QUITES, N.C.; LEÃO, V.A. Uso do fosfogesso como fonte de sulfato para bactérias redutoras de sulfato em um reator contínuo de leito fluidizado. **Engenharia Sanitária e Ambiental**, v.25 n.1, p.157-165, 2020.

MERGULHÃO, A.C.E.S.; SILVA, M.LLR.; LYRA, M.C.C.P. Avaliação do estado microbiológico do solo em área preservada e impactada por mineração no semiárido de Pernambuco. **Ambiência Guarapuava (PR)**, v.15, n.3, p.611-627, 2019.

MINAS GERAIS. Estado. Fundação Estadual do Meio Ambiente. FEAM. **Inventário de Resíduos Sólidos da Mineração – Ano Base 2017**. Belo Horizonte:FEAM, 47p., 2018. Disponível em:

https://feam.br/documents/117662/6966636/Inventario_Minera%C3%A7%C3%A3o_ano_base_2017/6a266aae-d49d-6b73-d9a9-d2b95b837604?version=1.0&t=1723497097187. Acesso em: 30 out. 2025.

MINAS GERAIS. Estado. **Diagnóstico do Setor Mineral de Minas Gerais**. Belo Horizonte, 2020. Disponível em: https://www.agenciaminas.mg.gov.br/ckeditor_assets/attachments/11205/130fd1adf19cc74be83c7c6c829c53b9.pdf. Acesso em: 29 out. 2025.

MOSER, H.; RÖMBKE, J. **Ecotoxicological Characterization of Waste – Results and Experiences of a European Ring Test**. New York: Springer Ltd., 308 p., 2009.

MOSER, H.; RÖMBKE, J.; DONNEVERT, G.; BECKER, R. Evaluation of biological methods for a future methodological implementation of the Hazard criterion H14 ‘ecotoxic’ in the European waste list (2000/532/EC). **Waste Management & Research**, v.29, n.2, p.180-187, 2011.

NATARAJAN, K.A. Chapter 13 – Microbial aspects of acid mine drainage – Mining environmental pollution and control. In: **Biotechnology of Metals: Principles, Recovery Methods and Environmental Concerns** (Natarajan K.A., Ed.). Amsterdam: Elsevier, p.395-432, 2018.

NIEMEYER, J.C.; MOREIRA-SANTOS, M.; NOGUEIRA, M.A.; CARVALHO, G.M.; RIBEIRO, R.; SILVA, E.M.; SOUSA, J.P. Environmental risk assessment of a metal-contaminated area in the Tropics. Tier I: screening phase. **Journal of Soils and Sediments**, v.10, p.1557-1571, 2010.

NIVA, C.C.; SEGAT, J.C.; BARETTA, D.; BARETTA, C.R.D.M.; OLIVEIRA, M.L.; FIALHO, A.R.; MARCHI, G.; MARTINS, E.S. Ecotoxicological assessment of silicate rock fertilizers using soil invertebrates. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.56, e01454, 2021.

OLIVEIRA-FILHO, E.C. Avaliação da toxicidade. In: **Princípios de Toxicologia Ambiental** (Sisinho, C.L.S.; Oliveira-Filho, E.C., Orgs.). Rio de Janeiro: Interciência, p.137-153, 2013.

OLIVEIRA-FILHO, E.C.; MUNIZ, D.H.F.; FERREIRA, M.F.N.; GRISOLIA, C.K. Evaluation of acute toxicity, cytotoxicity and genotoxicity of a nickel mining waste to *Oreochromis niloticus*. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.85, p.467-471, 2010.

OLIVEIRA-FILHO, E.C.; LIMA, L.S.; MUNIZ, D.H.F.; FERREIRA, M.F.N.; MALAQUIAS, J.V.; GRISOLIA, C.K. Bioavailability assessment of metals from a nickel mining residue in the gastrointestinal tract of *Oreochromis niloticus* in vivo. **Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology**, v.91, p.533-538, 2013.

OLIVEIRA-FILHO, E.C.; MUNIZ, D.H.F.; RESENDE, A.V.; MARTINS, E.S. Solubility, toxicity, and accumulation of metals from biotite schist rock in *Danio rerio* fish. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.57, e01342, 2022.

OLIVEIRA-FILHO, E.C.; NIVA, C.C.; MARTINS, E. S. **Orientações para avaliação da periculosidade ambiental de remineralizadores de solos sobre organismos terrestres e aquáticos (Circular Técnica)**. Planaltina – DF: Embrapa Cerrados, 2023. Disponível em: <https://www.infoteca.cnptia.embrapa.br/infoteca/bitstream/doc/1161608/1/CT-56-CPAC-05022024-OLIVEIRA-FILHO.pdf>. Acesso em: 10 set. 2025.

PANDARD, P.; DEVILLERS, J.; CHARISSOU, A.-M.; POULSEN, V.; JOURDAIN, M.-J.; FÉRARD, J.-F.; GRAND, C.; BISPO, A. Selecting a battery of bioassays for ecotoxicological characterization of wastes. **Science of the Total Environment**, v.363, p.114-125, 2006.

PANDARD, P.; RÖMBKE, J. Proposal for a “Harmonized” strategy for the assessment of the HP 14 property. **Integrated Environmental Assessment and Management**, v.9, n.4, p.665-672, 2013.

PEIXOTO, P.V.L.; ANDRADE, I.B.L.; SALES, B.C.P.; PEREIRA, L.C. Rupture of Brumadinho dam (Minas Gerais, Brazil): Embryotoxicity in zebrafish induced by metal-mixture contaminated water. **Journal of Environmental Science and Health, Part B**, v.57, n.6, p.479-488.

PORTUGAL. Portaria n° 185/2022 de 21 de julho de 2022. Aprova os tipos de matérias fertilizantes não harmonizadas, define o tipo de matérias-primas que podem ser utilizadas na sua produção e estabelece os respetivos requisitos de colocação no mercado. Disponível em: <https://files.diariodarepublica.pt/1s/2022/07/14000/0000500044.pdf>. Acesso em: 12 nov. 2025.

QUINTARELLI, J.M.; SILVA JUNIOR, G.C.; VIGLIO, E.P. A note on the influence of the mine tailings released in the Córrego do Feijão mine disaster on the water bodies of Brumadinho, Minas Gerais, Brazil. **Mine Water and the Environment**, v.42, p.187-199, 2023.

RAMOS, C.G.; OLIVEIRA, M.L.S.; PENA, M.L.F.; CANTILLO, A.M; AYARZA, L.P.L.; KORCHAGIN, J.; BORTOLUZZI, E.C. Nanoparticles generated during volcanic rock exploitation: An overview. **Journal of Environmental Chemical Engineering**, v.9, 106441, 2021.

RIBEIRO, I.D.A.; VOLPIANO, C.G.; VARGAS, L.K.; GRANADA, C.E.; LISBOA, B.B.; PASSAGLIA, L.M.P. Use of mineral weathering bacteria to enhance nutrient availability in crops: A review. **Frontiers in Plant Science**, v.11, 590774, 2020.

ROBERTO, F.R.; SCHIPPERS, A. Progress in bioleaching: Part B, applications of microbial processes by the minerals industries. **Applied Microbiology and Biotechnology**, v.106, p.5913-5928, 2022.

RÖMBKE, J.; MOSER, T.; MOSER, H. Ecotoxicological characterisation of 12 incineration ashes using 6 laboratory tests. **Waste Management**, v.29, p.2475-2482, 2009.

RÖMBKE, J. Testing of 24 potentially hazardous wastes using 6 ecotoxicological tests. **Detritus**, v.4, p.4-21, 2018.

SÃO PAULO. Estado. Companhia Ambiental do Estado de São Paulo. CETESB. Decisão de Diretoria N.º 127/2022/E, de 06 de dezembro de 2022. Dispõe sobre a homologação da Norma Técnica CETESB P4.001 – Avaliação de Risco Ecológico (ARE) – Áreas contaminadas / Parte 1, 1ª Edição, 2022. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/wp-content/uploads/2022/12/DD-127-2022-E-Homologacao-da-Norma-Tecnica-P4.001-Avaliacao-de-risco-ecologico.pdf>. Acesso em: 05 nov. 2025.

SILVA, L.F.O.; OLIVEIRA, M.L.S.; CRISSIEN, T.J.; SANTOSH, M.; BOLIVAR, J.; SHAO, L.; DOTTO, G.L.; GASPAROTTO, J.; SCHINDLER, M. A review on the environmental impact of phosphogypsum and potential health impacts through the release of nanoparticles. **Chemosphere**, v. 286, 131513, 2022.

SISINNO, C.L.S.; SÁFADI, R.S. Controle de qualidade dos resultados em toxicologia ambiental. In: **Princípios de Toxicologia Ambiental** (Sisinno, C.L.S.; Oliveira-Filho, E.C., Orgs.). Rio de Janeiro: Interciência, p.173-178, 2013.

SISINNO, C.L.S.; NIEMEYER, J.C.; SEGAT, J.C.; FILHO, O.L.C.I.; NIVA, C.C.; BROWN, G.G. Importância e aplicações dos ensaios ecotoxicológicos com oligoquetas. In: **Ecotoxicologia terrestre: Métodos e aplicações dos ensaios com oligoquetas** (Niva, C.C.; Brown, G.G., Eds.). Brasília DF: Embrapa, p.45-70, 2019. Disponível em: <https://www.alice.cnptia.embrapa.br/alice/bitstream/doc/1115848/1/CintiaNivaLivroEcotoxilogia2019final.pdf>. Acesso em: 25 set. 2025.

SISINNO, C.L.S.; CUNHA, C.D. Avaliação do impacto ambiental gerado por resíduos provenientes da indústria mineral: Foco em nanopartículas. In: Jornada do Programa de Capacitação Institucional, 13., 2024, Rio de Janeiro. Anais [...]. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/handle/cetem/2923>. Acesso em: 28 ago. 2025.

SISINNO, C.L.S.; MOREIRA, J.C.; PART, F.; BAREK, J.; RIZZO, A.C.L.; CUNHA, C.D. **Nanociência e nanotecnologia: Considerações gerais para o setor mineral**. Série Tecnologia Ambiental STA 133, 77p., 2024. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/2892/1/STA-133.pdf>. Acesso em: 6 out. 2025.

SISINNO, C.; NIEMEYER, J.; PAIXÃO, F.; BUCH, A.; RIZZO, A.; CUNHA, C. Terrestrial ecotoxicity evaluation of rock powders used in agriculture in Brazil: Preliminary results with *Enchytraeus crypticus* and *Folsomia candida*. In: **SETAC Europe 35th Annual Meeting Abstract Book**. Viena: SETAC, p.11, 2025. Disponível em: <https://www.setac.org/resource/abstract-book-vienna-pdf.html>. Acesso em: 29 out. 2025.

STIERNSTROM, S.; WIK, O.; BENDZ, D. Evaluation of frameworks for ecotoxicological hazard classification of waste. **Waste Management**, v.58, p.14-24, 2016.

THEODORO, S.H.; MEDEIROS, F.P.; IANNIRUBERTO, M.; JACOBSON, T.K.B. Soil remineralization and recovery of degraded areas: An experience in the tropical region. **Journal of South America Earth Science**, v.107, 103014, 2021.

TRINDADE, R.B.E.; SOARES, P.S. **Tecnologia de sistemas passivos para o tratamento de drenagem ácida de minas**. Série Tecnologia Mineral 30. Rio de Janeiro: CETEM/MCTI, 2004. Disponível em: <http://mineralis.cetem.gov.br/bitstream/cetem/342/1/sta-30.pdf>. Acesso em: 10 nov. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2008/98/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 19 de novembro de 2008 relativa aos resíduos e que revoga certas directivas. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02008L0098-20180705>. Acesso em: 10 nov. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Directiva 2010/63/CE do Parlamento Europeu e do Conselho de 22 de setembro de 2010 relativa à proteção dos animais utilizados para fins em experimentos. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/PDF/?uri=CELEX:02010L0063-20190626>. Acesso em: 10 nov. 2025.

UNIÃO EUROPEIA. Regulamento (UE) 2019/521 da Comissão de 27 de março de 2019 que altera, para efeitos de adaptação ao progresso técnico e científico, o Regulamento (CE) nº 1272/2008 do Parlamento Europeu e do Conselho relativo à classificação, rotulagem e embalagem de substâncias e misturas. 2019. Disponível em: <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/PT/TXT/?uri=CELEX:32019R0521&qid=1720464046424>. Acesso em: 10 nov. 2025.

VERGILIO, C.S.; LACERDA, D.; OLIVEIRA, B.C.V.; SARTORI, E.; CAMPOS, G.M.; PEREIRA, A.L.S.; AGUIAR, D.B.; SOUZA, T.S.; ALMEIDA, M.G.; THOMPSON, F.; REZENDE, C.E. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). **Scientific Reports**, v.10, 5936, 2020.

VERGILIO, C.S.; LACERDA, D.; SOUZA, T.S.; OLIVEIRA, B.C.V.; FIORESI, V.S.; SOUZA, V.V.; RODRIGUES, G.R.; BARBOSA, M.K.A.M.; SARTORI, E.; RANGEL, T.P.; ALMEIDA, M.G.; THOMPSON, F.; REZENDE, C.E. Immediate and long-term impacts of one of the worst mining tailing dam failure worldwide (Bento Rodrigues, Minas Gerais, Brazil). **Science of the Total Environment**, v.756, 143697, 2021.

VITÓ, C.V.G.; VIEIRA, H.G.; FERRAREZ, A.H.; ALMEIRA, C.M.S.; SILVA, F.L.F.; MATOS, W.O.; SOUZA, M.O. Inorganic content of rock dust waste from northwest of Rio de Janeiro, Brazil: Do environmental risks incur from its use as natural fertilizer? **Environmental Monitoring Assessment**, v.192, n.380, p.1-9, 2020.

WILKE, B.-M.; RIEPERT, F.; KOCH, C.; KUHNE, T. Ecotoxicological characterization of hazardous waste. **Ecotoxicological and Environmental Safety**, v.70, p.283-293, 2008.

WUTTKE, J.; WALTHER, M. **Recommendations for the Ecotoxicological Characterization of Wastes**. Germany Federal Environmental Agency: Dessau-Roßlau, 2013. Disponível em: https://www.bmu.de/fileadmin/Daten_BMU/Pool/Forschungsdatenbank/fkz_3711_35_301_handlungsempfehlung_oeokotoxikolog_abfaelle_en_bf.pdf. Acesso em: 23 out. 25.

SÉRIES CETEM

As Séries Monográficas do CETEM são o principal material de divulgação da produção científica realizada no Centro. Até o final do ano de 2025, já foram publicados, eletronicamente e/ou impressos em papel, mais de 380 títulos, distribuídos entre as seis séries atualmente em circulação: Rochas e Minerais Industriais (SRMI), Tecnologia Mineral (STM), Tecnologia Ambiental (STA), Estudos e Documentos (SED). A Série Iniciação Científica consiste numa publicação eletrônica anual.

A lista das publicações poderá ser consultada em nossa homepage. As obras estão disponíveis em texto completo para download. Visite-nos em <https://www.gov.br/cetem/pt-br/assuntos/repositorio-mineralis-e-biblioteca>.

Últimos números da Série Tecnologia Ambiental

STA-143 – **Estudo das argamassas das fachadas da Catedral Presbiteriana do Rio de Janeiro.** Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Giovanna Oliveira dos Santos Consoli Louro, Leila Sabrina Fazolato de Aguiar, Ana Paula Tantos Costa e Rosana Elisa Coppedê Silva, 2025.

STA-142 - **Avaliação de risco à saúde humana da utilização de resíduos de rochas ornamentais como fertilizantes naturais.** Cristiane Andrade de Lima, Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Manuella de Lima Ribeiro e Pedro Paulo Cardoso Lima, 2025.

STA-141 – **Produção de piso gerador de energia constituído por resina e resíduos do mármore Bege Bahia.** Roberto Carlos da Conceição Ribeiro, Lucas Marques Palermo de Aguiar, Williane Gomes de Figueiredo, Pedro Paulo Cardoso Lima, Marcell Nascimento da Conceição, Henriette Santos Branco, José Marcos do Rosário Barreira e Ana Clara Soares, 2025.

INFORMAÇÕES GERAIS

CETEM – Centro de Tecnologia Mineral
Avenida Pedro Calmon, 900 – Cidade Universitária
21941-908 – Rio de Janeiro – RJ
Geral: (21) 3865-7222
Biblioteca: (21) 3865-7218
E-mail: biblioteca@cetem.gov.br
Homepage: <http://www.cetem.gov.br>

NOVAS PUBLICAÇÕES

Se você se interessar por um número maior de exemplares ou outro título de uma das nossas publicações, entre em contato com a nossa biblioteca no endereço acima.

Solicita-se permuta.

We ask for interchange.



Missão Institucional

Desenvolver tecnologias inovadoras e sustentáveis, e mobilizar competências visando superar desafios nacionais do setor mineral.

O CETEM

O Centro de Tecnologia Mineral - CETEM é um instituto de pesquisas, vinculado ao Ministério da Ciência, Tecnologia e Inovação - MCTI, dedicado ao desenvolvimento, à adaptação e à difusão de tecnologias nas áreas minerometalúrgica, de materiais e de meio ambiente.

Criado em 1978, o Centro está localizado no campus da Universidade Federal do Rio de Janeiro - UFRJ, na cidade Universitário, no Rio de Janeiro e ocupa 20.000m² de área construída, que inclui 25 laboratórios, 4 plantas-piloto, biblioteca especializada e outras facilidades.

Durante seus 48 anos de atividade, o CETEM desenvolveu mais de 800 projetos tecnológicos e prestou centenas de serviços para empresas atuantes nos setores minerometalúrgico, químico e de materiais.