

Toxicidade e bioacumulação por metais tóxicos na vegetação nativa atingida pelo desastre do rompimento das barragens da mineradora Vale S.A. em Brumadinho-MG

Jessyca Alyne Lozasso¹
Vanessa Nunes Alves

Resumo

O desastre do rompimento das barragens da mineradora Vale S.A. em Brumadinho-MG, ocorrido em 25 de Janeiro de 2019 foi um dos maiores desastres ambientais do Brasil. O rompimento atingiu uma grande área, causando diversos impactos socioambientais. Devido à alta magnitude dos impactos e a alta complexidade, o processo de reparação socioambiental é longo e ainda está em andamento. Entre as várias etapas relacionadas ao processo de reparação, a etapa primordial para embasar o processo de reparação dos impactos socioambientais causados pelo desastre é a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA). A AIA foi apresentada pela empresa Vale S.A., onde no total foram identificados 82 impactos ambientais, impactos negativos de diversas temáticas. No que se refere a vegetação nativa, foram identificados 9 impactos efetivos e 1 impacto potencial. O impacto *“Efeito de toxicidade e bioacumulação em indivíduos da flora silvestre”* causado pelo arraste e deposição de rejeitos; carreamento de sedimentos, rejeito, resíduos e/ou efluentes líquidos; chuvas extremas 2019/2020, 2021/2022 e inundações no rio Paraopeba, foi classificado como impacto potencial. Considerando os desafios e a importância da confirmação se esse impacto ocorreu ou não, o objetivo do presente trabalho é uma discussão sobre a possível bioacumulação dos componentes do rejeito nas plantas nativas, e quais estudos podem subsidiar tal verificação. Diversas alterações fisiológicas e morfológicas podem ser observadas em decorrência da exposição das plantas a metais tóxicos e outros elementos em altas concentrações, que são considerados tóxicos, como por exemplo, alteração na produtividade, na assimilação do carbono, na germinação de sementes, no estabelecimento/desenvolvimento e na sobrevivência dos indivíduos. Há diversos desafios nos estudos de bioacumulação e biomagnificação e alguns deles estão relacionados a alta plasticidade fenotípica das plantas, a diversidade de resposta conforme a espécie e poucos trabalhos envolvendo espécies nativas.

Palavras-chave: elementos potencialmente tóxicos, rejeito de mineração, reparação socioambiental.

Introdução

O rompimento das barragens BI, BIV e BIV-A da mina Córrego do Feijão, ocorrido em 25 de janeiro de 2019, mineradora Vale S.A., em Brumadinho (MG), foi um dos desastres socioambientais mais graves do século XXI (MILANEZ et al., 2019). O evento resultou na perda de 272 vidas, incluindo funcionários, terceirizados

¹ Instituto de Química da UFCAT: jesscalozasso@gmail.com

e moradores locais, tornando-se o maior acidente de trabalho da história do Brasil em termos de vítimas fatais (FIOCRUZ, 2019). O rompimento causou uma série de impactos ambientais, como a contaminação da bacia do Rio Paraopeba, a destruição de ecossistemas da Mata Atlântica, além de causar um colapso econômico de municípios que dependiam diretamente da atividade minerária ou do uso do solo e da água na região (IBAMA, 2019).

O rompimento das estruturas liberou aproximadamente 12 milhões de metros cúbicos de rejeitos de minério de ferro. Segundo o relatório técnico do IBAMA (2019), o impacto imediato causou a supressão de cerca de 133 hectares de vegetação nativa e áreas de preservação permanente (APP). A sedimentação dos rejeitos no leito do Rio Paraopeba comprometeu o abastecimento público e a biodiversidade aquática, cujos efeitos tóxicos persistirão por décadas no ecossistema local. Além dos impactos imediatos ao rompimento, chuvas extremas que ocorreram em 2019/2020 e 2021/2022 causaram inundações que afetaram uma extensa área às margens do Rio Paraopeba, atingindo assim sua área de APP (VALE, 2020).

Devido à alta magnitude dos impactos e a alta complexidade, o processo de reparação socioambiental é longo e ainda está em andamento. Em 04 de fevereiro de 2021 foi firmado o Acordo Judicial de Reparação Integral entre Estado de Minas Gerais, Ministério Público Federal (MPF), Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) e Defensoria Pública de Minas Gerais (DPMG), o qual prevê a reparação integral dos danos (MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS, 2020). O processo de mensuração econômica de perdas imateriais e de alguns impactos ambientais continua sendo um desafio.

O processo de recuperação da bacia do Rio Paraopeba é fundamentado em um arcabouço de estudos técnicos elaborados pela Vale S.A., sob a fiscalização rigorosa de órgãos ambientais do estado de Minas Gerais e auditorias independentes designadas pelo Ministério Público de Minas Gerais (MPMG) (VALE, 2021). Dentre esses instrumentos, destaca-se a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA), documento basilar para a mensuração e o direcionamento das ações de reparação socioambiental.

Na AIA apresentada pela empresa, foram catalogados 82 impactos ambientais de natureza negativa. No que se refere à vegetação nativa, o relatório identificou 10 impactos distintos, sendo 9 classificados como efetivos e 1 como potencial.

O impacto denominado "*Efeito de toxicidade e bioacumulação em indivíduos da flora silvestre*" foi classificado como impacto potencial. Tal impacto foi causado pelo arraste e a deposição direta de rejeitos sobre o solo; carreamento de sedimentos, resíduos e efluentes líquidos para áreas de preservação; a influência de eventos climáticos extremos, como as chuvas registradas nos períodos de 2019/2020 e 2021/2022, que provocaram inundações no Rio Paraopeba e a consequente remobilização de sedimentos para as margens (MPMG, 2022).

A classificação como "potencial" indica que, embora os danos visíveis, como a supressão da vegetação, sejam imediatos, a absorção de contaminantes pelos tecidos vegetais e sua subsequente entrada na cadeia trófica representam um risco de longo prazo que exige monitoramento contínuo (VALE, 2021). Adicionalmente, estudos mostram que a região afetada, já apresentava um alto grau de antropização e que os impactos acumulados de outras atividades econômicas em torno da área diretamente afetada, também podem influenciar no aporte de contaminantes no meio ambiente, sendo, difícil a confirmação da origem dos contaminantes (VIGLIO *et. al*, 2019)

Para que medidas de reparação efetivas sejam aplicadas, é de extrema importância estudos que possam subsidiar a confirmação do tipo de impacto, se efetivo ou não e se o aporte de contaminantes do rejeito seria o indutor principal.

Diversas alterações fisiológicas e morfológicas podem ser observadas em decorrência da exposição das plantas a metais tóxicos e outros elementos em altas concentrações, que são consideradas tóxicos, como, por exemplo, alteração na produtividade vegetal, na assimilação do carbono, na germinação de sementes, no estabelecimento/desenvolvimento e na sobrevivência dos indivíduos. Há diversos desafios nos estudos de bioacumulação e biomagnificação e alguns deles estão relacionados à alta plasticidade fenotípica das plantas, a diversidade de resposta

conforme a espécie, além disso há poucos trabalhos usando envolvendo espécies nativas.

O objetivo do presente trabalho é uma discussão sobre a possível bioacumulação dos componentes do rejeito nas plantas nativas na região diretamente afetada e área de influência direta do desastre do rompimento das barragens de rejeitos e sedimentos da Vale S.A em Brumadinho-MG, e discutir sobre técnicas de estudos que possam vir a subsidiar tal verificação.

Materias e Métodos

Este trabalho é uma revisão sistemática da literatura, a qual foi organizada de modo a buscar publicações de relevância científica, utilizando-se as bases de dados *Web Of Science*, Google Acadêmico, livros acadêmicos e sites de comunicação oficial. Nos sites oficiais foram encontrados arquivos disponibilizados pela própria empresa Vale S.A, no site Vale Reparação de Brumadinho e documentos oficiais, disponibilizados pelo governo no site do Governo do Estado de Minas Gerais, página dedicada às comunicações Pró-Brumadinho. A busca foi realizada apenas em documentos digitais, até o mês de janeiro de 2026. Os documentos consultados, relativos ao desastre, possuem datas de elaboração desde o período imediato ao desastre do rompimento das barragens, 25 de janeiro de 2019 até 20 de novembro de 2024. Não foi incluído nenhuma informação ou documento não oficial, ainda em caráter de elaboração e/ou discussão, por parte de nenhum dos envolvidos no processo de reparação socioambiental.

A análise de dados foi realizada de maneira qualitativa e quantitativa e os resultados apresentados abaixo.

Resultados e Discussão

Elementos Potencialmente Tóxicos (EPTs) no Contexto da Bacia do Rio Paraopeba

Para subsidiar o processo de reparação a empresa fez um diagnóstico pretérito ao rompimento, compilado no documento Reparação Brumadinho | Plano de Recuperação Socioambiental - Capítulo 1.

O rejeito de mineração que extravasou era proveniente do beneficiamento de minério de ferro da Mina Córrego do Feijão, no Complexo Paraopeba II. A barragem B1 foi a principal estrutura rompida e era destinada a armazenar esses rejeitos, que totalizavam 11.741.325,34 m³.

Embora a caracterização direta do rejeito B1 citada liste principalmente Fe e Mn como metais em alta concentração, estudos geoquímicos de sedimentos de corrente na bacia hidrográfica do Rio Paraopeba (que estabelecem o baseline da região) demonstraram a presença de diversos outros metais tóxicos ou potencialmente tóxicos, metais cujas concentrações em sedimentos na bacia se mostraram, em média, mais elevadas do que os valores de referência estabelecidos pela legislação CONAMA, como o cromo, cobre, arsênio, níquel e mercúrio, além de ferro e manganês. Outros EPTs detectados nos solos e sedimentos da bacia incluem chumbo (Pb), cádmio (Cd), cobalto (Co) e zinco (Zn) (VALE 2021).

A ocorrência desses metais no solo e sedimentos da região é amplamente atribuída às características geogênicas (naturais) do Quadrilátero Ferrífero, onde a mina está localizada, que é naturalmente rico em minerais como ferro e manganês. Contudo, a presença desses metais na água e sedimento da bacia também pode ser incrementada por atividades antrópicas, incluindo a mineração.

Metais tóxicos

Os elementos traço metálicos, comumente classificados como metais tóxicos, são componentes naturais e encontram-se presentes na água, solo e tecidos vegetais como micronutrientes de plantas. Do ponto de vista químico e toxicológico, esses elementos caracterizam-se por sua elevada densidade e pelo potencial deletério aos sistemas biológicos, manifestando toxicidade mesmo em concentrações muito baixas, os chamados elementos traço (DUFFUS, 2002). Entre os principais elementos pertencentes a esta classe, destacam-se o arsênio (As), cádmio (Cd), cobre (Cu), chumbo (Pb), mercúrio (Hg), cromo (Cr) e níquel (Ni), além de metais do grupo da platina e metalóides. A toxicidade dos elementos traços depende intrinsecamente da sua especiação química e biodisponibilidade no solo (ALLOWAY, 2013).

Esses elementos estão presentes na natureza, mas a transferência desses metais para as formas biodisponíveis ocorre mediante mecanismos naturais de pedogênese, como o intemperismo mineral e a lixiviação. No entanto, o aporte desses elementos no ecossistema tem sido drasticamente intensificado por atividades antropogênicas. De acordo com Baird e Cann (2016), processos industriais, a mineração, o uso indiscriminado de insumos agrícolas e o manejo inadequado de resíduos sólidos urbanos representam as principais vias de contaminação ambiental, alterando o equilíbrio biogeoquímico local.

Uma vez biodisponíveis no meio, esses metais possuem a capacidade de serem absorvidos por organismos autótrofos e incorporados aos tecidos animais, fenômeno denominado bioacumulação. Devido à sua estabilidade química e baixa taxa de excreção, esses contaminantes tendem a aumentar sua concentração progressivamente ao longo dos níveis tróficos. Este processo de transferência e concentração, conhecido como biomagnificação, resulta em riscos elevados para os predadores de topo, que acumulam cargas corporais significativamente superiores às encontradas no ambiente circundante (ALI; KHAN; ILAHI, 2019).

Embora alguns metais atuem como micronutrientes essenciais, elementos como o arsênio, cádmio, chumbo e mercúrio são classificados como xenobióticos de alta prioridade devido à sua extrema toxicidade sistêmica. A exposição a esses metais, mesmo em doses subletais, está associada a danos celulares severos e disfunções metabólicas (HODGSON, 2010). Portanto, o monitoramento rigoroso da biodisponibilidade e da especiação química desses elementos é imperativo para a gestão de riscos ambientais e a preservação da saúde pública.

O rompimento de barragens de mineração altera toda a estrutura do ecossistema, incluindo as concentrações de elementos químicos biodisponíveis, alterações expressivas na composição geoquímica do solo e dos sedimentos. Nessas áreas, a avaliação do impacto ambiental e a classificação do grau de contaminação devem ser fundamentadas rigorosamente nos parâmetros estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009. Esta norma define valores orientadores como os Valores de Referência de Qualidade (VRQ), de Prevenção (VP) e de Investigação (VI), tais parâmetros que são essenciais para determinar se as concentrações de elementos como arsênio, chumbo e cádmio excedem os

limites naturais e oferecem riscos à saúde humana ou ao equilíbrio ecológico (BRASIL, 2009). O gerenciamento ambiental de áreas atingidas por desastres minerários depende da aplicação dessas diretrizes para estabelecer estratégias de remediação e monitoramento da biodisponibilidade desses contaminantes a longo prazo.

Bioacumulação em Espécies Vegetais Nativas

Em cenários pós-desastre, a fitodisponibilidade dos metais é condicionada não apenas pela concentração total no rejeito, mas também por parâmetros físico-químicos como o pH e o potencial redox do solo impactado (KABATA-PENDIAS, 2011). Plantas nativas expostas a esses sedimentos podem manifestar estratégias de tolerância distintas, variando entre a exclusão radicular e a bioacumulação ativa, onde o influxo de íons metálicos ocorre via transportadores de membrana que mimetizam a absorção de nutrientes essenciais (MASTRETA *et al.*, 2009).

A eficiência desse processo é tecnicamente aferida pelo Fator de Bioacumulação (FBA) e pelo Fator de Translocação (FT). Em áreas atingidas por rompimentos de barragens, estudos indicam que diversas espécies nativas atuam como acumuladoras, concentrando elementos como Ferro (Fe), Manganês (Mn) e Arsênio (As) inicialmente no sistema radicular, com posterior translocação para os tecidos foliares (APPEL; MA, 2002). No interior da célula vegetal, o acúmulo desses elementos frequentemente desencadeia estresse oxidativo severo, resultando na inibição da síntese de clorofila e danos ultraestruturais aos cloroplastos (HODGSON, 2010).

Além do impacto fisiológico individual, a bioacumulação na flora nativa representa um risco ecológico. Como estas plantas constituem a base energética da fauna local, os metais tóxicos retidos em sua biomassa se tornam disponíveis para os consumidores primários, deflagrando o processo de transferência trófica (ALI; KHAN; ILAHI, 2019). Portanto, a avaliação da capacidade de bioacumulação da vegetação local é um pré-requisito fundamental para a seleção de espécies com potencial para programas de fitorremediação e para o monitoramento da resiliência

de áreas degradadas pela mineração, em conformidade com as diretrizes de qualidade ambiental.

Técnicas Analíticas e Metodológicas

A determinação da bioacumulação em plantas nativas após o rompimento de barragens exige uma transição de métodos analíticos convencionais para técnicas de maior sensibilidade e detectabilidade, dada a complexidade da matriz do rejeito e as baixas concentrações de certos metalóides. Enquanto a Espectrometria de Absorção Atômica em Chama (FAAS) apresenta-se como uma alternativa de baixo custo para o monitoramento de macronutrientes metálicos, sua aplicação é limitada na detecção de elementos ultra-traço como o Cádmio (Cd) e o Antimônio (Sb) em tecidos vegetais. Nesse contexto, a Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS) tem-se destacado na literatura recente como a técnica de eleição para estudos pós-desastre, devido à sua capacidade multielementar e limites de detecção significativamente inferiores, permitindo a quantificação precisa da partição do metal entre o apoplasto e o simplasto (ALI; KHAN; ILAHI, 2019).

Além da quantificação total, a discussão metodológica deve considerar a etapa de preparo das amostras; o uso de digestão assistida por microondas em sistema fechado minimiza a volatilização de elementos críticos como o Mercúrio (Hg) e garante a recuperação completa dos analitos em matrizes recalcitrantes (USEPA, 2007). Complementarmente, o uso de índices como o Fator de Translocação (FT) permite inferir a estratégia fisiológica da espécie nativa, se fitoestabilizadora ou fitoextratora, o que é fundamental para validar o potencial de resiliência do ecossistema frente à deposição de rejeitos. A integração dessas técnicas físico-químicas com análises de Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV-EDS) enriquece a discussão ao permitir a visualização da deposição de cristais metálicos nos tecidos, oferecendo uma compreensão holística dos mecanismos de fitotoxicidade e acumulação em áreas degradadas (KABATA-PENDIAS, 2011).

A seleção da técnica analítica em estudos de impacto por rompimento de barragens é um fator determinante para a confiabilidade dos fatores de

bioacumulação calculados. Conforme observado na comparação de detectabilidade, a Espectrometria de Massa com Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS) supera as limitações da Absorção Atômica (FAAS) ao oferecer limites de detecção na ordem de nanogramas por quilo (ng/kg). Esta sensibilidade é crucial para o monitoramento de plantas nativas em áreas pós-desastre, onde elementos como o Arsênio (As) e o Mercúrio (Hg), frequentemente mobilizados pelo revolvimento do sedimento, podem exercer efeitos fitotóxicos mesmo em concentrações que seriam subestimadas ou não detectadas por técnicas convencionais (ALI; KHAN; ILAHI, 2019).

A superioridade do ICP-MS e do ICP-OES reside também na capacidade de leitura multielementar simultânea, o que permite correlacionar a absorção de contaminantes com a homeostase de nutrientes essenciais. Em solos contaminados por rejeitos de mineração, a elevada força iônica e a presença de interferentes químicos exigem uma instrumentação capaz de garantir a robustez dos resultados analíticos, validando as estratégias de fitorremediação propostas (USEPA, 2007). Assim, a adoção dessas tecnologias de alta performance não apenas refina os dados de bioacumulação, mas fundamenta decisões de manejo ambiental baseadas em evidências de alta precisão.

Eficiência e Relevância dos Estudos Sete Anos Pós-Desastre (2019-2026)

Passados sete anos do rompimento da barragem ocorrido em janeiro de 2019, a eficiência dos estudos de bioacumulação em 2026 assume um papel fundamental na compreensão da resiliência ecossistêmica a longo prazo. Se nos primeiros anos o foco científico recaiu sobre a toxicidade aguda da lama e o soterramento da biota, o cenário atual exige uma análise da biodisponibilidade persistente. O tempo decorrido pode ter alterado a especiação química dos metais, tornando elementos inicialmente inertes em formas fitodisponíveis devido às variações nos ciclos de oxidação-redução sazonais ocorridos ao longo desta última septena (KABATA-PENDIAS, 2011).

A relevância das técnicas de alta precisão, como o ICP-MS, torna-se ainda mais crítica em 2026. Após sete anos de lixiviação e transporte de sedimentos, as concentrações de metais tóxicos nos tecidos de plantas nativas podem ter atingido

um estado de equilíbrio dinâmico ou bioacumulação crônica. Estudos atuais são eficientes para identificar espécies "sentinelas", aquelas que sobreviveram ao impacto inicial e que, agora, atuam como indicadores da qualidade ambiental, revelando se a biomagnificação continua a progredir na cadeia trófica local (ALI; KHAN; ILAHI, 2019).

Além disso, realizar análises, hoje seria capaz de avaliar o sucesso de estratégias de sucessão ecológica natural *versus* intervenções de fitorremediação. Verificar a bioacumulação em plantas nativas neste estágio é o método mais eficaz para validar se os Valores de Investigação (VI), estabelecidos pela Resolução CONAMA nº 420/2009, ainda são excedidos, indicando se a área permanece como um risco para a fauna silvestre e populações humanas circundantes. Portanto, a continuidade do monitoramento após sete anos não é apenas uma medida de controle, mas uma ferramenta diagnóstica essencial para definir a manutenção das ações de remediação ambiental.

A compreensão da toxicidade em áreas impactadas deve considerar o tempo decorrido que altera significativamente o comportamento dos metais entre o evento inicial, em 2019, e o cenário atual, em 2026. No período imediatamente posterior ao rompimento, os metais tóxicos encontram-se frequentemente adsorvidos a frações minerais ou ocluídos em matrizes de óxidos de ferro, apresentando uma biodisponibilidade inicial limitada. Contudo, ao longo de sete anos, a exposição intempérica promove a decomposição da matéria orgânica remanescente e oscilações no potencial hidrogeniônico (pH) e redox do solo. Essas transformações físico-químicas podem induzir a remobilização de elementos antes estáveis, convertendo formas geoquímicas inertes em espécies iônicas altamente fitodisponíveis (ALEXANDER, 2000). Assim, em 2026 a área afetada ainda apresenta um risco ecotoxicológico uma vez que a degradação da matriz mineral facilita a liberação gradual de contaminantes para a solução do solo e, consequentemente, para o sistema radicular das plantas nativas.

Conclusão

A discussão mostra a importância de continuar os estudos, mesmo transcorrido sete anos do evento causador do impacto. O passivo químico

resultante do rompimento da barragem em 2019 possui a capacidade de permanecer como um fator de estresse ecológico persistente. A eficiência das técnicas de alta sensibilidade, como o ICP-MS, pode ser determinante para revelar se há bioacumulação e biomagnificação.

O monitoramento baseado na Resolução CONAMA nº 420/2009 deve ser mantido e, preferencialmente, expandido para análises de especiação química, a fim de prever futuras mobilizações de metais decorrentes de mudanças climáticas ou alterações no uso do solo. Recomenda-se a implementação de programas de fitorremediação utilizando espécies nativas. Esses estudos se justificam uma vez serviriam de base para a revisão dos planos de recuperação de áreas degradadas (PRAD), garantindo que a restauração ambiental alcance a verdadeira segurança ecotoxicológica para a fauna e as comunidades humanas da região.

Agradecimentos

Agradeço ao corpo docente da Universidade Federal de Catalão por disponibilizar ensino gratuito de qualidade, à distância, fator fundamental para o desenvolvimento da educação no país. A minha família pelo apoio de cada dia e em especial ao meu esposo. Agradeço a professora Vanessa pela orientação do desenvolvimento deste trabalho.

Referências Bibliográficas

ALEXANDER, M. Aging, bioavailability, and overestimation of risk from environmental pollutants. **Environmental Science & Technology**, [S. l.], v. 34, n. 20, p. 4259-4265, 2000.

ALI, H.; KHAN, E.; ILAHI, I. Environmental chemistry and ecotoxicology of hazardous heavy metals: environmental persistence, toxicity, and bioaccumulation. *Journal of Chemistry*, [S. l.], v. 2019, p. 1-14, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1155/2019/6730305>. Acesso em: 5 jan. 2026.

ALLOWAY, B. J. **Heavy metals in soils**: trace metals and metalloids in soils and their bioavailability. 3. ed. Dordrecht: Springer, 2013.

APPEL, C.; MA, L. Concentration, stoichiometry and solubility of P, Cu, Ni, Zn, Cd and Pb in Bauxite residues. **Environmental Pollution**, [S. l.], v. 114, n. 3, p. 427-435, 2002.

BAIRD, C.; CANN, M. Química ambiental. 5. ed. Porto Alegre: Bookman, 2016.

BRASIL. Conselho Nacional do Meio Ambiente. **Resolução 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, DF, n. 249, p. 81-84, 30 dez. 2009.

DUFFUS, J. H. "Heavy metals" - a meaningless term? Pure and Applied Chemistry, [S. l.], v. 74, n. 5, p. 793-807, 2002.

FIOCRUZ. Centro de Estudos e Pesquisas em Emergências e Desastres em Saúde. *Relatório sobre o desastre de Brumadinho*. Rio de Janeiro: Fiocruz, 2019.

HODGSON, E. **A textbook of modern toxicology**. 4. ed. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010.

IBAMA. *Relatório de Inspeção: Barragem I, Mina Córrego do Feijão*. Brasília: Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis, 2019.

KABATA-PENDIAS, A. **Trace elements in soils and plants**. 4. ed. Boca Raton: CRC Press, 2011.

MILANEZ, B. et al. *Minas não há mais: Avaliação dos aspectos institucionais e técnicos do desastre da Vale em Brumadinho*. Juiz de Fora: PoEMAS, 2019.

MINISTÉRIO PÚBLICO DE MINAS GERAIS. *Ação Civil Pública: Responsabilidade Civil da Vale S.A. pelo rompimento em Brumadinho*. Belo Horizonte: MPMG, 2020.

MINISTÉRIO PÚBLICO DO ESTADO DE MINAS GERAIS. *Relatório de auditoria técnica sobre a Avaliação de Impactos Ambientais (AIA) da Vale S.A. em Brumadinho*. Belo Horizonte: MPMG, 2022.

MASTRETA, A. *et al.* Bioaccumulation of heavy metals and its effects on plant growth. **Journal of Environmental Management**, [S. l.], v. 90, n. 2, p. 372-380, 2009.

VALE S.A. *Relatório de Sustentabilidade e Gestão de Riscos*. Rio de Janeiro: Vale, 2019.

VALE S.A. *Avaliação de Impactos Ambientais (AIA): Rompimento da Barragem I da Mina Córrego do Feijão*. Rio de Janeiro: Vale, 2021. Documento técnico para o processo de reparação integral.

VIGLIO, E. P. *et al.* **Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba: Relatório 02 - Monitoramento Geoquímico**. Belo Horizonte: Cprm - Serviço Geológico do Brasil, 2019a. 24 p.

USEPA. **Method 3051A**: Microwave assisted acid digestion of sediments, sludges, soils, and oils. Washington, DC: United States Environmental Protection Agency, 2007.