

**AVALIAÇÃO ECOTOXICOLÓGICA DE MATERIAL SÓLIDO DISPOSTO
SOBRE OS SOLOS E SISTEMAS HÍDRICOS APÓS ROMPIMENTO DA
BARRAGEM I, DA VALE S.A., EM BRUMADINHO (MG)**

**ECOTOXICOLOGICAL ASSESSMENT OF SOLID MATERIAL DISPOSED
ON SOILS AND WATER SYSTEMS AFTER VALE'S MINING DAM
COLLAPSE IN BRUMADINHO (MG)**

Rodrigo Sardinha Lourenço

Aluno de Graduação da Geografia do 6º período, Universidade Federal do Rio de Janeiro (UFRJ)

Período PIBIC/CETEM: agosto de 2019 a julho de 2020,
rodrigoslou@gmail.com

Zuleica Carmen Castilhos

Orientadora, Farmacêutica, D.Sc. Geoquímica Ambiental.
zcastilhos@cetem.gov.br

Ricardo Gonçalves Cesar

Orientador, Geógrafo, D.Sc. Geoquímica Ambiental.
ricardogc.geo@gmail.com

RESUMO

O presente trabalho trata da avaliação ecotoxicológica do material sólido disposto sobre os solos e sistemas hídricos após o colapso da Barragem I em Brumadinho (MG, Brasil). Amostras (n = 16) de material foram coletadas em diferentes áreas: (i) Zona Quente (ZQ), próxima à barragem (n = 8); (ii) Parque Cachoeiras (PC), à jusante da ZQ; e (iii) Alberto Flores (AF) (n = 3), à jusante do PC. Adicionalmente, uma amostra de solo natural foi colhida em um fragmento de floresta não impactado e utilizado como referência (*background*). Bioensaios com *Eisenia andrei* e *Folsomia candida* foram realizados para avaliar os danos à fauna do solo, enquanto testes com *Daphnia similis* e *Chlorella vulgaris* foram executados com lixiviados para avaliar danos à biota aquática. Os resultados mostraram que a presença dos rejeitos incrementou a densidade das partículas, as concentrações de Fe, induziu à redução do teor de matéria orgânica e da capacidade de retenção de água das amostras e, em parte das amostras, incrementou os teores de metais pesados (Hg, Pb, Zn e Cu). Toxicidade aguda (terrestre e aquática) importante foi observada em poucas amostras, mas a toxicidade crônica foi generalizada. Vale ressaltar o comprometimento da reprodução de algas, que são a base da cadeia trófica aquática. Neste contexto o rompimento deste elo pode se propagar afetando a saúde e resiliência de todo o ecossistema aquático.

Palavras-chave: bioensaios, metais pesados, barragem de mineração.

ABSTRACT

This work proposes an ecological assessment related to the solid material disposed on soils and water systems from the collapse of a mining dam (Barragem I) in Brumadinho (MG, Brazil). Samples (n = 16) were collected in collected different areas: (i) "Hot Zone (HZ)", close to the dam (n=9); (ii) Cachoeiras Park (CP), downstream of the HZ (n=3); and (iii) Alberto Flores (AF) (n=3), downstream of the CP. A reference soil sample (*background*) was obtained in a not impacted rainforest fragment. Bioassays with *Eisenia andrei* and *Folsomia candida* were performed to evaluate damages on soil fauna, while the tests with *Daphnia similis* and *Chlorella vulgaris* were applied to leachates of the solid samples. The results show that the release of the solid material increased the particles density, Fe concentrations, induced the reduction of the organic matter contents and water holding capacity of the samples and, in some

samples, increased heavy metal contents (Hg, Pb, Zn and Cu). Significant acute toxicity (terrestrial and aquatic) was observed in few samples, but chronic toxicity was widespread. It is highlighted the compromising of algae reproduction, which are the basis of the aquatic food web. In this context, the rupture of such link can spread, affecting the health and resilience of the entire aquatic ecosystem.

Keywords: bioassays, heavy metals, mining dam.

1. INTRODUÇÃO

Em janeiro de 2019, a Barragem I de mineração de ferro, da VALE S.A., se rompeu em Brumadinho (MG), causando a morte de 272 pessoas e a destruição de casas, ruas, hortas, reflorestamento, áreas verdes nativas, etc. O rejeito presente na barragem, acrescido de tantos outros que foram mobilizados, atingiu sistemas terrestres e aquáticos, incluindo o Córrego Ferro-Carvão (soterrado pela lama) e as águas do rio Paraopeba. Os impactos ambientais, agudos e crônicos, ainda carecem de análise. A caracterização física, química e ecotoxicológica deste material sólido é crucial (i) à identificação de receptores ecológicos/compartimentos ambientais em maior risco, e (ii) à definição das alternativas mais apropriadas de remediação.

Bioensaios com minhocas (*Eisenia andrei*), colêmbolos (*Folsomia candida*), microcrustáceos aquáticos (*Daphnia similis*) e algas (*Chrorella vulgaris*) são amplamente utilizados na avaliação da toxicidade de resíduos, incluindo os de mineração (Cesar et al. 2017). O emprego destes organismos se justifica pela sua relevância ecológica, simples cultivo em laboratório e sensibilidade à presença de xenobióticos no ambiente. Os bioensaios complementam as análises física e química, consolidando o entendimento do risco ecológico e oferecendo suporte à tomada de decisão em medidas de controle da poluição ambiental e de preservação da biodiversidade.

2. OBJETIVOS

O presente trabalho consiste na avaliação da ecotoxicidade terrestre e aquática do material sólido disposto sobre os solos e sistemas aquáticos atingidos pelo rompimento da Barragem I, de rejeitos de minério de ferro, utilizando bioensaios agudos e crônicos.

3. METODOLOGIA

A amostragem do material sólido foi realizada após 7 dias da ruptura da barragem, em janeiro de 2019, em 15 pontos (profundidade de até 20cm) de três distintas localidades impactadas pelo rejeito: (i) Zona Quente (ZQ) – próximo à barragem rompida (n=9); (ii) Parque das Cachoeiras (PC) – localizada à jusante da ZQ (n=3); e (iii) Alberto Flores (AF) – porção mais distal da Barragem I (n=3). O critério de seleção dos pontos de coleta foi baseado na coloração do material, buscando contemplar composições químicas e mineralógicas distintas. Uma (1) amostra de solo foi coletada de uma área florestal não impactada e utilizada como referência do *background* pedogeoquímico local. Em laboratório, os materiais foram secos à temperatura ambiente, desagregados com rolo de madeira e, posteriormente, peneirados a 10 *mesh* (2,0mm).

A determinação da granulometria, pH (em água), capacidade de retenção de água (CRA) e densidade das partículas foi realizada conforme EMBRAPA (1997). A quantificação do carbono orgânico total (COT) e do nitrogênio total (N) foi realizada com Analisador Elementar Flash 2000. Para a análise do COT, as amostras foram previamente descarboxiladas com HCl.

A determinação dos teores totais de Zn, Cu, Pb e Fe nos sedimentos foi efetuada através da solubilização de 1g de amostra em uma solução composta por ácido fluorídrico (HF), ácido nítrico (HNO₃) e ácido perclórico (HClO₄) (2:1:1), e leitura em ICP-OES. O teor de Hg total foi determinado por Espectrometria de Absorção Atômica com correção Zeeman (LUMEX). As concentrações obtidas foram comparadas com os valores orientadores estabelecidos pelo CONAMA 454/2012 e CONAMA 420/2009, para qualidade de sedimentos aquáticos e de solos, respectivamente, de forma complementar à avaliação da contaminação e potencial toxicidade.

O bioensaio agudo com anelídeo terrestre – *E. andrei* (14 dias) – foi realizado de acordo com ISO (2012). Ao fim do ensaio, verificou-se a sobrevivência e a variação de biomassa dos indivíduos sobreviventes. O bioensaio de reprodução (28 dias) com artrópodes edáficos (*F. candida*) foi conduzido segundo ISO (2004). Ao final do experimento, contabilizou-se o número de organismos adultos e juvenis por réplica. Os organismos aquáticos (*D. similis* e *C. vulgaris*) foram expostos a elutriados (lixiviados) gerados conforme Baun et al. (2002). O bioensaio agudo (48 horas) com *D. similis* seguiu as recomendações de ABNT (2004). Após 48h de exposição, o número de indivíduos móveis foi contabilizado. O ensaio crônico (96 horas) com *C. vulgaris* fundamentou-se nas recomendações de ABNT (2005). Ao término do ensaio, contou-se o número de células a fim de identificar anomalias na reprodução dos organismos. Em todos os referidos bioensaios foi utilizado o teste estatístico de Kruskal-Wallis na avaliação de diferenças significativas entre a amostra-referência e as amostras-teste.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A caracterização das amostras do material sólido se encontra na Tabela 1. Os resultados apontam valores altos de densidade das partículas, provavelmente devido ao enriquecimento por Fe após a deposição dos rejeitos sobre os solos e sistemas aquáticos. O aumento da densidade é inversamente correlacionado com os teores de N e COT ($p < 0,05$), indicando que o enriquecimento por Fe, provavelmente por partículas do rejeito, causa redução do teor de matéria orgânica (MO) nas amostras. A redução do teor de MO, como esperado, está diretamente correlacionada à diminuição da CRA ($p < 0,05$). Neste sentido, vale destacar os altos valores de densidade das amostras ZQ-10, 13 e 15 e AF-01 e 02.

Os valores de pH encontrados não apresentaram diferenças importantes em relação à referência. A determinação granulométrica revelou textura predominantemente arenosa. Este fato pode estar atrelado ao método de análise empregado (pipetagem), o qual poderia induzir a precipitação de frações de areia de elevada densidade, falseando os resultados. Por esta razão, atualmente estão sendo realizadas também análises granulométricas a laser.

Em relação ao CONAMA 420, constatou-se a seguinte ordem crescente de número de não conformidades: Cu (5) > Pb (1) > Hg (0) = Zn (0). Em relação ao Nível 1 do CONAMA 454, observou-se a seguinte ordem de não conformidade: Cu (6) > Pb (3) = Hg (3) > Zn (0). Quando se consideram as concentrações excedentes às da amostra referência, constatou-se que o Fe foi o metal que mais incrementou nos materiais amostrados, onde 7 amostras excedem 40 vezes o referencial. O Hg incrementa de 2 a 6 vezes em dez amostras; o Zn de 1,5 a 3 vezes em sete amostras; em Cu o incremento é maior do que 10 vezes em seis amostras; o Pb incrementa em 3 amostras e decresce (em até uma ordem de grandeza) em 12 amostras. Tais resultados indicam que, em geral, a deposição dos rejeitos incrementou os teores de metais pesados nas amostras, com consequente risco potencial a receptores ecológicos do solo (Valor de Prevenção) e à biota aquática (Nível 1).

A Tabela 2 apresenta os resultados referentes à avaliação da toxicidade terrestre e aquática. Para *E. andrei*, os níveis mais altos de toxicidade (redução da sobrevivência) foram detectados para as amostras ZQ-10, 13 e 15. Das 16 amostras analisadas, sete (7) causaram redução significativa de biomassa. Isto pode estar relacionado à redução do teor de MO (diminuição da oferta de comida) e redução da CRA, haja vista que *E. andrei* é uma minhoca epigeica e tem preferência por ambientes de alta umidade. Vale destacar, para a amostra ZQ-10, a ocorrência das mais elevadas concentrações de metais entre todas as amostras, incluindo valores que excedem os limites recomendados pela legislação brasileira. Em contradição ao ensaio com *E. andrei*, *F. candida* exibiu níveis de mortalidade em maior número de amostras (8 das 16 amostras) e redução significativa da reprodução em todas as amostras, demonstrando elevado nível de toxicidade crônica terrestre do material sólido testado.

Para *D. similis*, cinco (5) amostras exibiram redução significativa da mobilidade (um *proxy* da sobrevivência). Uma hipótese é a de que as maiores partículas foram excluídas por filtração e as de elevada densidade possuem dificuldade de permanecerem em suspensão, reduzindo o nível

de toxicidade dos lixiviados. Por outro lado, o bioensaio crônico com *C. vulgaris* indicou alto nível de toxicidade, de forma semelhante aos dados encontrados para toxicidade terrestre com *F. candida*. Vale destacar que o nível de reprodução de *C. vulgaris* detectado para a amostra-referência (128,9%) esteve acima do controle do ensaio, provavelmente devido ao elevado teor de MO (C e N) determinado para esta amostra. Vale ressaltar que as algas são os produtores e a base do ecossistema aquático e, neste contexto, o rompimento do elo inicial da cadeia trófica induz impactos sistêmicos que se propagam, podendo comprometer a saúde e resiliência de todo o ecossistema aquático.

Tabela 1: Caracterização física, química e concentrações de metais nas amostras coletadas. REF. = amostra de referência. ZQ = Zona Quente; PC = Parque das Cachoeiras; AF = Alberto Flores; CRA = capacidade de retenção de água; COT = carbono orgânico total. * = acima do valor de prevenção (CONAMA 420/2009). # = acima do Nível 1 (CONAMA 454/2012).

Amostras	Areia (%)	Finos (%)	Densidade (g/cm ³)	CRA (%)	pH	COT (%)	N (%)	Fe (%)	Hg (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)
REF.	62	38	2,46	60,40	4,5	0,94	5,05	1,0	0,030	34,5	31,8	5,9
ZQ-03	39	61	2,86	61,90	4,1	1,29	0,116	19,5	0,084	28,0	49,1	32,3
ZQ-04	57	43	2,70	51,39	4,5	0,65	0,062	9,1	0,034	14,5	28,5	11,8
ZQ-05	57	43	2,79	49,56	4,2	0,25	0,051	12,4	0,042	12,0	30,7	16,0
ZQ-06	25	75	2,43	71,04	4,3	0,42	0,128	2,6	0,035	35,5#	38,5	11,5
ZQ-07	55	45	2,60	47,33	4,4	0,07	0,010	2,3	0,017	41,5#	29,6	10,6
ZQ-10	14	86	4,31	28,65	4,2	0,08	0,010	49,4	0,180#	79,9*#	106,0	136,0*#
ZQ-12	32	68	2,74	53,79	5,3	0,15	0,020	12,4	0,067	10,5	24,5	15,6
ZQ-13	77	23	4,86	18,49	4,4	0,02	0,010	31,0	0,049	4,7	23,8	23,0
ZQ-15	69	31	4,34	20,71	4,2	0,05	0,010	40,6	0,052	2,5	35,9	26,0
PC-02	24	76	3,68	35,74	4,5	0,12	0,018	40,3	0,143	16,0	73,9	81,7*#
PC-05	29	71	3,60	41,28	4,5	0,23	0,017	40,5	0,144	18,5	78,6	91,1*#
PC-07	22	78	3,60	40,08	5,4	0,09	0,010	42,8	0,177#	22,5	95,1	117,0*#
AF-01	73	27	4,55	21,16	5,3	0,03	0,010	49,9	0,081	2,5	58,9	56,3#
AF-02	59	41	4,86	26,49	5,8	0,10	0,010	46,9	0,169#	19,0	83,0	91,2*#
AF-03	49	51	2,52	51,02	4,6	0,09	0,010	1,0	0,004	34,0	26,7	5,4

Tabela 2: Endpoints monitorados em bioensaios com organismos terrestres e aquáticos. SB = sobrevivência de adultos. B = biomassa. NJ = n° de juvenis. NM = n° de organismos móveis. RP = reprodução * = significativamente diferente da referência (Kruskall-Wallis p<0,05).

Amostras	<i>E. andrei</i>		<i>F.candida</i>		<i>D. similis</i>	<i>C. vulgaris</i>
	SB (%)	B (%)	SB (%)	NJ	NM	RP (%)
REF.	100,00	84,21	82,00	513,6	16	128,9
ZQ-03	93,30	81,20	70,00	83,8*	20	14,4*
ZQ-04	100,00	77,55*	72,00	93,6*	18	6,4*
ZQ-05	100,00	76,14*	52,00*	27,4*	18	11,4*
ZQ-06	100,00	84,37	74,00	61,6*	11*	4,7*
ZQ-07	100,00	77,55*	26,00*	6,6*	1*	6,5*
ZQ-10	40,00*	76,92*	44,00*	28,2*	17	8,6*
ZQ-12	93,30	66,59*	54,00*	23,6*	15*	24,5*
ZQ-13	0,00*	0,00	72,00	67,0*	20	54,3*
ZQ-15	3,67*	0,00	66,00	78,6*	12*	72,3*
PC-02	100,00	76,41*	58,00*	49,2*	18	3,6*
PC-05	90,00	81,28	66,00*	64,3*	19	2,8*
PC-07	100,00	80,52	68,00	123,0*	19	8,0*
AF-01	100,00	78,40*	42,00*	49,6*	20	75,1*
AF-02	93,30	77,46	50,00*	66,2*	19	4,2*
AF-03	100,00	75,80	76,00	62,2*	13*	69,9*

5. CONCLUSÕES

Em termos gerais, o material sólido coletado induziu ao aumento da densidade das partículas, das concentrações de Fe, induziu à redução do teor de MO e da CRA e, em algumas amostras, incrementou os teores de metais tóxicos (Zn, Cu, Pb e Hg - com valores excedendo os limites recomendados pela legislação). Essas alterações parecem estar associadas à ocorrência significativa de toxicidade crônica (alteração nas taxas de reprodução) detectados para todas as amostras testadas com algas – organismos base da cadeia trófica aquática e, neste contexto pode afetar a saúde e resiliência de todo o ecossistema aquático – e colêmbolos, importantes organismos do ecossistema terrestre. Para *E. andrei*, altos níveis de toxicidade aguda estiveram associados a amostras de elevada densidade, bem como à redução da CRA e da MO. Para *D. similis*, a toxicidade parece estar inversamente relacionada à densidade das partículas, tendo em vista que as partículas de elevada densidade têm dificuldades de permanecer em suspensão. Em trabalhos futuros, serão realizados testes de germinação com alface para verificar a toxicidade deste material à flora terrestre, bem como a determinação dos teores de metais potencialmente biodisponíveis – visando correlacionar estes teores com os níveis de toxicidade observados.

6. AGRADECIMENTOS

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelas bolsas concedidas a Rodrigo Lourenço (IC), Danielle Siqueira (Mestrado) e Matheus Nascimento (IC). Os autores também agradecem à Mariana Vezzoni (UFF) pelas análises de COT e N, à Jessica Ramos (LEMA) pelas análises de Hg e aos colegas da Secretaria Municipal de Saúde de Brumadinho pelo suporte na coleta dos materiais, da Geoquímica (UFF) pela ajuda nos preparos dos elutriatos e do Laboratório de Biorremediação e Fitotecnologias – LABIFI (UERJ) pelo auxílio nos bioensaios com organismos aquáticos.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) - NBR 12713. **Ecotoxicologia Aquática - Toxicidade aguda - Método de ensaio com *Daphnia spp.* (Crustácea, Cladocera)**. Rio de Janeiro: ABNT 2004.

ABNT (Associação Brasileira de Normas Técnicas) - NBR 13373. **Ecotoxicologia Aquática - Toxicidade crônica - Método de ensaio com algas (Chlorophyceae)**. Rio de Janeiro: ABNT 2005.

BAUN, A.; JUSTESEN, K.B.; NYHOLM, N. (2002) Algal tests with soil suspensions and elutriates a comparative evaluation for PAH-contaminated soils. **Chemosphere**, v. 46, n. 2, p. 251-258.

CESAR, R.; ROCHA, B. C. R. C.; CASTILHOS, Z. C.; CAMPOS, T. M. P.; SCHNEIDER, C. 2017. Bioensaios com oligoquetas edáficos para avaliação da eficácia do tratamento de resíduos de mineração de carvão em cenário de disposição terrestre. **Revista Geociências (UNESP)**, 36: 793-800

CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). 2009. **Resolução 420**. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=506>>. Acesso em junho/2020

CONAMA (Conselho Nacional de Meio Ambiente). 2012. **Resolução 454**. Disponível em: <<http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620>>. Acesso em junho/2020

EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária). 1997. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. In: **Manual de Métodos de Análises de Solo**. Rio de Janeiro, RJ, p. 212.

ISO (International Organization for Standardization) 1999. **Soil Quality – Inhibition of reproduction of Collembola (*Folsomia candida*) by soil pollutants**. ISO 11267. Geneva, Switzerland.

ISO (International Organization for Standardization) 2012. **Soil quality — Effects of pollutants on earthworms (*Eisenia fetida*) — Part 1: Determination of acute toxicity to *Eisenia fetida/andrei***. ISO 11268–2. Geneva, Switzerland.