

Comportamento de fuga da fauna edáfica em solos afetados pelo rompimento da Barragem de Fundão-MG, Brasil

Andressa Cristhy Buch ^{1*}, Camila Rodrigues e Silva ², Eduardo Duarte Marques ³, Emmanoel Vieira da Silva-Filho ⁴, Lúcio Fábio Lourençato ⁵

¹ Pesquisadora Pós-doutora do Programa de Pós-Graduação de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense (202.453/2017-PDR10/FAPERJ), Niterói-RJ;

² Doutoranda do Programa de Pós-Graduação de Química da Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ;

³ Pesquisador da Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, Belo Horizonte-MG;

⁴ Docente do Programa de Pós-Graduação de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ;

⁵ Pesquisador Pós-doutor do Programa de Pós-Graduação de Geoquímica Ambiental da Universidade Federal Fluminense, Niterói-RJ;

*E-mail: andressabuch@hotmail.com

Resumo

Os impactos ambientais e socio-econômicos advindos por negligências operacional e de gestão de barragens de mineração têm sido recorrentes no Brasil. Em menos de cinco anos, três grandes barragens de minério se romperam no estado de Minas Gerais-MG (Itabirito-2014, Mariana-2015 e Brumadinho-2019) acarretando mortes humanas e animais, além de incontáveis danos ao meio ambiente. O rompimento da barragem de Fundão no município de Mariana-MG, ocorrido em novembro de 2015, foi um dos maiores acidentes ambientais ocorridos no Brasil e no mundo envolvendo barragens de rejeito. Desde então, ainda são escassas as informações sobre a ecotoxicidade da lama minerária deposta nos ecossistemas terrestres. O presente estudo avaliou um perímetro amostral de solos de aproximadamente 670 km ao longo da Bacia do Rio Doce, contemplando 18 áreas afetadas pelo rejeito de Fundão, iniciando em áreas que ocorreram a ruptura da barragem até a foz do rio Doce-Espírito Santo. Em avaliações preliminares, testes ecotoxicológicos comportamentais foram empregados para avaliar a qualidade dos solos para duas ordens taxonômicas da fauna edáfica (Collembola e Haplotaxida). Nossos resultados indicaram para os dois períodos de monitoramento (2015 e 2018) uma desfuncionalidade de habitat em todos os solos avaliados para a minhoca *Ponstocolex corethrurus* (evitação > 80%); e para o colêmbolo *Proisotoma minuta* (evitação > 60%) em áreas próximas àquelas que ocorreram o rompimento da barragem de Fundão e de Córrego Novo, Periquito, Governador Valadares e Tumiritinga). As respostas de fuga notadas neste estudo podem indicar o risco ecológico existente localmente nas regiões afetadas pela lama minerária, sugerindo a dispersão de espécies de locais contaminados. E isto pode ocasionar a longo prazo, comprometimentos na sua biodiversidade, abundância e reprodução, além do desempenho de sua funcionalidade dentro do ecossistema terrestre.

Palavras-chave: Colêmbolos; Minhocas; Poluição de Solos; Rejeitos minerários;

1. INTRODUÇÃO

O rompimento da barragem de Fundão no município de Mariana (estado de Minas Gerais) ocorrido em 05 de novembro de 2015, é considerado a pior tragédia da mineração brasileira e uma das maiores do mundo envolvendo barragens de minério. Estima-se que aproximadamente 60 milhões de metros cúbicos de rejeitos minerários tenham sido liberados da barragem (IBAMA, 2016). O impacto do desastre não se restringiu às áreas imediatas à jusante do barramento. A dissipação da lama de rejeitos atingiu mais de dois mil hectares de área terrestre, compreendendo uma vasta extensão de malhas urbanas, pastagem, agricultura e vegetação nativa (para qual sugere-se uma devastação superior a 13% nas áreas de Mata Atlântica) (EMBRAPA, 2015; OMACHI et al., 2018). Ao longo do leito do Rio Doce estipula-se um impacto ou alcance da lama superior a 650 km de extensão, chegando até o litoral capixaba (SEDRU-MG, 2016).

A composição química dos rejeitos de Fundão, compreende um alto teor de Fe (>50%), SiO₂ (>10%), Al (>10%) e uma alta mistura de metais pesados como As, Cr, Cd, Hg, Ni e Pb (Buch et al., 2020). A magnitude da evasão e do tipo de rejeito decorrente da barragem de Fundão, pode ter alterado consideravelmente o funcionamento da natureza, levando a um contínuo desequilíbrio entre os ecossistemas, acarretando condições irreversíveis como assoreamento de rios, desertificação, infertilidades e poluição de solos e corpos d'água, bem como perdas de espécies vegetais ou animais.

Atualmente, escassas informações têm sido conhecidas sobre o impacto e implicações de rejeitos minerários aos solos, menosprezando ou dando pouco valor a toxicidade de tais rejeito à fauna terrestre (IBAMA, 2016, 2017; BUCH et al., 2020). A base da funcionalidade e da cadeia alimentar de um ecossistema terrestre é o solo, e este é um dos ambientes com a maior diversidade do planeta (GILLER, 1996). Nele vivem centenas de milhares de espécies de invertebrados que possuem importantes funções nos ecossistemas terrestres e que providenciam aos seres humanos uma série de serviços ambientais cujo valor foi estimado em centenas de bilhões de dólares anuais (VAN DER PUTTEN et al., 2004). A fauna edáfica é representada pela comunidade de invertebrados que vive permanentemente ou que passa uma ou mais fases de desenvolvimento no solo ou na serapilheira. No caso de Mariana-MG, a evasão da lama minerária que atingiu diferentes tipos de uso dos solos pode ter desequilibrado ou extinto grupos/espécies e funções que determinados organismos edáficos prestavam. À este espectro, avaliações biológicas são particularmente importantes porque o risco ecológico não é previsível a partir de análises convencionais, físico-químicas, uma vez que não permite avaliar os eventuais e reais impactos à fauna do solo, já que podem ocorrer processos aditivos, sinérgicos e antagônicos sobre os organismos em cenários de contaminação ambiental (BUCH et al., 2017; 2018).

Os invertebrados edáficos podem ser classificados de acordo com seu comprimento em três grupos: microfauna (< 0,2 mm), no qual inclui nematóides e rotíferos; mesofauna (0,2-2 mm), no qual inclui ácaros, colêmbolos e enquitreídeos; e a macrofauna (> 2 mm), no qual inclui minhocas e quilópodes (SWIFT et al., 1979). Por serem numerosos, bem distribuídos e se movimentarem nos poros e nas fissuras do solo, e na interface entre a serapilheira e o solo, a mesofauna contribui para a mineralização da matéria orgânica através da fragmentação da serapilheira, exercendo importante função no processo de humificação do solo. Além de participar na inoculação de microorganismos, na modificação de substâncias químicas e na regulação e distribuição das partículas do solo. Os anelídeos da Classe

Oligoquetas (minhocas e enquitreídeos) são comumente encontrados no solo e representam cerca de 92% da biomassa de invertebrados presentes no mesmo (EDWARDS et al., 1996). Esses “engenheiros do ecossistema” apresentam uma particular funcionalidade no solo por influenciar direta e indiretamente nas suas propriedades físicas, químicas e biológicas; criar estruturas biogênicas (galerias e coprólitos); serem bastante ativos na mecânica do solo, contribuindo para a estabilidade estrutural dele, incluindo a formação de macro e microagregados estáveis; aumentar a aeração, condutividade hidráulica e proporcionar a reciclagem de carbono e nutrientes, estimulando a atividade da microflora e da fauna do solo como um todo; e fornecer reservas de nutrientes potencialmente disponíveis para as plantas, favorecendo seu desenvolvimento (BROWN, et al., 2013; SCHMELZ, et al., 2013). Os organismos que se alimentam de solo ou no solo, como os oligoquetas, ácaros e colêmbolos são os que mais ficam expostos às substâncias ligadas ao solo, sendo os mais afetados em ambientes contaminados (BUCH et al., 2013).

A avaliação da qualidade do solo e dos riscos ecológicos potenciais de áreas contaminadas por rejeitos minerários podem ser realizadas por bioensaios, os quais têm-se revelado de extrema utilidade e eficácia (BUCH et al., 2020). Os testes de ecotoxicidade permitem compreender até que ponto as substâncias químicas isoladas ou em forma de mistura são nocivas a sistemas vivos, e como e onde seus efeitos se manifestam, verificando através do monitoramento possíveis efeitos letais, morfológicos, comportamentais, fisiológicos, citogenéticos e bioquímicos nos organismos expostos aos poluentes (GARCIA, 2004). Os testes ecotoxicológicos comportamentais têm revelado satisfatoriamente a curto prazo, respostas sub-crônicas da toxicidade de solos contaminados (LOUREIRO et al., 2005; BUCH et al., 2016).

Neste contexto, a fauna edáfica pode ser uma essencial ferramenta na avaliação de solos contaminados com rejeitos minerários. Em avaliações preliminares, este estudo avaliou os efeitos ecotoxicológicos de solos afetados por rejeitos minerários no comportamento de fuga de duas espécies pantropicais da fauna edáfica, entre dois anos de monitoramento (2015 e 2018).

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Áreas de estudo

O estudo foi realizado em 19 áreas dos estados de Minas Gerais-MG e Espírito Santo-ES (Figura 1). Dentre essas, uma foi selecionada como área de referência, localizada em Meloso, Conceição do Mato Dentro-MG, a qual não foi atingida pelo derramamento de rejeito minerário após o rompimento da Barragem de Fundão, ocorrido em novembro de 2015. As outras 18 áreas avaliadas, perfazem um perímetro amostral de aproximadamente 670 km, sendo elas: áreas circundantes à Barragem de Fundão-BF1 e BF2; Fonseca-F; Pedras-PE; Gesteira-GES; Ponte do Onça-PO; Barra Longa-BL; São Sebastião do Soberbo-SSS; São José do Goiabal-SJG; Córrego Novo-CN; Veneza-V; Periquito-PER; Governador Valadares-GV; Tumiritinga-TUM; Conselheiro Pena-CP; Santo Antônio do Rio Doce-SARD; Honório Fraga-HF; Linhares-L) (Figura 1).

2.2. Avaliação ecotoxicológica

2.2.1. Solos e organismos-testes

Para cada área do estudo, foram coletados dez sub-amostras de solo ribeirinho (0-10 cm de profundidade), com o auxílio de uma pá manual plana, em uma grade representativa amostral de 20 x 20 m. A primeira amostragem ocorreu entre 7 e 17 dias após a ruptura da barragem, em novembro de 2015 e a segunda foi realizada em outubro de 2018. Todas as amostras de solos foram coletadas sob vegetação ripária (quando presente). Em cada área do estudo foram realizadas caracterizações ambientais e levantamentos pedogeoquímicos, os quais são apresentados e discutidos em Buch et al. (2020).

Cada área do estudo correspondeu a um solo-teste a serem avaliados por meio de testes ecotoxicológicos comportamentais. Dois organismos representativos da meso e macrofauna edáfica tropical foram selecionados para os testes ecotoxicológicos, sendo as espécies de colêmbola *Proisotoma minuta* (Tullberg, 1871) e de minhoca *Pontoscolex corethrurus* (Müller, 1857), respectivamente. Os cultivos de *P. minuta* seguiram a metodologia de cultivo e obtenção de juvenis de idade sincronizada proposta pela Norma ISO 17512-2 (2011). Um maior detalhamento dos cultivos de *P. corethrurus* em laboratório podem ser encontrados em Buch et al. (2011 e 2017).

2.2.2. Testes ecotoxicológicos

Para avaliar o comportamento de fuga, os testes ecotoxicológicos foram conduzidos de acordo com as normas ISO 17512-2 (2011) e ISO 17512-1 (2008) para colêmbolos e minhocas, respectivamente. Um delineamento inteiramente casualizado, foi aplicada na distribuição dos tratamentos, utilizando cinco repetições. Os tratamentos consistiram de 5 diluições crescentes de solo-teste (contaminado com rejeito minerário) com amostras de solo referência, perfazendo as seguintes proporções: 0% (isenta de contaminação-solo referência), 25%, 50%, 75% e 100% (rejeito minerário/solo-teste). Afim de garantir as condições experimentais, um solo artificial tropical foi usado como controle, o qual foi preparado de acordo com a ISO 11267 (ISO, 2014), composto por 70% areia fina (lavada e seca), 20% de argila caulínica, e 10% de casca de coco (moída e seca) (adaptada por Garcia, 2004). Os experimentos foram realizados em recipientes plásticos (13 cm de altura por 4 cm de diâmetro para colêmbolos, e de 7 cm de altura por 30 cm de comprimento para minhocas). Em cada recipiente uma divisória foi inserida verticalmente no meio, onde cada um dos lados recebeu 30 g (teste com colêmbolos) ou 250 g de solo (teste com minhocas) com pH e umidade corrigidos. Um dos lados do recipiente recebeu o solo-teste e o outro o solo referência. Posteriormente, a divisória plástica foi retirada e inserido as espécies-teste sobre a linha de separação formada (20 indivíduos de *P. minuta*, com idade entre 10 e 12 dias; e 10 indivíduos adultos clitelados de *P. corethrurus*; cada espécie foi testada separadamente).

Por um período experimental de 48 horas, os indivíduos não receberam alimentação, os recipientes permaneceram tampados no escuro, sob temperatura controlada de 20 °C ± 2 °C. Após 48 h de exposição, a divisória plástica foi novamente inserida no meio do recipiente dividindo-o em duas seções (solo-teste e solo referência). Sequencialmente, cada porção das seções foi transferida para um novo recipiente onde os indivíduos foram contabilizados. Para *P. minuta* foi desejável um recipiente contendo água e algumas gotas de tinta rosa-bengala e purpúrea para realização da contagem do número de indivíduos. *P. corethrurus* foram contabilizadas por catação manual e devido ao seu tamanho não houve necessidade de lupa macroscópica.

2.3. Análise estatística

Para analisar se os solos-testes indicaram a ocorrência de perda da função de hábitat para cada espécie testada, utilizou-se a fórmula $A = ((C - T) / N) \times 100$, onde A corresponde a porcentagem de fuga, C é o número de indivíduos no solo de referência, T é o número de indivíduos no solo-teste, e N é o número total de indivíduos inseridos no teste. As concentrações mais elevada sem efeito observável-CENO e mais baixa com efeito observável-CEO-foram obtidas através do Fischer Exact Test ($p < 0,05$) (ZAR, 1996). Os valores da concentração efetiva em 50% da população (CE_{50}), com 95% de confiabilidade foram estimados através do software PriProbit 1.63 (SAKUMA, 1998). As diferenças estatísticas entre os tratamentos foram calculadas pela análise de variância (ANOVA) e Teste Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

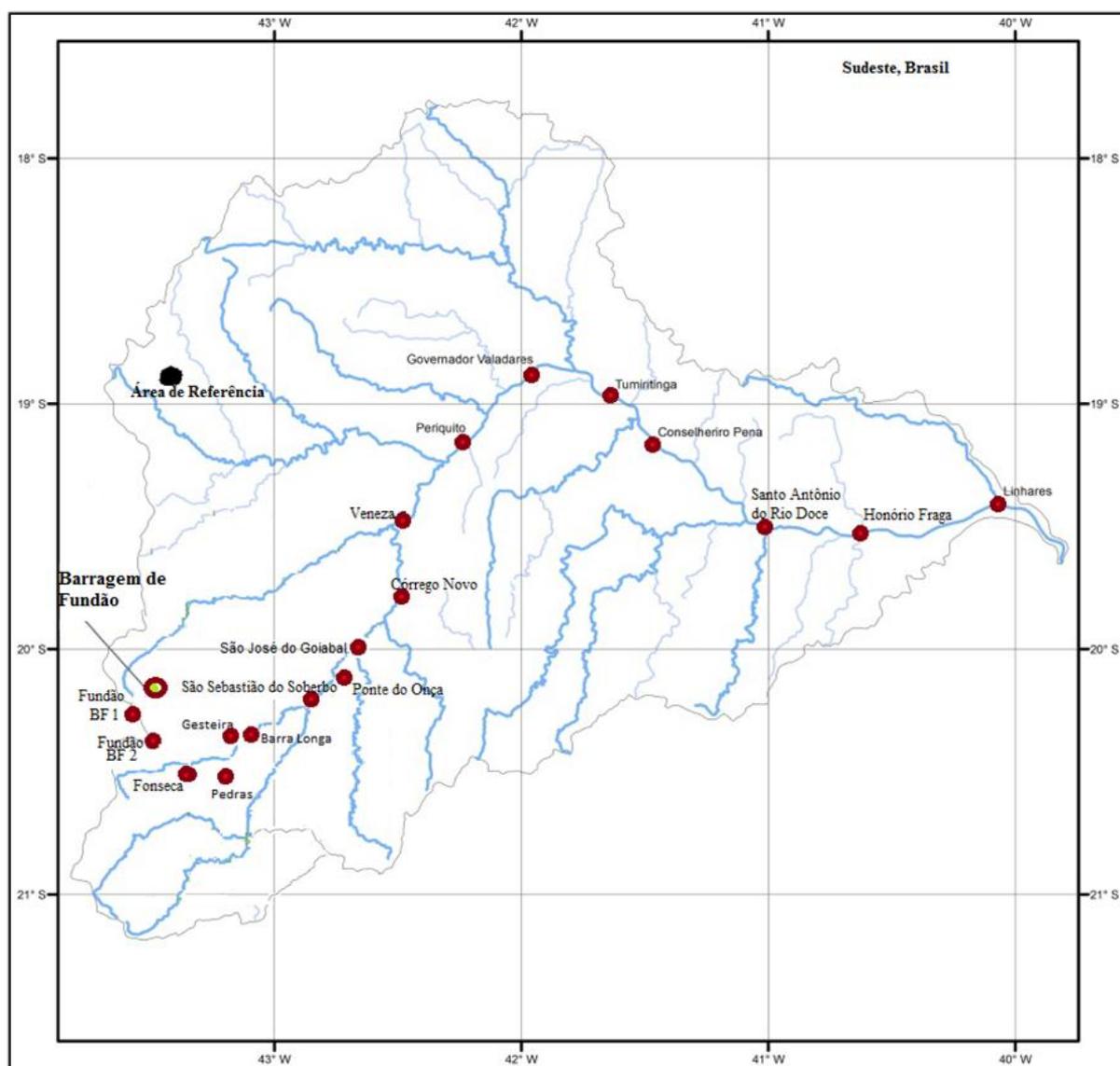


Figura 1. Mapa das áreas de estudo, nos estados de Minas Gerais e Espírito Santo. Os pontos vermelhos referem-se as 18 áreas afetadas pelo rejeito mineral da Barragem de Fundão, distribuídos ao longo da Bacia do Rio Doce. O ponto preto é condizente a área de referência.

3. RESULTADOS

Respostas significativas de *P. minuta* (> 60%) para a fuga, foram observadas em solos-testes contaminados a 100% de rejeito minerário, nos dois períodos de amostragem (2015 e 2018) (Figura 2). Aplicando o critério que limita a função de habitat do solo (ISO17512-2, 2011), as áreas CN, PER, GV e TUM apresentaram uma resposta de evasão superior a 80%, quando essas foram comparadas à área de referência, principalmente nas amostras de solo-teste de 2015 (Figura 2). No geral, os valores de CE₅₀ para *P. minuta* variaram de 61% a 87% e de 33% a 96% de rejeitos minerários, para solos-testes amostrados em 2015 e 2018, respectivamente. Para a maioria das amostras de solo-teste coletadas em 2015 os valores de CEO foram de 25% de rejeito minerários, apresentando exceções nas áreas de BF1, BF2, CN, PER, GV e TUM para as quais foram notados CEO de 50% de rejeitos minerários. Por outro lado, nas amostras de solo de 2018 a maioria das áreas contaminadas mostraram CEO de 50% de rejeito minerários, exceto na área de Tum (CEO=25% de rejeito de Fundão).

A evitação de *P. corethrurus* nas áreas afetadas pelo rejeito minerário de Fundão indicaram uma maior sensibilidade que o organismo da mesofauna (*P. minuta*). A partir da proporção de diuicção de 50% de solo-teste foram notados a evasão em mais de 50% da população de minhocas em todas as áreas afetadas pelo rejeito de Fundão (Figura 3). Para os dois anos amostragem, as CE₅₀ de *P. corethrurus* estiveram entre 37% a 70% de rejeitos minerários. Todas os solos-testes mostraram CEO de 25% de rejeitos para os dois anos de avaliação (2015 e 2018).

Ao contrário dos colêmbolos que evitaram mais as áreas intermediárias (PER, GV e TUM e CN) no gradiente amostral, a evasão das minhocas acompanharam o gradiente do percurso que a lama minerária percorreu nas áreas estudadas (dispostas em conformidade com as ilustrações dos eixos da áreas, descritas nas figuras 2 e 3), ou seja quanto mais próximas as áreas estiveram das áreas que ocorreram a quebra da Barragem de Fundão, maior o decaimento na qualidade dos solos.

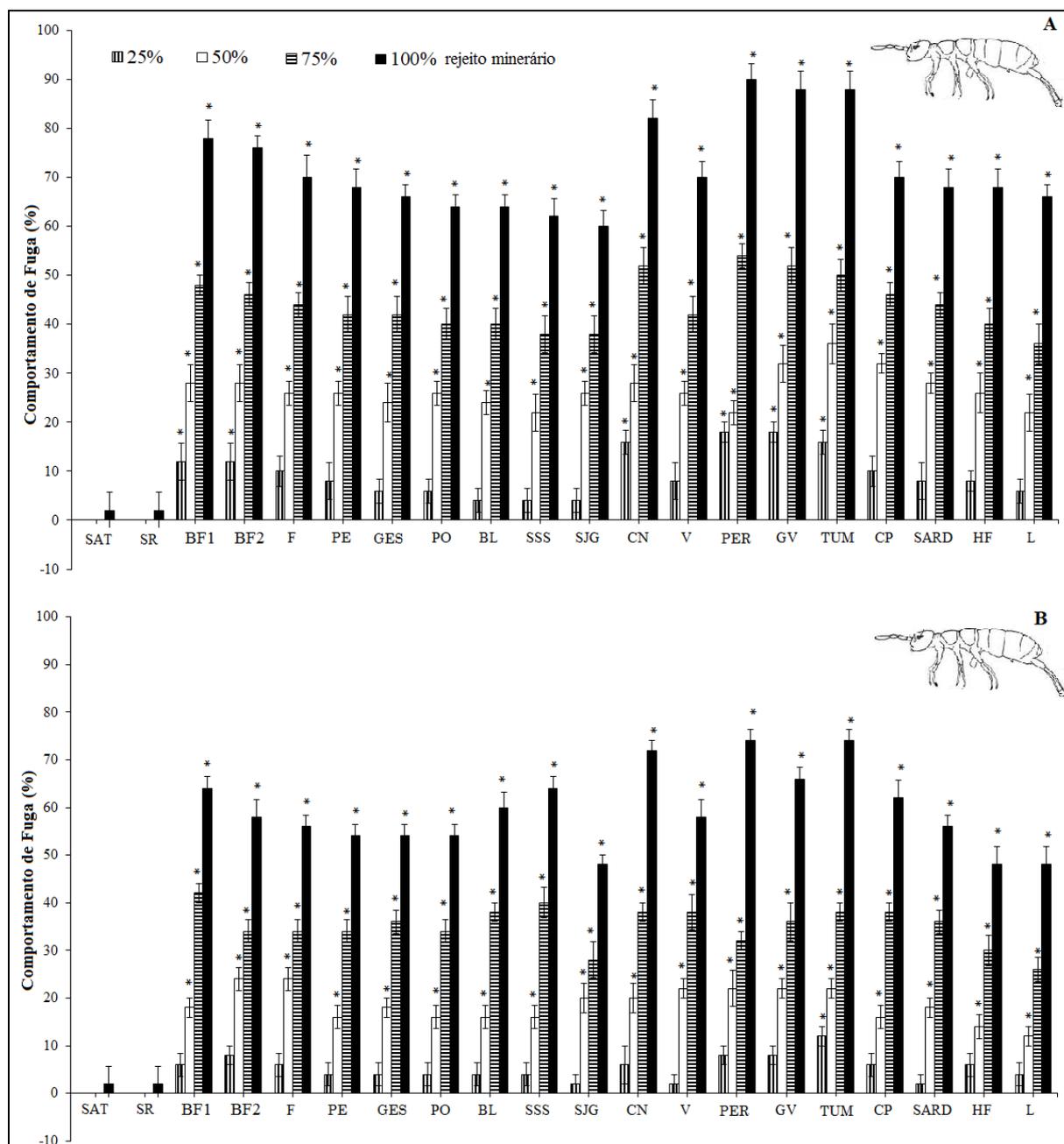


Figura 2. Resposta ecotoxicológica comportamental de *Proisotoma minuta*, em solos contaminados por rejeitos minerários (Barragem de Fundão-MG, Brasil). A-refer-se à amostras de solos coletados em 2015 e B é referente ao ano de 2018.

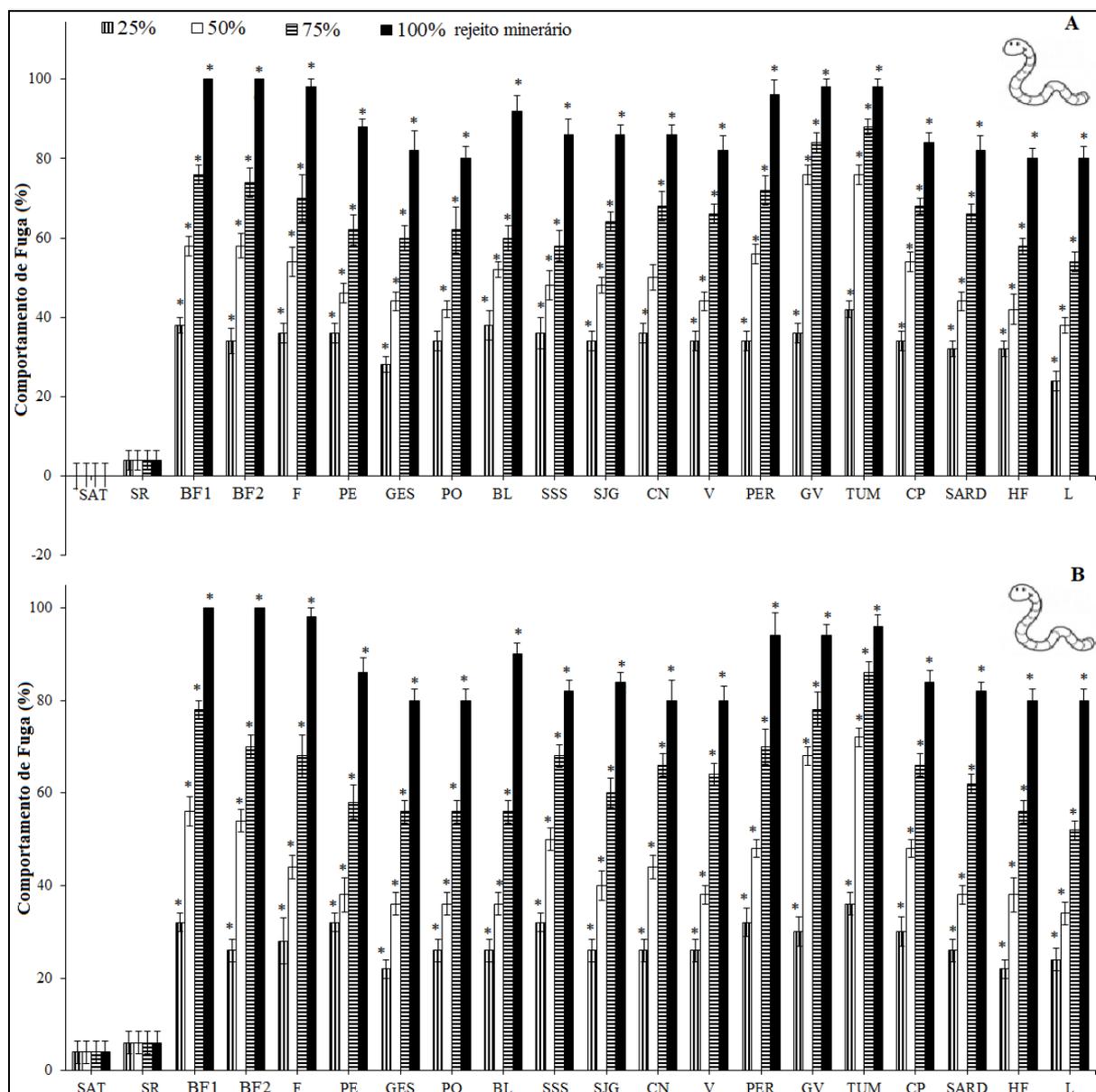


Figura 3. Resposta ecotoxicológica comportamental de *Pontoscolex corethrus*, em solos contaminados por rejeitos minerários (Barragem de Fundão-MG, Brasil). A-refere-se à amostras de solos coletados em 2015 e B é referente ao ano de 2018.

4. DISCUSSÃO

Os resultados dos testes de fuga, em solos afetados por rejeitos minerários, demonstram a capacidade que os organismos edáficos têm de detectar a presença de poluentes e assim migrarem para áreas menos contaminadas. Essa particular tendência a evasão têm sido notavelmente atribuída as minhocas e reportadas na literatura, mostrando em adicional que em alguns casos a densidade de minhocas igualmente decresceu em solos que apresentavam maiores teores de metais, tais como Zn, Cu e Pb (Nahmani e Lavelle, 2002;

Natal da Luz et al., 2004). Alguns estudos com enquitreídeos e colêmbolos têm mostrado que suas respostas de fuga estariam mais associados as propriedades físico-químicas inerentes ao solo do que com as características de toxicidade dos contaminantes (Liu et al., 2018). Os colêmbolos parecem ser menos influenciados pelas características do solo do que as minhocas (Matos-Moreira et al., 2011). Roëmbke et al. (2002) notaram que a distribuição de enquitreídeos no campo não foi afetada pelo aumento da exposição ao zinco; supondo-se que tais resultados teriam sido mascarados pelos valores crescentes de pH associados às quantidades crescentes de zinco no solo. Por outro lado, o pH do solo tem influenciado diretamente a biodisponibilidade de metais pesados como o mercúrio para a fauna edáfica, causando efeitos toxicológicos crônicos e sub-crônicos principalmente em organismos que se alimentam unicamente de solo, como a *P. corethrurus* (Da Silva et al., 2016; Buch et al., 2017). Diversas pesquisas têm reportado em solos contaminados ou poluídos, uma menor sensibilidade de colêmbolos do que de minhocas em ensaios de varredura como os de fuga; porém cada caso de estudo (local de contaminação) envolve específicos fatores associados, abióticos e bióticos, influenciáveis na ecotoxicidade (Aldaya et al., 2006; Buch et al., 2020).

Não existem muitos estudos que aplicaram testes ecotoxicológicos comportamentais de fuga para a avaliação de solos contaminados por rejeitos minerários; entretanto tal teste tem sido largamente empregado em solos contaminados em laboratório por metais e pesticidas, mostrando uma sensibilidade de resposta à contaminação maior que em testes agudos e crônicos (Loureiro et al., 2004; Boiteau et al., 2011; Oladipo et al., 2019).

5. CONCLUSÃO

Para os dois anos de monitoramento de contaminação (2015 e 2018), os solos-testes das 18 áreas afetadas pelo rejeito minerário da Barragem de Fundão indicaram perda de sua funcionalidade como habitat para *P. corethrurus* (representante da macrofauna edáfica). Isto foi destacavelmente notado em concentrações a 100% de solo-teste, perfazendo as condições reais do solo nestas áreas. Esta evidência sugere uma redução de abundância, biodiversidade e funcionalidade de organismos edáficos presentes em solos que foram contaminados por rejeitos de Fundão.

Os resultados preliminares do comportamento de fuga evidencia uma menor sensibilidade dos organismos da mesofauna edáfica (*P. minuta*) do que da macrofauna (*P. corethrurus*) para este *endpoint*. Todavia, diversos fatores podem estar associados, tais como estratificação do solo ou liteira que vivem e se alimentam, ou seja hábito alimentar e maior via de contato com os poluentes no solo (diretas e/ou indiretas assimilações, defesas entre outros). A variabilidade das respostas de toxicidade pode estar também associado á alteração nas propriedades físico-químicos dos solos, os quais após a ruptura da barragem foram contaminados com rejeitos minerários (à exemplo, acarretando aumento de densidade do solo e níveis de metais-traço), uma discussão mais ampla pode ser observada em Buch et al., 2020.

Os testes ecotoxicológicos comportamentais como os de fuga podem ser considerados ferramentas eficientes e de baixa viabilização econômica para avaliações iniciais de risco ecológico em solos contaminados. Sua implementação ajuda a estabelecer ações mitigadoras ou compensatórias que auxiliem no monitoramento contínuo para o reestabelecimento da qualidade de tais áreas afetadas.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho contou com o subsídio da FAPERJ- Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (202.453/2017-PDR10) e UFF-Universidade Federal Fluminense – Brasil. Agradecemos o apoio e parceria do CPRM- Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais - Serviço Geológico do Brasil, EMBRAPA- Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, EMATER- Empresa de Assistência Técnica e Extensão Rural e a Universidade de Fudan, Xangai-China.

REFERÊNCIA

- Aldaya, M.M., Lors, C., Salmon, S., Ponge, J.-F., 2006. Avoidance bio-assays may help to test the ecological significance of soil pollution. *Environmental Pollution* 140: (1), 173-180.
- Boiteau, G., Lynch, D.H., Mackinley, P., 2011. Avoidance tests with *Folsomia candida* for the assessment of copper contamination in agricultural soils. *Environmental Pollution* 159, 903-906.
- Brown, G.G., Callaham, M.A., Niva, C.C., et al., 2013. Terrestrial oligochaete research in Latin America: The importance of the Latin American Meetings on Oligochaete Ecology and Taxonomy. *Applied Soil Ecology* 69, 2-12.
- Buch, A.C., Brown, G., Niva, C., Sautter, K.D., Sousa, P., 2013. Toxicity of three pesticides commonly used in Brazil to *Pontoscolex corethrurus* (Muller, 1857) and *Eisenia andrei* (Bouché, 1972). *Applied Soil Ecology* 69, 32-38.
- Buch, A.C., Niemeyer, J.C., Correia, M.E.F., Silva-Filho, E.V., 2016. Ecotoxicity of mercury to *Folsomia candida* and *Proisotoma minuta* (Collembola: Isotomidae) in tropical soils: Baseline for ecological risk assessment. *Ecotoxicology and Environment Safety* 127, 22-29.
- Buch, A.C., Brown, G.G., Correia, M.E.F., Lourençato, L.F., Silva-Filho, E. V., 2017. Ecotoxicology of mercury in tropical forest soils: Impact on earthworms. *Science of the Total Environment* 589, 222-231.
- Buch, A.C., Sisinni, C.L.S., Correia; M.E.F., Silva-Filho, E.V., 2018. Food preference and ecotoxicological tests with millipedes in litter contaminated with mercury. *Science of the Total Environment* 633, 1173-1182.
- Buch, A.C., Sautter, K.D., Marques, E.D., Silva-Filho, E.V., 2020. Ecotoxicological assessment after the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil): Effects on oribatid mites. *Environmental Geochemistry and Health* (Proof system).
- Da Silva, E., Nahmani, J., Lapied, E., Alphonse, V., Garnier-Zarli, E., Bousserhine, N., 2016. Toxicity of mercury to the earthworm *Pontoscolex corethrurus* in a tropical soil of French Guiana. *Applied Soil Ecology* 104, 79-84.
- Edwards, C.A., Subler, S., Chen, S.K., Bogomolov, D.M., 1996. Essential criteria for selecting bioindicator species, processes, or systems to assess the environmental impact of chemicals on soil ecosystems. In: Van Straalen, N.M., Krivolutsky, D.A. (Ed.). *Bioindicator systems for soil pollution*. Kluwer Academic Publishers, 67-84.
- EMBRAPA (Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária), 2015. Avaliação dos impactos causados ao solo pelo rompimento de barragem de rejeito de mineração em Mariana, MG: Apoio ao plano de recuperação agropecuária. Relatório Técnico. Embrapa Solos, Rio de Janeiro, 20 pp.

Garcia, M., 2004. Effects of pesticides on soil fauna: development of ecotoxicological test methods for tropical regions. Ecology and Development Series; Hohen Landwirtschaftlichen Fakultät, Universidade de Bonn. 281 pp.

Giller, P.S., 1996. The diversity of soil communities, the 'poor man's tropical rainforest'. Biodiversity and Conservation 5, 135-168.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), 2016. Laudo Técnico Preliminar. Impactos ambientais decorrentes do desastre envolvendo o rompimento da barragem de Fundão, em Mariana, Minas Gerais. Novembro. 38 pp.

IBAMA (Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis), 2017. Operação Águas - Fase Argos - Etapa III. Relatório geral de vistoria, 65 pp.

ISO (International Organization for Standardization), 2008. ISO 17512-1. Soil Quality - Avoidance Test for testing the quality of soils and effects of chemicals on behaviour – Part 1: Test with Earthworms (*Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*). Geneva, Switzerland.

ISO (International Organization for Standardization), 2011. ISO 17512-2. Soil Quality - Avoidance test for testing the quality of soils and effects of chemicals on behaviour - Part 2: Test with collembolan (*Folsomia candida*). Geneva, Switzerland.

Loureiro, S., Soares, A.M.V.M., Nogueira, A.J.A., 2005. Terrestrial avoidance behaviour tests as screening tool to assess soil contamination. Environmental Pollution 138, 121-131.

Matos-Moreira, M., Niemeyer, J.C., Sousa, J.P., Cunha, M., Carral, E., 2011. Testes de comportamento de fuga para avaliar os efeitos da aplicação de chorume de bovino e lodo de indústria láctea no solo. Revista Brasileira de Ciência do Solo 35: (4), 1471-1477.

Nahmani, J., Lavelle, P., 2002. Effects of heavy metal pollution on soil macrofauna in a grassland of Northern France. European Journal of Soil Biology 38, 297-300.

Natal da Luz, T., Ribeiro, R., Sousa, J.P., 2004. Avoidance tests with collembola and earthworms as early screening tools for site specific assessment of polluted soils. Environmental Toxicology and Chemistry 23, 2188-2193.

Oladipo, O.G., Burt, A.F., Maboeta, M.S., 2019. Effect of *Bacillus cereus* on the ecotoxicity of metal-based fungicide spiked soils: Earthworm bioassay. Ecotoxicology (London, England) 28: 37-47.

Omachi, C.Y., Siani, S.M.O., Chagas, F.M., Mascagni, M.L., Cordeiro, M., Garcia, G.D., Thompson, C.C., Siegle, E., Thompson, F.L., 2018. Atlantic Forest loss caused by the world's largest tailing dam collapse (Fundão Dam, Mariana, Brazil). Remote sensing Application: Society and Environment, 12, 30-34.

Rombke, J., Notenboom, J., Posthuma, L., 2002. The effects of zinc on enchytraeids: The Budel case study. Natura Jutlandica, Occasional Papers 2, 54-67.

Sakuma, M., 1998. Probit analysis of preference data. Applied Entomology and Zoology. Tokyo 33: (3), 339-347.

Schmelz, R.M., Niva, C.C., Römbke, J., Collado, R., 2013. Diversity of terrestrial Enchytraeidae (Oligochaeta) in Latin America: Current knowledge and future research potential. Applied Soil Ecology 69, 13-20.

SEDRU-MG (Secretaria de Estado de Desenvolvimento Regional de Política Urbana e Gestão Metropolitana do Governo do Estado de Minas Gerais), 2016. Relatório: Avaliação dos efeitos e desdobramentos do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana-MG. Grupo da Força-Tarefa. Belo Horizonte. Fevereiro. 287 pp.

Swift, M.J., Heal, O.W., Anderson, J.M., 1979. Decomposition in terrestrial ecosystems. Berkeley: University of California Press, p. 66-117.

Van Der Putten, W.H., Anderson, J.M., Bardgett, R.D., et al., 2004. The sustainable delivery of goods and services provided by soil biota. In: Wall, D.H. (Ed.). Sustaining biodiversity and ecosystem services in soils and sediments. San Francisco: Island Press, p.15-43.

Zar, J., 1996. Biostatistical Analysis. 3.ed. London: Prentice-Hall. 663p.