



ISSN:1984-2295

Revista Brasileira de Geografia Física

Homepage: <https://periodicos.ufpe.br/revistas/rbgfe>



Metal pollution in fluvial deposits impacted by a mining dam failure in the Doce river watershed (MG): earthworms as bioindicators

Ricardo Gonçalves Cesar¹, Mônica dos Santos Marçal¹, Aline Freire Serrano¹, Rodrigo Sardinha Lourenço¹, Matheus Teixeira do Nascimento¹, Mariana Vezzzone Tosta Rabello², Helena Polivanov³, Jéssica Zickwolf Ramos⁴, Zuleica Carmen Castilhos⁴

¹Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Instituto de Geociências, Departamento de Geografia. Avenida Athos da Silveira Ramos, 274. Ilha da Cidade Universitária, Rio de Janeiro (RJ), ricardogc.geo@gmail.com, monicamarcal@gmail.com, aferrano16@gmail.com, rodrigoslou@gmail.com, teixeira.matheus@outlook.com; ²Universidade Federal Fluminense, UFF. Instituto de Física. Av. Gal. Milton Tavares de Souza, s/nº, Campus da Praia Vermelha. São Domingos, Niterói (RJ), mvezzzone@gmail.com; ³Universidade Federal do Rio de Janeiro, UFRJ. Instituto de Geociências, Departamento de Geologia. Avenida Athos da Silveira Ramos, 274. Ilha da Cidade Universitária, Rio de Janeiro (RJ), hpolivanov@gmail.com; ⁴Centro de Tecnologia Mineral, CETEM. Coordenação de Processos Minerais Av. Pedro Calmon, 900. Cidade Universitária, Rio de Janeiro (RJ), jramos@cetem.gov.br, zcastilhos@cetem.gov.br

Artigo recebido em 27/04/2021 e aceito em 24/01/2022

ABSTRACT

This paper presents the results related to the ecotoxicological assessment associated with metal pollution in fluvial deposits from a segment of the Gualaxo do Norte River, which was impacted by the collapse of the Fundão dam under the responsibility of the SAMARCO S.A. (a joint-venture related to VALE S.A e BHP Billiton), in Mariana (MG). To achieve these purposes, bottom sediment samples were collected in the following fluvial deposits: riverbed (RB), floodplain (FP) and fluvial terrace (FT). Determinations of texture, toxic metals, pH and total organic carbon (TOC) were performed in these sediment samples. Another sample was obtained in a technogenic deposit, which consisted of the mud collected in the urban centre of the Paracatu de Baixo district. Other sediment samples were also collected in an area not impacted by dam collapse, and these samples were used as a reference. Acute and avoidance bioassays with earthworms (*Eisenia andrei*) were applied to these samples to evaluate their toxicity levels to soil biota. The results indicated that the tailing mud induced the increase of clay contents (especially in RB) and reduction of TOC concentrations, while pH values ranged close to neutrality. In addition, the tailing increased metal concentrations (mainly in FP), and arsenic and cadmium concentrations (extremely toxic elements) exceeded the threshold limits defined by Brazilian law for soil quality. The bioassays suggest low earthworm mortality and low toxicity levels. Although the FP has showed the highest metal concentrations, the bioassays indicated that the FT was the most toxic compartment. Such observation may be due to more intense pedogenesis and weathering processes on the deposits from FT.

Keywords: fluvial valley, bioassays, toxicity, technogenic deposit, mining tailing.

Poluição por metais em depósitos fluviais impactados pelo rompimento de barragem de mineração na Bacia do Rio Doce (MG): minhocas como bioindicadores

RESUMO

O trabalho apresenta os resultados da avaliação da toxicidade associada à poluição por metais pesados em depósitos fluviais de um trecho do Rio Gualaxo do Norte, impactado pelo rompimento da barragem de Fundão, da SAMARCO S.A (uma joint-venture das empresas VALE S.A e BHP Billiton), em Mariana (MG). Para tanto, amostras de sedimentos foram coletadas nos seguintes depósitos fluviais: leito fluvial (LF), planície de inundação (PI) e terraço fluvial (TF). Determinações de granulometria, metais tóxicos, pH e carbono orgânico total (COT) foram realizadas nos materiais. Outra amostra foi também coletada em depósito sedimentar tecnogênico: uma pilha de rejeitos da lama (exposta a céu aberto) retirada do centro urbano do distrito de Paracatu de Baixo. Amostras foram também colhidas em área não impactada pela lama, para funcionar como referência. Bioensaios agudos e de fuga com minhocas (*Eisenia andrei*) foram aplicados a estas amostras, visando avaliar o potencial tóxico à biota de solo. Os resultados indicam que a deposição da lama induziu ao aumento do teor de argila (principalmente no LF) e redução das concentrações de COT nos materiais, sendo que os valores de pH ficaram próximos a neutralidade. A passagem da lama incrementou as concentrações de metais tóxicos (principalmente na PI), sendo que os teores de arsênio e de cádmio (elementos de elevada toxicidade) ultrapassam os valores orientadores estipulados pela legislação brasileira para qualidade de solos. Os bioensaios agudos indicam baixa mortalidade de minhocas e, portanto, baixa toxicidade aguda. Embora a PI tenha exibido teores mais

elevados de metais, os bioensaios indicaram que o TF apresentou maior toxicidade. Esta constatação parece estar atrelada à atuação mais efetiva da pedogênese e de processos intempéricos nos depósitos do TF.

Palavras-chave: Vale fluvial, bioensaios, toxicidade, depósito tecnogênico, rejeito de minério.

Introdução

Em 05 de novembro de 2015, a Barragem de Fundão, localizada no município de Mariana (MG) e sob a responsabilidade da empresa SAMARCO S.A. (uma joint-venture da VALE S.A e BHP Billiton), se rompeu e lançou aproximadamente 44 milhões de m³ de rejeito da exploração de minério de ferro na bacia hidrográfica do Rio Doce. Trata-se de um dos maiores desastres ambientais da história do Brasil e o maior no mundo envolvendo o rompimento de barragens de mineração (Buch et al., 2020). Além das 19 vítimas humanas fatais, os rejeitos impactaram fortemente a qualidade das águas do sistema de drenagem do Rio Doce, solos circunvizinhos e atingiu o oceano (Marta-Almeida et al., 2016; Carmo et al., 2017). O processo de beneficiamento mineral em itabiritos (adotado pela Samarco SA para exploração de ferro) envolvia, além da britagem e moagem do minério, a flotação catiônica reversa, com adição de hidróxido de sódio, aminas e amidas, visando à depleção da hematita. Dessa forma, o rejeito armazenado na barragem tinha caráter básico, era rico em quartzo, continha hematita residual e traços de aminas e amidas, além de ter elevado percentual de partículas finas (Freitas et al., 2020).

Resíduos de mineração podem causar efeitos adversos à saúde humana e aos ecossistemas, tendo em vista a ocorrência potencial de contaminantes nestes materiais, incluindo metais pesados. No Brasil, estudos recentes focados nos efeitos tóxicos de metais pesados têm englobado áreas de mineração de chumbo (Vale do Ribeira, SP; e Santo Amaro da Purificação, BA); de ouro e ferro (região do quadrilátero ferrífero, MG; e bioma amazônico); de carvão (sudeste de Santa Catarina); e de bauxita (Castilhos et al., 2015; Niemeyer et al., 2015; Cesar et al., 2017; Buch et al. 2020). O armazenamento de rejeitos de mineração em barragens é comum e a gestão sustentável destes sítios perigosos é um desafio no Brasil, haja vista os recentes desastres ocorridos com a barragem de Fundão em Mariana (Mendes e Felipe, 2019) e com a barragem I, da VALE S.A,

em Brumadinho (MG) (Pereira et al., 2019; Porsani et al., 2019).

Estudos relacionados à caracterização desses rejeitos com vistas ao dimensionamento do risco ecológico à fauna de solo ainda são escassos. Neste sentido, a associação entre formas geomorfológicas em fundo de vale com o mapeamento da toxicidade dos sedimentos pode auxiliar no monitoramento ambiental, pois possibilita reconhecer os processos hidro geomorfológicos potencialmente geradores de sítios críticos de contaminação. Neste contexto, o reconhecimento de formas geomorfológicas críticas de contaminação por metais é de suma relevância no que se refere ao zoneamento de ambientes sensíveis do ponto de vista ecológico e identificação dos organismos em maior risco. Este tipo de informação contribui para a gestão dos riscos de desastres relacionados ao rompimento de barragens, e fornece subsídios consistentes à tomada de decisão em medidas de saúde pública e de controle da poluição ambiental.

Diante deste cenário, os depósitos de rejeitos lançados na rede de drenagem do rio Doce, após o rompimento da barragem de Fundão, devem ser analisados espacialmente, considerando-se a dinâmica das formas e processos fluviais e de encosta nos fundos de vale (Mendes e Felipe, 2016; 2019). No âmbito da dinâmica fluvial, os ambientes são caracterizados pela disposição de sedimentos dentro e fora de sua calha fluvial, sendo composto pelo leito fluvial, planície de inundação e terraço fluvial (Summerfield, 1991). O leito fluvial é composto por materiais rochosos ou aluvionares, envolvendo tipos diversos de transporte de sedimentos. A planície de inundação corresponde à superfície pouco elevada acima do nível médio das águas, sendo frequentemente inundada por ocasião das cheias. O terraço fluvial corresponde à antiga planície de inundação, quando não são mais alcançadas pelas águas (Sumerfield, 1991; Schumm, 2005; Brierley e Fryirs, 2005; Stevaux, e Latrubesse, 2017). Dessa forma, o acúmulo de rejeitos em compartimentos

preferenciais de deposição pode resultar em toxicidade para a biota, e sua identificação é de suma relevância à análise de risco ecológico. Contudo, no Brasil, estudos integrados envolvendo formas geomorfológicas em vales fluviais como categorias de análises ecológicas e ecotoxicológicas ainda são escassos, tornando extremamente importante a execução de estudos transdisciplinares que promovam a integração dessas áreas.

Na avaliação de risco ecológico, o uso de bioindicadores é essencial, e pode ser complementada pela caracterização física e análises químicas (Cesar et al., 2015; Monte et al., 2018) do material avaliado. Neste sentido, as minhocas (*Eisenia andrei*) são largamente empregadas como bioindicadores na estimativa do potencial tóxico e da biodisponibilidade de poluentes em ecossistemas de solo (Niva et al., 2016; Niemeyer et al., 2017; Monte et al., 2018). A utilização destes organismos se justifica pelo seu papel fundamental na cadeia trófica do solo, por representarem boa parte da biomassa do solo (quando presentes) e por serem sensíveis à presença de contaminantes (Asif et al., 2018; Vezzzone et al., 2018). Além disso, as minhocas exercem papel de suma relevância na modificação das propriedades do substrato pedológico e, dessa forma, prestam importantes serviços às atividades humanas, incluindo a redução da susceptibilidade dos solos à erosão e a manutenção da fertilidade de solos agrícolas (Wang et al., 2018).

O presente trabalho visa apresentar os resultados da avaliação da toxicidade em diferentes formas de depósitos fluviais (leito fluvial, planície de inundação e terraço fluvial) impactados pelo derrame de rejeitos da mineração de ferro oriundos do rompimento da Barragem de Fundão. As coletas de sedimentos foram realizadas em uma única seção transversal do rio Gualaxo de Norte, afluente pela margem direita do rio Doce. Embora tais resultados não representem o contexto geral da Bacia Hidrográfica do Rio Doce, relacionam estudos de geomorfologia fluvial com a toxicologia de solos - fundamental para o manejo de cultivos na região e, sobretudo, para a prevenção de riscos à saúde humana e do ecossistema local.

As motivações para o desenvolvimento da pesquisa estão relacionadas (i) à compreensão da toxicidade dos sedimentos em função de distintas formas fluviais (leito fluvial, planície de inundação e terraço fluvial), dos processos hidrosedimentares e intempéricos atuantes sobre estes compartimentos e (ii) à determinação de concentrações de metais pesados após três anos da contaminação no vale fluvial, e potencial risco aos ecossistemas.

Material e métodos

Área de estudo

A Bacia do rio Doce tem área aproximada de 83.500 km², com extensão do canal principal de 853 km até desaguar no Oceano Atlântico, dos quais 86% pertencem ao estado de Minas Gerais e 14% ao Espírito Santo. A área da bacia abrange cerca de 228 municípios, sua economia baseada na mineração e agricultura e abriga o maior complexo siderúrgico da América Latina (localizado no Vale do Aço). O relevo da área apresenta predomínio de planaltos, com presença de Maciços (Zona da Mata Mineira e o Maciço do Caparaó) e algumas Serras como a da Mantiqueira e a do Espinhaço, onde localizam-se as nascentes que chegam a atingir altitudes superiores a 1.000 m.

As coletas das amostras de sedimentos foram realizadas no rio Gualaxo do Norte, afluente pela margem direita do rio Doce no distrito de Paracatu de Baixo (Figura 1), que forma uma bacia de sexta ordem, com área aproximada de 560 km². Moradores locais foram fortemente atingidos pelo rompimento da barragem de Fundão, tendo sido parcialmente removidos pela prefeitura para outras localidades do município. Moradores remanescentes praticam atividades agrícolas e pastoris sobre os materiais impactados, sem a prévia (e desejável) avaliação da toxicidade destes materiais e do risco associado, sobretudo próximo aos rios.

Amostragens

Amostras de sedimentos superficiais foram coletadas a profundidade de 20cm, em junho de 2018. A amostragem foi conduzida em três ambientes de depósito fluvial impactados pela

lama, a partir de uma seção transversal ao canal, em segmento meândrico do Rio Gualaxo do Norte ($20^{\circ}18'11.6''\text{S}$ $43^{\circ}13'55.2''\text{W}$), definidos como: leito fluvial, planície de inundação e terraço fluvial. Rejeitos que atingiram a área urbana da comunidade de Paracatu de Baixo foram transferidos para um terreno ($20^{\circ}18'24.4''\text{S}$ $43^{\circ}13'33.4''\text{W}$) em pilhas a céu aberto. Uma amostra desta pilha de rejeitos (definida como

depósito tecnogênico) também foi coletada. A amostragem do depósito fluvial foi realizada de forma composta: em uma área aproximada de 10m^2 , cinco amostras de sedimento foram misturadas, de forma a gerar uma única amostra composta espacialmente representativa.

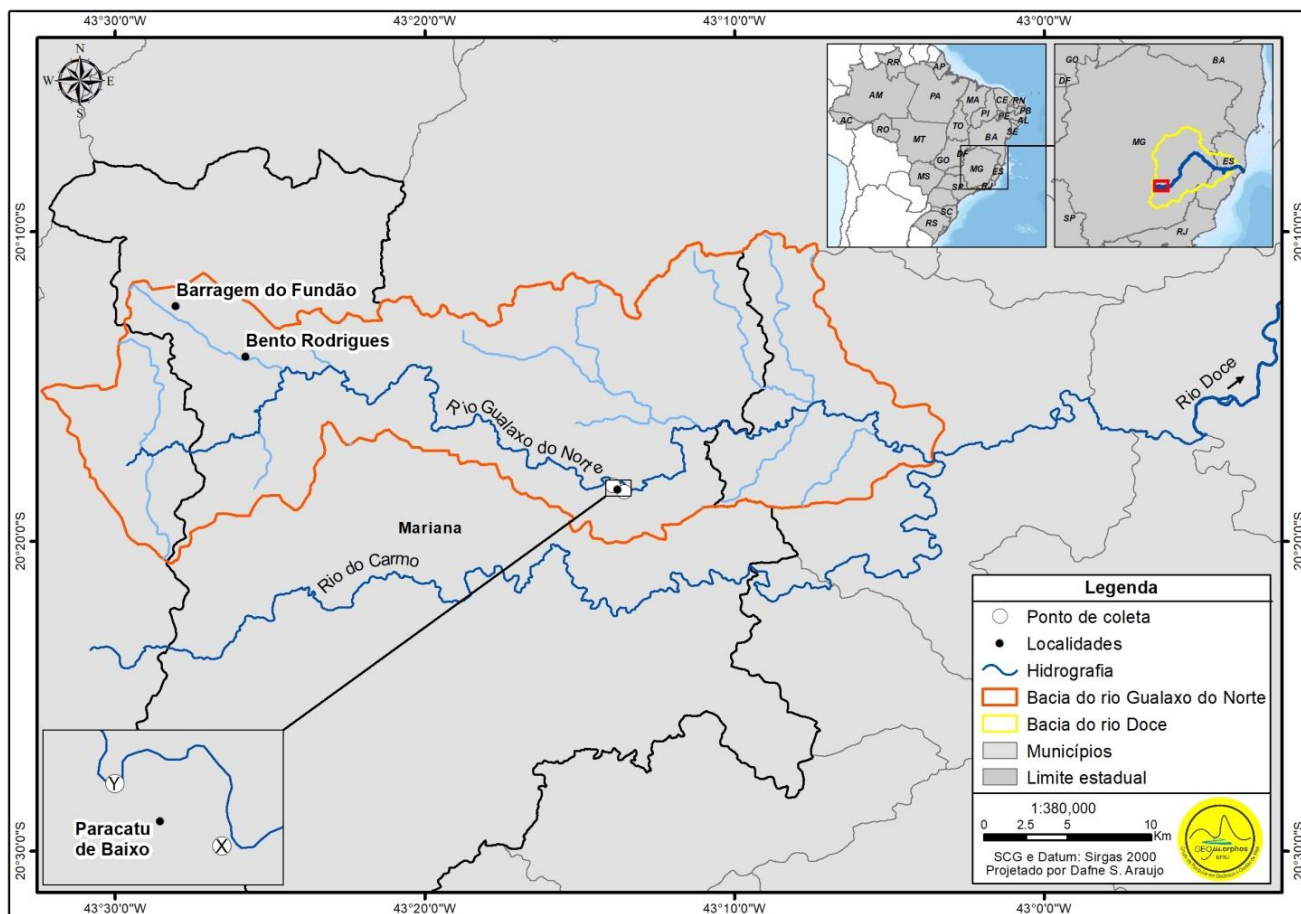


Figura 1. Localização geográfica da Bacia do Rio Gualaxo do Norte, no município de Mariana (MG). EM vermelho = distrito de Paracatu de Baixo. X = área de referência; Y = área impactada

Amostras de referência foram coletadas em uma área não atingida pelos rejeitos ($20^{\circ}17'37.6''\text{S}$ $43^{\circ}16'38.6''\text{W}$), em um tributário do Rio Gualaxo do Norte, para ser uma base de comparação/referência (*background* geoquímico local). Informações obtidas com moradores locais confirmam que o material da barragem não atingiu a área. Para esta amostragem de referência, foram coletadas somente amostras de planície de

inundação e de terraço fluvial, pois a turbulência das águas fluviais impossibilitou a coleta de sedimentos no leito fluvial. No caso das amostras obtidas em planície de inundação e em terraço fluvial, após a remoção de vegetais e outros detritos maiores, as mesmas foram coletadas com o auxílio de uma pá de plástico e acondicionadas em sacos plásticos. Em laboratório, os materiais foram secos à temperatura ambiente, desagregados, peneirados

a 2mm e posteriormente submetidos à caracterização física, química e avaliação ecotoxicológica.

Caracterização do material

A determinação granulométrica foi realizada com base no método da pipetagem, conforme EMBRAPA (1997). A análise de pH foi realizada com base no emprego de eletrodo combinado imerso em uma solução de 1:2,5 (solo:água) (EMBRAPA, 1997). O teor de carbono orgânico total (COT) foi obtido nas amostras previamente descarboxadas com HCl, utilizando o equipamento LECO-SNS.

As concentrações totais de zinco (Zn), cobre (Cu), chumbo (Pb), níquel (Ni), Cd (cádmio), cromo (Cr), arsênio (As), ferro (Fe) e alumínio (Al) foram determinadas com base na solubilização de 1g de amostra em uma solução ácida composta por HF:HClO₄:HNO₃ (1:1:1), seguida de leitura em um Espectrômetro de Emissão Óptica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES). A determinação do mercúrio (Hg) foi realizada por pirólise em uma Espectrometria de Absorção Atômica com correção Zeeman (LUMEX). As concentrações obtidas foram comparadas com os valores orientadores para qualidade de solos estabelecidos pela Resolução 420 do CONAMA/2009.

Bioensaios agudos com minhocas (*Eisenia andrei*)

O procedimento adotado para este ensaio foi baseado nas recomendações de ISO (1998). O experimento foi executado com cinco (5) réplicas de 500g de sedimento (com umidade ajustada para 40-60% da capacidade de retenção de água) contendo 10 organismos adultos previamente pesados e com clitelo bem desenvolvido. Os organismos foram obtidos a partir da cultura do Laboratório de Ecologia e Ecotoxicologia de Solos (LECOTOX) do Departamento de Geografia da UFRJ. Antes de serem introduzidos no ensaio, os organismos foram deixados sobre papel umedecido com água destilada em total escuridão por 24 horas, para o esvaziamento do conteúdo intestinal. O teste

foi realizado sob iluminação constante e temperatura controlada (20 ± 2 °C).

Após 14 dias de exposição, foi contabilizado o número de organismos sobreviventes. Os organismos sobreviventes foram novamente deixados sobre papel umedecido para o purgamento do conteúdo intestinal e, posteriormente, foram pesados para avaliação da variação da biomassa corporal. A variação da biomassa foi avaliada com base no peso médio dos indivíduos inseridos na réplica antes e após a exposição. Para garantir a qualidade dos resultados, réplicas adicionais contendo solos artificiais foram adicionadas ao ensaio. Para que o ensaio seja considerado válido, a mortalidade de organismos em solo artificial deve estar abaixo de 10%. O solo artificial é composto por 70% de areia quartzosa, 20% de caulim e 10% do pó da fibra de casca de coco (Garcia, 2004).

Bioensaio de fuga com minhocas (*Eisenia andrei*)

O procedimento adotado para este bioensaio foi baseado nos procedimentos de ISO (2008). O teste foi conduzido com três (3) réplicas e em recipientes plásticos (20cm de comprimento, 12cm de altura, e 5cm largura) divididos em duas seções de mesma área (Figura 2A), com o emprego de um divisor de plástico. Uma seção foi preenchida com solo artificial, enquanto a outra com amostra coletada em área contaminada (impactada pela lama). Após a remoção do divisor plástico, 10 organismos adultos (com clitelo bem desenvolvido) e de peso semelhante foram introduzidos na interface entre os solos (Figura 2B). Após 48 horas de exposição sob ciclos de luz:escuridão (16:8h) e temperatura controlada (20 ± 2 °C), foi contabilizado o número de organismos em cada uma das seções. Visando garantir a qualidade dos resultados, réplicas adicionais com solo artificial em ambas as seções (*dual control test*) foram adicionadas ao experimento, em que a distribuição equânime dos organismos é esperada para validação do teste.



Figura 2. Aspecto do bioensaio de fuga com minhocas da espécie *Eisenia andrei*: montagem do sistema (A); e sistema com minhocas recém-introduzidas (B). Nota: o material de cor acinzentada corresponde ao solo artificial.

Tratamento estatístico

Diferenças significativas entre os níveis de mortalidade e biomassa de *E. andrei* envolvendo as amostras-testes e as amostras-referência foram avaliadas com base no teste não paramétrico de Kruskal-Wallis. A normalidade dos dados foi avaliada com o teste Shapiro-Wilks.

Efeitos significativos de comportamento de fuga foram considerados quando o número de organismos na seção-controle (preenchida com solo artificial) foi significativamente menor ($p < 0,05$). A significância dessas diferenças foi avaliada com base one-tailed Fisher's exact test (Natal-da-Luz et al., 2009). Além disso, quando 80% dos organismos eram encontrados na seção controle (com solo artificial), considerou-se que o solo-teste exibia "função de habitat limitada" (ISO, 2008). Todas as análises estatísticas foram realizadas com o emprego do Software Statistica para Windows

Resultados e discussão

A disposição esquemática das formas fluviais identificadas na área de coleta de sedimentos no trecho estudado do rio Gualaxo do Norte pode ser observada na Figura 3. O trecho do rio encontra-se bastante impactado pelos rejeitos de minério de ferro, mas, ainda, com distinção da área de sua planície de inundação e a da formação do terraço fluvial, muito em função dos recentes ajustes da morfologia e processos fluviais. A vegetação é bastante escassa na área da coleta, com predomínio de gramíneas. Próximo do intervalo entre a encosta e o terraço fluvial, a presença de

invertebrados edáficos em campo sugere a ocorrência de pedogênese. Além disso, constatarem-se também áreas de agricultura no terraço e na planície fluvial.

Os resultados referentes à granulometria, COT e pH dos sedimentos estão apresentados na Tabela 1. Em comparação às amostras de referência, as amostras impactadas pelos rejeitos exibiram teores maiores de argila e menores de areia. Esta constatação está possivelmente atrelada à granulometria fina dos rejeitos liberados pelo rompimento da barragem (Freitas et al., 2020). Os sedimentos do leito fluvial apresentaram os maiores teores de argila, pois compõem o ambiente de sedimentação mais diretamente impactado pela lama (cuja textura original é predominantemente argilosa). A redução do teor de argila para o terraço fluvial parece refletir, como esperado, a existência de processos erosivos (não relacionados à ação fluvial) e práticas agrícolas realizadas neste ambiente de deposição. Neste sentido, é importante ressaltar que os rejeitos de mineração depositados na planície de inundação e no terraço fluvial poderão funcionar como material parental (de origem) para formação de solos (neste caso, Antropossolos – Dazzi e Lo Papa, 2015), com consequências importantes às atividades agrícolas e à saúde da biota do solo, incluindo os invertebrados edáficos (Huot et al., 2015; Cunha et al., 2016; Vezzzone et al. 2020). A amostra coletada na pilha de rejeito apresentou o teor mais baixo de argila e percentuais maiores de areia. Esta observação possivelmente decorre de um fluxo

mais turbulento (e de alta energia) associado à corrida deste material, englobando a mistura com materiais terrígenos e sedimentos mais grosseiros.

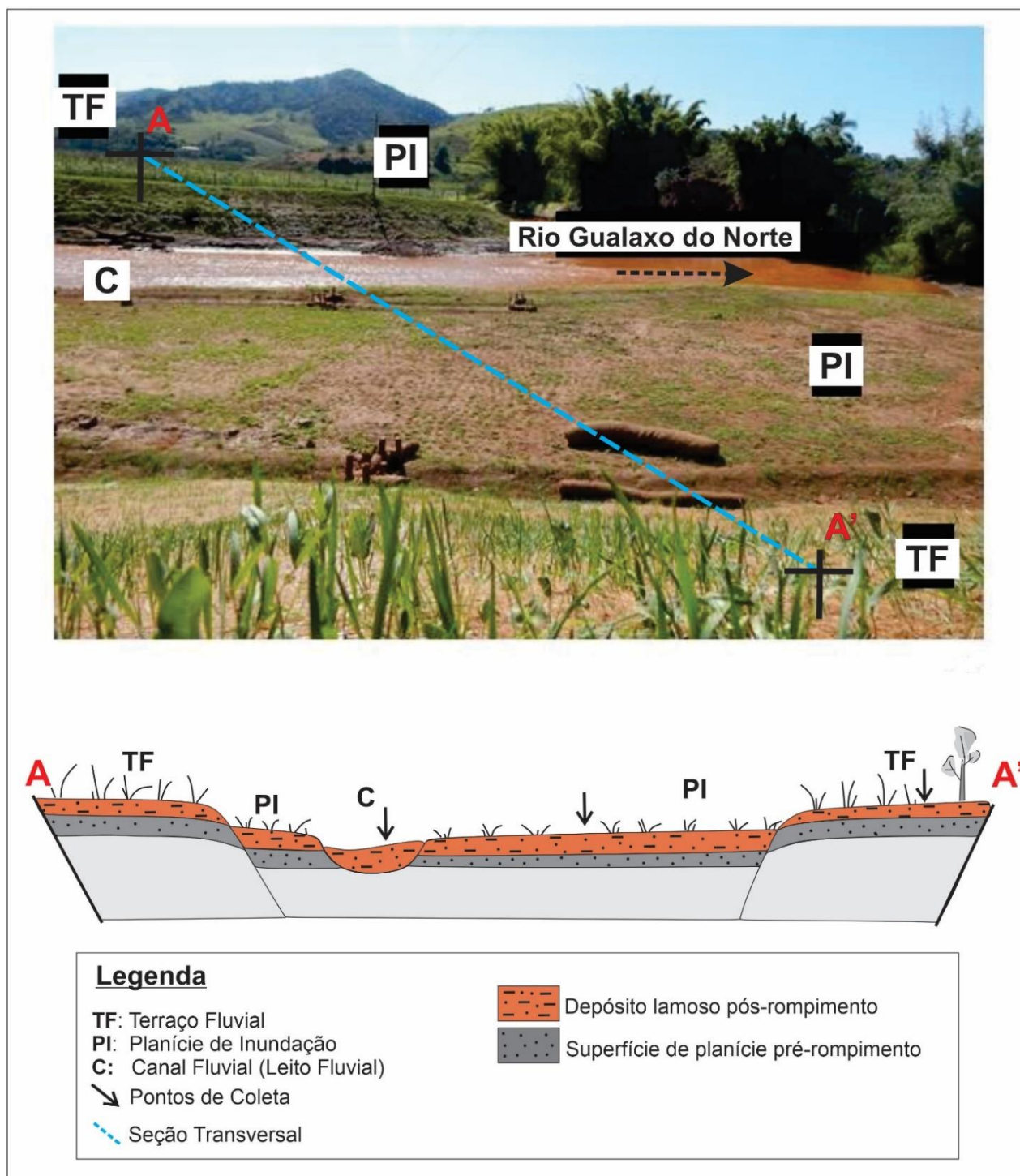


Figura 3. Disposição esquemática das formas fluviais no vale do rio Gualaxo do Norte, mostrando as formas deposicionais onde foram realizadas as coletas de sedimentos na área impactada.

Os teores de COT nos depósitos fluviais impactados pela lama e na pilha de rejeitos foram

muito mais baixos se comparados aos valores obtidos nas amostras de referência. Esta

constatação está provavelmente associada ao enriquecimento por Fe nas áreas atingidas pela lama, com redução substancial da concentração de matéria orgânica. É importante destacar que o teor de COT obtido no sedimento do terraço fluvial foi o maior dentre os depósitos fluviais atingidos pela lama. Neste sentido, é válido salientar que o terraço fluvial não está sob influência das cheias fluviais (diferentemente da planície de inundação). Dessa forma, para o terraço, espera-se uma atuação mais efetiva do intemperismo sobre os depósitos, com consequente formação de solos, instalação de vegetação e práticas agrícolas mais efetivas, induzindo ao aumento da concentração de matéria orgânica no solo.

Os valores de pH variaram entre ligeiramente ácido a neutro (entre 5,9 e 7,2). Nas

amostras impactadas pelos rejeitos, os valores foram levemente maiores do que os encontrados na área de referência. O processo de flotação adotado no beneficiamento do minério de ferro exige um valor de pH na faixa de 10, o que é conseguido por adição de soda cáustica (NaOH) (Freitas et al., 2020). Embora os rejeitos tenham esse caráter básico e os valores de pH estejam mais altos do que as amostras de referência, as diferenças são pequenas e, portanto, não permitem afirmar que o rejeito induziu alterações significativas de pH. Em todo o caso, tendo em vista que metais pesados adquirem maior mobilidade geoquímica e espacial sob condições ácidas (Párraga-Aguado et al., 2017), os valores de pH encontrados podem contribuir para decrescer a biodisponibilidade de metais.

Tabela 1. Determinação granulométrica (areia, silte e argila), de carbono orgânico total (COT) e pH das amostras de sedimentos coletadas no leito fluvial (LF), planície de inundação (PI), terraço fluvial (TF) e pilha de rejeitos (PR). Ref. = amostra de referência coletada em área não contaminada.

	Areia (%)	Silte (%)	Argila (%)	COT (%)	pH
LF	8	50	42	0,02	7,1
PI	10	58	32	0,07	6,1
TF	13	62	25	0,91	7,2
PR	36	45	19	0,08	6,2
PI (Ref.)	30	56	14	1,42	5,9
TF (Ref.)	31	60	9	1,51	5,9

As concentrações de metais pesados nas amostras coletadas estão apresentadas na Tabela 2. Os teores de As na planície de inundação e na pilha de rejeitos excederam o limite da legislação brasileira (Resolução 420 do CONAMA/2009) para o qual se espera a ocorrência de efeitos

adversos à biota do solo. De fato, a contaminação por As em solos é amplamente conhecida pelos seus efeitos tóxicos à fauna edáfica (Alves et al., 2016; Wang et al. 2018), incluindo o comprometimento de serviços ecossistêmicos. É importante também destacar que a concentração de

As na planície de inundação foi a mais elevada, servindo de alerta para práticas agrícolas nestas áreas.

De forma semelhante ao As, as concentrações de Cd nos depósitos fluviais impactados ultrapassaram os limites preconizados pela legislação brasileira. Diferentemente do As, as concentrações de Cd foram relativamente semelhantes entre os três compartimentos supracitados. O Cd é um metal sem qualquer função biológica e amplamente conhecido por bioacumular em plantas terrestres (Shahid et al., 2016). Dessa maneira, recomenda-se a restrição das atividades agrícolas praticadas não somente na planície de inundação, mas também no terraço fluvial.

Embora suas concentrações não tenham ultrapassado o valor orientador do CONAMA/2012, os teores de Pb nos depósitos fluviais impactados pela lama foram maiores se comparados às amostras de referência, indicando que a deposição dos rejeitos foi capaz de incrementar as concentrações deste metal. O Pb é não-essencial e potencialmente danoso aos anelídeos edáficos (Wijayawardena et al., 2017) e vegetais (Kader et al., 2016). De forma semelhante ao As e ao Al, a maior concentração de Pb foi detectada em planície de inundação e pode estar atrelada à deposição de sedimentos finos em suspensão na forma coloidal (com maior potencial de carrear metais, devido ao aumento da superfície de contato) durante as cheias do rio (Arfania e Asadzadeh, 2015).

De forma semelhante ao As e Pb, as concentrações de Hg nas amostras impactadas também foram maiores do que a amostragem de

referência, porém em concordância com os valores orientadores do CONAMA 420/2009. Esta constatação indica que a deposição dos rejeitos foi também capaz de incrementar o teor de Hg nas amostras. Novamente, a maior concentração foi encontrada para a planície de inundação. O Hg é um metal não-essencial, tóxico à fauna de solo (Buch et al., 2016) e sua forma orgânica (por exemplo, metilmercúrio) é capaz de bioacumular e biomagnificar na cadeia trófica aquática (Xu et al., 2018).

As concentrações de Cr e de Ni não excederam os valores orientadores da legislação brasileira, bem como não ultrapassaram as concentrações encontradas nas amostras de referência. Nas amostras impactadas pelos rejeitos, as concentrações de Fe, como esperado, foram até mais de duas vezes maiores do que aquelas verificadas na área de referência. Novamente, de forma semelhante ao Al, As, Pb e Cr, o teor de Fe no sedimento da planície de inundação foi maior. Os teores de Zn e Cu foram maiores nas amostras de referência, mas abaixo dos valores-limite estabelecidos pela legislação. Zn e Cu são micronutrientes essenciais e, portanto, componentes importantes da matéria orgânica (Pessarakli et al., 2015). Na planície e terraço fluviais da área de referência, práticas agrícolas e a presença consolidada de vegetação herbácea (principalmente no terraço) podem ter contribuído para o incremento dos teores de matéria orgânica nestes ambientes (e, possivelmente, dos teores de Zn e Cu). Os mais elevados teores de COT (Tabela 1) encontrados para as amostras de referência parecem validar esta hipótese.

Tabela 2. Determinação das concentrações de metais tóxicos em amostras coletadas de sedimentos em leito fluvial (LF), planície de inundação (PI), terraço fluvial (TF) e em pilha de rejeitos (PR). Ref. = amostra de referência obtida em área não contaminada. * = acima do valor de prevenção (VP) preconizado pela Resolução 420 do CONAMA/2012.

	Zn (mg/kg)	Cu (mg/kg)	Pb (mg/kg)	Ni (mg/kg)	Cd (mg/kg)	Cr (mg/kg)	As (mg/kg)	Hg (mg/kg)	Fe (%)	Al (%)
LF	9,8	<0,5	6,2	6,7	1,4*	13,6	8,6	0,0622	15,3	8,4
PI	10,5	4,1	9,2	<0,60	1,5*	19,4	21,6*	0,0636	17,8	16,8
TF	7,9	3,0	7,9	5,3	1,6*	17,9	4,7	0,0604	17,5	9,1
PR	39,3	36,5	<1,2	<0,60	1,0	69,0	21,4*	0,0589	11,4	5,9
PI (Ref.)	120	37,2	<1,2	5,8	<0,8	47,8	<4,0	0,0560	7,8	9,0
TF (Ref.)	69,5	52,1	<1,2	23,0	<0,8	29,1	<4,0	0,0021	7,1	7,8
VP (CONAMA)*	300	60	72	30	1,3	75	15	0,5	-	-

Os resultados dos bioensaios agudos com minhocas estão indicados na Figura 4. A única amostra que causou morte significativa aos organismos foi a pilha de rejeitos (80% de sobrevivência média), enquanto para as demais a sobrevivência ficou em geral acima de 90%, indicando baixa toxicidade aguda dos demais materiais para as minhocas. Esta baixa toxicidade pode estar atrelada à hipótese de que os metais presentes nas amostras podem ser oriundos da geologia regional, tendo sido concentrados após a deposição dos rejeitos, haja vista a elevada e conhecida afinidade dos metais pesados com os óxidos de ferro (por exemplo, hematita – abundante nos rejeitos) (Yin et al., 2016). Alguns autores apontam, de fato, para a ocorrência de fontes geogênicas de metais pesados para a região do Quadrilátero Ferrífero, sendo típico de áreas que sofreram intenso metamorfismo no passado geológico (Vicq et al., 2015). Tais áreas podem contar, por exemplo, com a ocorrência de depósitos hidrotermais de sulfetos metálicos e altos valores

basais de metais para solos, sedimentos e águas (Vicq et al., 2015; Fuchida et al., 2017). No caso deste presente estudo, os metais podem estar presos na estrutura cristalina dos minerais e, portanto, pouco biodisponíveis – conforme indica o baixo nível de letalidade de minhocas. Vale ressaltar, por outro lado, que a atuação do intemperismo (ao longo do tempo) sobre assembleias minerais metálicos pode liberar formas ionizadas de metais tóxicos para o ambiente, colocando em risco a saúde do ecossistema de forma crônica. Por esta razão, recomenda-se a aplicação de métodos de extração sequencial de metais para melhor caracterizar o potencial de mobilidade geoquímica e espacial de contaminantes metálicos (Fernández-Ondóño et al., 2017; Gabarrón et al., 2017).

Os resultados referentes ao bioensaio agudo mostram que, paradoxalmente, houve incremento da biomassa das minhocas expostas à amostra da pilha de rejeitos, que mostrou efeito agudo de mortalidade (Figura 1). Este incremento

de massa deve ser aparente e, de fato, se tratar de formação de edema como resposta tóxica. Este incremento pode estar associado a uma eventual exposição ao sódio (Na), tendo em vista o uso de hidróxido de sódio (NaOH) durante o processo de flotação (Freitas et al. 2020). Neste contexto, as minhocas absorveriam altas quantidades de água para manter o equilíbrio osmótico, resultando em edemas por acumulação excessiva de água. Outros autores também relataram fenômeno semelhante ao

estudarem a toxicidade de sais marinhos ou de materiais contendo altos teores de cloreto de sódio para minhocas, com incremento aparente da biomassa corporal dos animais (Vezzone et al., 2018, Monte et al., 2018). Em trabalhos futuros, recomenda-se fortemente a quantificação dos teores totais de sódio nestes materiais e nos tecidos biológicos.

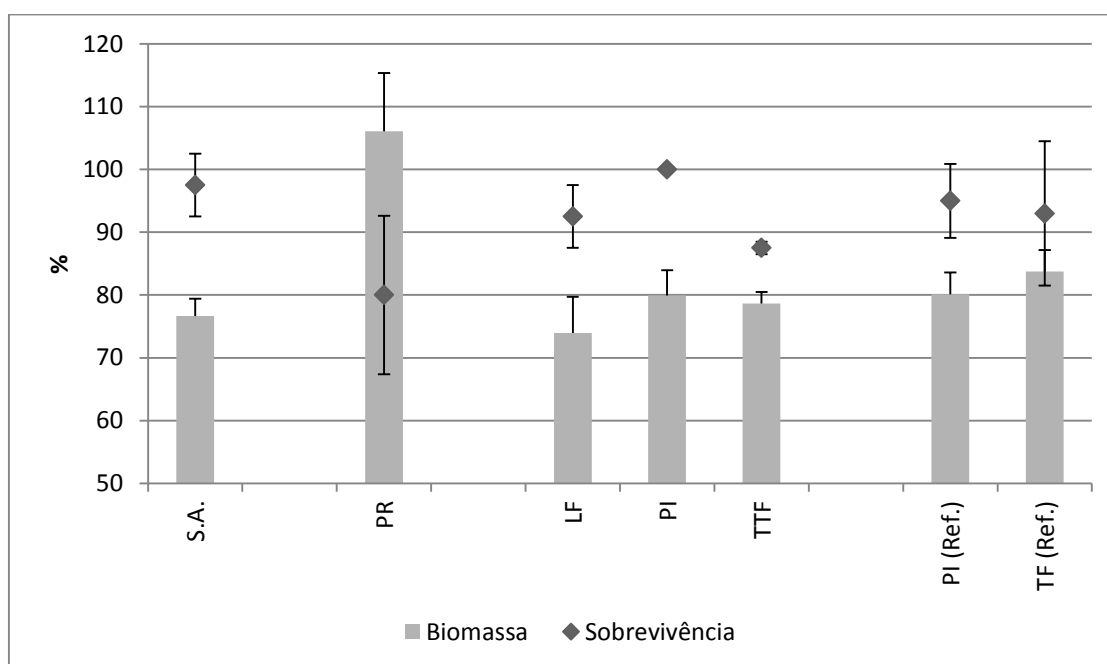


Figura 4. Sobrevivência e variação da biomassa corporal de minhocas (*Eisenia andrei*) expostas a amostras de sedimento coletadas em distintos compartimentos geomorfológicos impactados pelo rompimento da Barragem de Fundão no Rio Gualaxo do Norte (Mariana, MG). S.A. = solo artificial; PR = pilha de rejeito; LF = leito fluvial; PI = planície de inundação; TF = terraço fluvial; Ref. = amostra referência (coletada em área não contaminada). As barras representam os desvios padrões.

No âmbito das amostras colhidas nos depósitos fluviais, a amostra de sedimento coletada em leito fluvial apresentou a maior perda de biomassa de minhocas, que pode ser a expressão de efeitos agudos sub-letais. Neste sentido, vale destacar que o leito fluvial foi o compartimento mais diretamente atingido pela deposição de rejeitos. Além disso, o teor de matéria orgânica (isto é, disponibilidade de comida para os organismos) no leito fluvial foi menor se comparado à planície de inundação e ao terraço fluvial (Tabela 1). Tais fatores podem contribuir

para a redução da biomassa dos animais expostos ao sedimento do leito fluvial. Outro aspecto importante a ser considerado é que o enriquecimento por Fe nas amostras afetadas pelo rejeito (Tabela 1) pode ocasionar mudanças na estruturação física dos materiais (aumento da densidade e redução da capacidade de retenção de água), podendo resultar em efeitos sub-letais nos organismos.

Embora presente, em geral, teores menores de metais pesados, a amostra coletada no terraço fluvial apresentou maior perda de biomassa

de minhocas se comparada à sua respectiva amostra de referência. Por outro lado, a amostra colhida na planície de inundação, quando comparada à sua referência, não apresentou mudança representativa de biomassa, embora a planície de inundação exiba teores maiores de metais se comparados ao terraço fluvial. Fenômeno semelhante foi também observado ao se verificar os resultados do bioensaio de fuga com minhocas (Figura 5). No bioensaio de fuga, todas as amostras excederam o limite para a manutenção da função de habitat do solo (80% de fuga), com exceção da amostra coletada na planície de inundação. Quando as amostras excedem tal limite, significa que as minhocas não permanecem no sistema e considera-se que seus serviços ecossistêmicos estão comprometidos, incluindo a manutenção da fertilidade natural do solo, da aeração, porosidade, permeabilidade, agregabilidade e, em última instância, a redução da perda de solos por erosão (Jouquet et al., 2017; Vezzzone et al., 2018).

Os níveis menores de perda de biomassa e de fuga detectados para a planície de inundação

(quando comparado ao terraço fluvial) podem resultar da dinâmica sedimentar destas formas. A planície de inundação sofre inundação periódica e, portanto, conta com a presença de solos mais jovens, cuja pedogênese é periodicamente interrompida pela deposição de sedimentos durante as cheias. Por outro lado, os terraços fluviais consistem em planícies de inundação “abandonadas” e, dessa forma, o intemperismo pode atuar mais intensamente sobre o material de origem (depósitos sedimentares), gerando solos mais bem desenvolvidos. A atuação mais efetiva do intemperismo sobre os materiais depositados no terraço fluvial pode potencialmente liberar formas mais ionizadas de metais tóxicos para a solução do solo, aumentando a mobilidade pedogeoquímica e biodisponibilidade destes poluentes para a fauna edáfica. Esta premissa parece explicar a ocorrência de níveis maiores de perda de biomassa e de fuga de minhocas expostas à amostra do terraço fluvial, quando comparada à amostra colhida na planície de inundação.

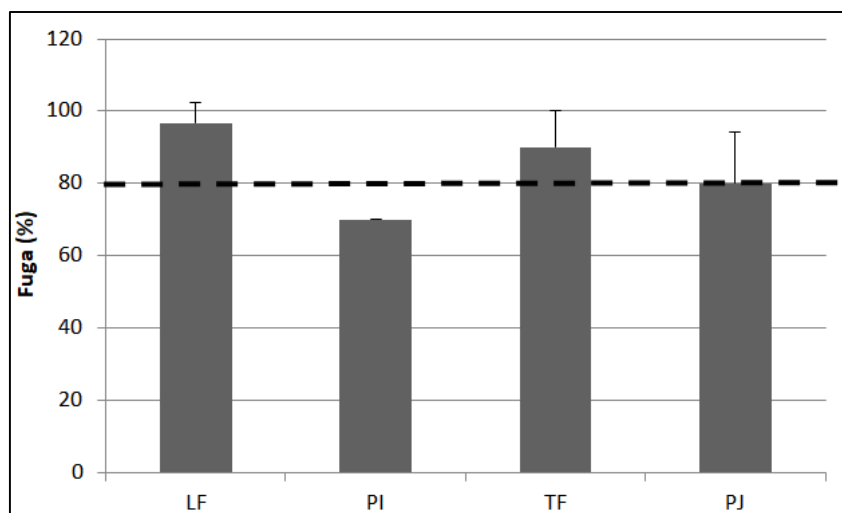


Figura 5. Percentual de repelência (fuga) de minhocas (*Eisenia andrei*) expostas a amostras de sedimento coletadas em distintos depósitos fluviais afetados pelo rompimento da Barragem de Fundão no Rio Gualaxo do Norte (Mariana, MG). S.A. = solo artificial; PR = pilha de rejeito; LF = leito fluvial; PI = planície de inundação; TF = terraço fluvial. As barras representam os desvios padrões.

Conclusão

As concentrações de metais nos sedimentos coletados foram elevadas e, no caso do As e Cd,

estavam acima dos valores estipulados para legislação brasileira (Resolução 420 do CONAMA/2009). A maior parte dos metais estudados exibiu teores maiores na planície de

inundação, quando comparada aos demais depósitos fluviais. Esta ocorrência preferencial pode estar associada à deposição de sedimentos finos coloidais sobre a planície de inundação nas épocas de cheia do rio. Em trabalhos futuros, recomenda-se a execução de mais estudos em outros trechos do curso fluvial do Rio Gualaxo do Norte, a fim de validar esta hipótese.

A pilha de rejeito (depósito tecnogênico) foi tóxica às minhocas e induziu a ocorrência de efeitos sub-letais de edema nos animais. Dentre os depósitos fluviais, o terraço foi o de maior toxicidade, embora apresente concentrações de metais inferiores àsquelas encontradas na planície de inundação. Esta constatação está atrelada à ocorrência de processos mais intensos de intemperismo sofridos pelos sedimentos do terraço

fluvial, com potencial para formação de solos mais desenvolvidos e geração de formas mais ionizadas de metais tóxicos para a solução do solo. Para melhor elucidar esta hipótese, recomenda-se a aplicação futura de técnicas de extração sequencial de metais nestas amostras, de forma a mensurar o potencial de mobilidade espacial e de biodisponibilidade de metais para a fauna edáfica.

Agradecimentos

Os autores gostariam de agradecer ao CNPq pelas bolsas (IC) concedidas a Aline Serrano, Matheus Teixeira e Rodrigo Lourenço, que foram fundamentais à execução deste trabalho. Os autores gostariam também de agradecer ao geógrafo Felipe Tadashi, pelo auxílio na montagem dos bioensaios.

Referências

- Alves, P., Silva, E., Cardoso, E., Alleioni, L., 2016. Ecotoxicological impact of arsenic on earthworms and collembolans as affected by attributes of a highly weathered tropical soil. *Environmental Science and Pollution Research* 25, 13217–13225
- Arfania, H., Asadzadeh, F., 2015. Mobility of heavy metals after spiking in relation to sediment and metal properties: leaching column study. *Journal of Soils and Sediments* 15, 2311–2322
- Asif, N., Malik, M., Chudhry, F.N., 2018. A Review on environmental pollution bioindicators. *Pollution* 4, 111–118
- Brierley, G.J., Fryirs, K.A., 2005. *Geomorphology and River Management: Applications of the River Styles Framework*, 1 ed. Blackwell Publishing, Oxford
- Buch, A., Niemeyer, J., Correia, M., Silva-Filho, E., 2016. Ecotoxicity of mercury to *Folsomia candida* and *Proisotoma minuta* (Collembola: Isotomidae) in tropical soils: Baseline for ecological risk assessment. *Ecotoxicology and Environmental Safety* 127, 22–29
- 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* 42, 3575–3595
- Carmo, F.F., Kamino, L.H.Y., Tobias-Junior, R., Campos, I.C., Carmo, F.F., Silvino, G., Castro, K.J.S.X., Mauro, M.L., Rodrigues, N.U.A., Miranda, M.P.S., Pinto, C.E.F., 2017. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. *Perspectives in Ecology and Conservation* 13, 145-151
- Castilhos, Z.C., Rodrigues-Filho, S., Cesar, R., Rodrigues, A.P., Villas-Bôas, R., De Jesus, I., Lima, M., Faial, K., Miranda, A., Brabo, E., Beinhoff, C., Santos, E., 2015. Human exposure and risk assessment associated with mercury contamination in artisanal gold mining areas in the Brazilian Amazon. *Environmental Science and Pollution Research International* 22, 11255-11264
- Cesar, R., Natal-da-Luz, T., Silva, F., Bidone, E., Castilhos, Z., Polivanov, H., 2015. Ecotoxicological assessment of a dredged sediment using bioassays with three species of soil invertebrates. *Ecotoxicology* 24, 414-42
- 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:

- http://www2.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=620. Acesso 10 jun. 2021
- Cunha, L., Brown, G., Stanton, D., Silva, E., Hansel, F., Jorge, G., McKey, D., Vidal-Torrado, P., Macedo, R., Velasquez, E., James, S., Lavelle, P., 2016. Soil animals and pedogenesis: the role of earthworms in anthropogenic soils. *Soil Science* 81(3-4), 110-125
- Dazzi, C., Lo Papa, G., 2015. Anthropogenic soils: general aspects and features. *Ecocycles* 1, 3–8
- 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, pp. 212
- Fernández-Ondoño, E., Bacchetta, G., Lallena, A., Navarro, F., Ortiz, I., Jiménez, M., 2017. Use of BCR sequential extraction procedures for soils and plant metal transfer predictions in contaminated mine tailings in Sardinia. *Journal of Geochemical Exploration* 171, 133-141
- Freitas, S.O., Amaral, I.B.C.A., Reis, A.B., 2020. Processo de beneficiamento de rejeitos de minério de ferro por meio de flotação em diferentes concentrações. *Revista Tecnológica* 29(1), 217-226
- Fuchida, S., Yokoyama, A., Fukuchi, R., Ishibashi, J., Kawagucci, S., Kawachi, M., Koshikawa, H., 2017. Leaching of metals and metalloids from hydrothermal ore particulates and their effects on marine phytoplankton. *ASC Omega* 2, 3175–3182
- Gabarrón, M., Faz, A., Martínez-Martínez, S., Zornoza, R., Acosta, J.A., 2017. Assessment of metals behavior in industrial soil using sequential extraction, multivariable analysis and a geostatistical approach. *Journal of Geochemical Exploration* 172, 174-183
- Garcia, M., 2004. Effects of pesticides on soil fauna: Development of ecotoxicology test methods for tropical regions. In: VLEK, P.L.G. et al. (Eds.). *Ecology and Development Series*, v. 19, Cuvillier Verlag Gottingen, pp. 282
- Huot, H., Simonnot, M.O., Morel, J., 2015. Pedogenetic trends in soils formed in technogenic parent materials. *Soil Science* 180, 182–192
- ISO (International Organization for Standardization). Soil quality — Effects of pollutants on earthworms (*Eisenia fetida*) — Part 2: Determination of effects on reproduction. ISO 11268–2. Geneva, Switzerland, 1998, pp. 21
- ISO (International Organization for Standardization). Soil Quality - Avoidance test for determining the quality of soils and effects of chemicals on behaviour – Part 1: Test with earthworms (*Eisenia fetida* and *Eisenia andrei*). ISO 17512-1. Geneva, Switzerland, 2008, pp. 25
- Jouquet, P., Chaudhary, E., Kumar, A., 2017. Sustainable use of termite activity in agroecosystems with reference to earthworms - a review. *Agronomy for Sustainable Development* 38, 3
- Kader, M., Lamb, D., Mahbub, K., Megaharaj, M., Naidu, R., 2016. Predicting plant uptake and toxicity of lead (Pb) in long-term contaminated soils from derived transfer functions. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 15460–15470
- Marta-Almeida, M., Mendes, R., Amorim, F.N., Cirano, M., Dias, J.M., 2016. Fundão dam collapse: oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. *Marine Pollution Bulletin* 112, 359-364
- Mendes, L., Felipe, M., 2019. Alterações geomorfológicas de fundo de vale na bacia do rio do Carmo (MG) decorrentes do rompimento da barragem de Fundão. *Caminhos da Geografia* 20, 237-252
- Mendes, L., Felipe, M., 2016. Geomorfologia do tecnógeno e suas relações com o rompimento da barragem de Fundão (Mariana, Minas Gerais). *Revista de Geografia* 6: 353-362
- Monte, C., Cesar, R., Rodrigues, A.P., Siqueira, D., Serrano, A., Abreu, L., Teixeira, M., Vezzzone, M., Polivanov, H., Castilhos, Z., Campos, T., Machado, G.G.M., Souza, W.F., Machado, W., 2018. Spatial variability and seasonal toxicity of dredged sediments from Guanabara Bay (Rio de Janeiro, Brazil): acute effects on earthworms. *Environmental Science and Pollution Research* 25, 34496-34509
- Natal-da-Luz, T., Tidona, S., Jesus, B., Morais, P. V., Sousa, J.P., 2009. The use of sewage sludge as soil amendment: The need for an ecotoxicological evaluation. *Journal of Soils and Sediments* 9, 246–260
- Niemeyer, J.C., Moreira-Santos, M., Ribeiro, R., Rutgers, M., Nogueira, M.A., Da Silva, E.M.; Sousa, J.P., 2015. Ecological risk assessment of a metal-contaminated area in the tropics. Tier II: Detailed Assessment. *Plos One* 10, 1-25

- Niemeyer, J.C., Chelinho, S., Sousa, J.P., 2017. Soil ecotoxicology in Latin America: Current research and perspectives. *Environmental Toxicology and Chemistry* 7, 1795-1810
- Niva, C., Niemeyer, J.C., Silva-Junior, F.M.R., Nunes, M.E.T., Sousa, D.L., Aragão, C.W.S., Sautte, K.D., Espindola, E.G., Sousa, J.P., Roembke, J., 2016. Soil ecotoxicology in Brazil is taking its course. *Environmental Science and Pollution Research* 23, 11363–11378
- Pereira, L.F., Cruz, G.B., Guimarães, R.M.F., 2019. Impactos do rompimento da barragem de rejeitos de Brumadinho, Brasil: uma análise baseada nas mudanças de cobertura da terra. *Journal of Environmental Analysis and Progress* 4, 122-129
- Porsani, J. L., Jesus, F. A. N., Stangari, M. C., 2019. GPR Survey on an iron mining area after the collapse of the tailings Dam I at the Córrego do Feijão Mine in Brumadinho-MG, Brazil. *Remote Sensing* 11, 860
- Schumm, S.A., 2005. *River Variability and Complexity*, 1 ed. Cambridge University Press, Cambridge
- Stevaux, J.C., Latrubesse, E.M., 2017. *Geomorfologia Fluvial*, 1 ed; Oficina dos Textos, São Paulo
- Shahid, S., Dumat, C., Niazi, N.K., Antunes, P., 2016. Cadmium bioavailability, uptake, toxicity and detoxification in soil-plant system. *Reviews of Environmental Contamination and Toxicology* 241, 73-137
- Summerfield, M.A., 1991. *Global Geomorphology: an introduction to the study of landforms*. New York: Longman Scientific & Technical, pp. 537
- Vezone, M., Cesar, R., Polivanov, H., Serrano, A., Siqueira, D., Abreu, L., Bianchi, M., Correia, M. E., Castilhos, Z., Campos, T., 2018. Ecotoxicological evaluation of dredged sediments from Rodrigo de Freitas Lagoon (Rio de Janeiro State, Brazil) using bioassays with earthworms and collembolans. *Environmental Earth Sciences* 77, 743
- Vezone, M., Cesar, R., Polivanov, H., Lourenço, R., Teixeira, M., Serrano, A., Castilhos, Z., Campos, T., 2020. Technogenic deposits formed from dredged sediments deposition: toxic effects on earthworms. *Journal of Soils and Sediments* 20, 3994–4006
- Vicq, R., Matschullat, J., Leite, M., Nalini-Junior, H., Mendonça, F., 2015. Iron Quadrangle stream sediments, Brazil: geochemical maps and reference values. *Environmental Earth Sciences* 74, 4407–4417
- Xu, Q., Zhao, L., Wang, Y., Xie, Q., Yin, D., Feng, X., Wang, D., 2018. Bioaccumulation characteristics of mercury in fish in the Three Gorges Reservoir, China. *Environmental Pollution* 243, 115–126
- Yin, H., Tan, N., Liu, C., Wang, J., Laing, X., Qu, M., Feng, X., Qiu, G., Tan, W., Liu, F., 2016. The associations of heavy metals with crystalline iron oxides in the polluted soils around the mining areas in Guangdong Province, China. *Chemosphere* 161, 181–189
- Wang, Y., Wu, Y., Cavanagh, J., Yiming, A., Wang, X., Gao, Wen., Matthew, C., Qiu, J., Li, Y., 2018. Toxicity of arsenite to earthworms and subsequent effects on soil properties. *Soil Biology and Biochemistry* 117, 36-47
- Wijayawardena, M., Megharaj, M., Naidu, R., 2017. Bioaccumulation and toxicity of lead, influenced by edaphic factors: using earthworms to study the effect of Pb on ecological health. *Journal of Soils and Sediments* 17, 1064–1072.