

4º RELATÓRIO DE MONITORAMENTO DOS DANOS CAUSADOS PELO ROMPIMENTO SOBRE FATORES BIÓTICOS E ABIÓTICOS DA REGIÃO 3

MARÇO

2022

Ficha Técnica

GERÊNCIA SOCIOAMBIENTAL

Irla de Paula Stopa Rodrigues

Gerente Socioambiental

Bióloga e Doutoranda em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG)

Adriana Assunção de Carvalho

Especialista Sênior Socioambiental

Bióloga e Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG)

Dayane Lopes Pinto

Especialista Pleno Socioambiental

Engenheira Florestal e Mestre em Ciência Florestal (UFV)

Lucas Grossi Bastos

Especialista Pleno Socioambiental

Geógrafo e Mestre em Geografia - Organização do Espaço (UFMG)

Marcelo Álvares Tenenwurcel

Especialista Pleno Socioambiental

Cientista Socioambiental e Mestre em Modelagem e Análise de Sistemas Ambientais (UFMG)

Ramon Neto Rodrigues

Especialista Pleno Socioambiental

Engenheiro Ambiental e Mestre em Ecologia, Conservação e Manejo da Vida Silvestre (UFMG)

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	4
2. PERCURSO METODOLÓGICO	5
3. RESULTADOS.....	6
3.1 REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO.....	6
3.2 SOLOS.....	9
3.2.1 Caracterização dos solos atingidos da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão (Barragem B-I e mancha de rejeitos).....	10
3.2.2 Caracterização dos solos atingidos da bacia hidrográfica do rio Paraopeba	12
3.3 ESPÉCIES VEGETAIS E PRODUTOS DERIVADOS.....	16
3.4 FAUNA SILVESTRE TERRESTRE, ANIMAIS DOMÉSTICOS E PRODUTOS DERIVADOS	16
3.5 MATERIAL PARTICULADO E POEIRA DOMICILIAR	19
3.6 COMUNIDADES AQUÁTICAS	21
3.6.1 Comunidade fitoplânctonica.....	22
3.6.2 Comunidade zooplânctonica.....	22
3.6.3 Comunidade zoobentônica	23
3.6.4 Macrófitas aquáticas.....	23
3.6.5 Análise de persistência das comunidades aquáticas	23
3.6.6 Monitoramento de carcaças de peixes no rio Paraopeba	25
3.6.7 Ictioplâncton	27
4. CONSIDERAÇÕES FINAIS	30
5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	31

1. INTRODUÇÃO

No campo científico, estudos que buscam compreender algum fenômeno ou situação desconhecida, e/ou realizar uma nova leitura, precisam, quase obrigatoriamente, apresentar uma primeira etapa exploratória. Pesquisas exploratórias são fundamentais para a definição exata do objeto de estudo e a obtenção de dados preliminares que ajudam a identificar lacunas de informações, propiciando um olhar crítico sobre o fenômeno e a proposição de hipóteses (CHOY, 2014). Além disso, são excelentes fontes de informação para fomentar proposições novas, visto que podem trazer um olhar mais amplo sobre o objeto de estudo, reduzindo gastos com informações já coletadas e maximizando o poder preditivo (BOSLAUGH, 2007).

Visando realizar uma leitura preliminar da situação dos fatores bióticos e abióticos da Região 3 após o rompimento da Barragem B-I da Mina Córrego do Feijão, a Assessoria Técnica Independente – ATI Paraopeba/NACAB produziu um diagnóstico emergencial completo sobre os danos aos fatores ambientais dessa região. Este diagnóstico apresenta os principais danos já identificados aos recursos naturais da região e possíveis cenários de danos com bases em contextos de rompimentos semelhantes. Porém, devido à dinâmica temporal de estudos ambientais, é importante acompanhar a publicação de novos dados produzidos por órgãos públicos e instituições de pesquisa, de modo a atualizar as informações preliminares levantadas.

Dessa forma, este relatório tem por objetivo apresentar os novos dados levantados pela ATI Paraopeba entre outubro de 2021 e março de 2022, incluindo dados secundários relativos ao solo, material particulado, animais silvestres, espécies vegetais e biota aquática, uma breve discussão sobre as novas evidências de danos ao meio ambiente e suas implicações na qualidade de vida das pessoas atingidas. Sendo assim, a concepção deste relatório permeia não somente a garantia da participação informada dos atingidos no processo, mas também a consolidação de uma futura matriz de danos e medidas de reparação integral para a Região 3.

2. PERCURSO METODOLÓGICO

Para construção do objetivo proposto, dividiu-se esse produto em três etapas. A primeira etapa foi composta pelo levantamento contínuo de dados secundários produzidos por outras instituições para diferentes fatores ambientais, considerando, entre outros fatores, a qualidade amostral adotada e a qualidade dos dados obtidos. Nesta etapa de monitoramento, foram pesquisados dados provenientes das instituições governamentais, instituições públicas e privadas, publicações científicas e documentos técnicos institucionais disponíveis, assim como feito no ***Diagnóstico Emergencial: Integração de Pesquisas sobre Meio Físico e Biótico e nos 1º, 2º e 3º Relatórios Trimestrais, referentes aos meses de janeiro a março de 2021, abril e junho de 2021 e julho e setembro de 2021***. Os procedimentos de coleta de dados foram os mesmos descritos para etapa emergencial, alterando apenas a temporalidade das informações.

Para levantamento dos dados secundários, foi realizada uma busca nos principais mecanismos de busca científica existentes e portais governamentais. Os mecanismos de busca são: (i) O Portal de Periódicos da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - CAPES; (ii) DirectScience; (iii) Google Acadêmico; (iv) WebOfScience Como se trata de uma pesquisa bibliográfica sistemática, optou-se por elencar maior esforço na busca e leitura dos estudos científicos. De modo a delimitar o tema de pesquisa, foram elencadas as seguintes combinações de palavras-chaves: “rio Paraopeba”, “Brumadinho”, “danos ambientais”, “barragem”, “peixes rio Paraopeba”. As palavras-chaves foram buscadas tanto em português quanto em inglês.

Foram considerados os seguintes critérios de inclusão: (i) artigos publicados após 2020; (ii) artigos cuja metodologia se adequa ao exigido pela legislação vigente e com estrutura condizente ao objetivo proposto, com resultados e fontes de informações confiáveis; (iii) revista com alto valor de impacto e/ou com nível na Qualis Capes superior a B1.

Para este 4º Relatório, foram apresentados ainda os dados do Capítulo II, Volume II (Meio Físico) e Volume III (Meio Biótico) do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba, o qual está sendo desenvolvido pela empresa ARCADIS, contratada pela Vale S.A. Os dados correspondem aos diversos estudos realizados pós-rompimento da barragem.

3. RESULTADOS

3.1 REJEITOS DE MINÉRIO DE FERRO

Em março de 2022, um novo estudo foi publicado por Siqueira *et al.* (2022) sobre as características físicas, químicas e mineralógicas do rejeito proveniente da mina do córrego do Feijão em Brumadinho. No total, os pesquisadores responsáveis pelo estudo coletaram amostras de rejeito em três áreas diferentes atingidas pelo rompimento. Foram nove amostras coletadas na Zona Quente, três amostras próximas ao Parque da Cachoeira e três amostras em Alberto Flores, próximo ao rio Paraopeba. As amostras foram coletadas dez dias após o rompimento (06 de fevereiro de 2019). Uma amostra foi coletada fora da área impactada para ser utilizada como referência para comparações futuras.

Os dados encontrados apontaram que as amostras são predominantemente arenosas e siltosas, diferente do que já foi encontrado em outros estudos que caracterizaram o rejeito de minério de ferro da mina do Córrego do Feijão (NACAB, 2020; NACAB, 2021). Mais da metade das amostras ultrapassaram o limite para solos com alto teor de hematita. Os valores de pH foram predominantemente ácidos e as concentrações de carbono orgânico total foram inferiores às determinadas para a amostra de referência em área não impactada.

Considerando os dados referente à concentração de metais, foi possível observar que se tratando de mobilidade geoquímica e biodisponibilidade, o Ferro, o Cobalto, Zinco, Chumbo e Manganês, foram os metais que apresentaram maior biodisponibilidade. Comparando com a legislação, Cobalto e Níquel ultrapassaram o limite de prevenção (para risco ecológico; CONAMA 420/2009) e o Nível I (baixa probabilidade de efeitos tóxicos em à biota, CONAMA 454/2012) para seis e sete amostras, respectivamente. Também foi encontrado, em uma amostra, concentrações de Níquel superiores ao Nível II da Resolução CONAMA 454/2012, para sedimentos, indicando alta probabilidade de efeitos tóxicos na biota aquática. Valores de Níquel acima dos limites de qualidade previstos em legislações podem impactar diretamente a saúde das pessoas atingidas que estão tendo contato permanente com esse material, seja pelo contato direto com o rejeito, com o material sedimentar misturado com o rejeito ou com a poeira proveniente dessas áreas. Resultados de Níquel e Cobalto acima do limite previsto na legislação também foram encontrados nas áreas atingidas pelas cheias do rio Paraopeba em 2020 (NACAB, 2021), o que indica uma alta probabilidade de correlação entre os dois eventos.

Outro aspecto importante a ser destacado se refere às concentrações de Cádmiio e Arsênio que ficaram abaixo dos limites de detecção nesta investigação. No entanto, Vergílio *et al.* (2020) e Thompson *et al.* (2020), ao analisar amostras de água fluvial e sedimentos do

rio Paraopeba (impactado pelo mesmo desastre), indicaram alta concentração desses elementos. Desta forma, entende-se que investigações posteriores deverão ser realizadas para entender o motivo desses elementos não terem sido detectados.

Embora os teores de metais tenham ultrapassado os limites estabelecidos pela legislação brasileira, as concentrações percentuais são muito inferiores às extrações totais, o que indica que uma grande porcentagem de conteúdos metálicos é pouco móvel geoquimicamente e apresentam baixa biodisponibilidade.

Em fevereiro de 2022, a equipe da ATI Paraopeba teve acesso ao Capítulo 2, Volume 2, do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba (PRSA) executado pela empresa Arcadis, no qual estão dispostos os estudos de caracterização socioambiental pós-rompimento, que incluem os dados referente às características do rejeito. Este capítulo estava com acesso impossibilitado desde a publicação do PRSA em maio de 2021, quando foi verificado que os arquivos estavam corrompidos.

Segundo os dados provenientes desse plano, estima-se que a barragem B1 da Mina Córrego do Feijão tinha 11,77 milhões de metros cúbicos de rejeito. Desse total, segundo estimativas do PRSA, 2,75 milhões de metros cúbicos chegou ao rio Paraopeba, sendo carregado para as áreas a jusante do rompimento. Para caracterização geoquímica do rejeito, foram utilizados dois estudos acadêmicos realizados antes do rompimento e alguns dados coletados pela empresa Vale S.A. no ano de 2017. Os dois estudos acadêmicos utilizados já foram apresentados pelo NACAB, no “Diagnóstico Emergencial Integrado” (NACAB, 2020). Ambos os estudos indicam que as partículas provenientes da Barragem B1 são partículas finas (100 a 10 μm), ultrafinas (10 a 1 μm) e coloidais (< 1 μm) de partículas não esféricas de minerais de ferro: hematita, magnetita, goethita e, minerais de ganga: quartzo, gibbissita, caulinita e muscovita. Esses valores são corroborados pelos dados da empresa Vale S.A. que indicam que 63% das partículas são menores que 0,045 μm .

Considerando os rejeitos na sua característica originária, as médias de ferro e sílica somaram 89,6% da massa amostral do material. As concentrações média e mediana de óxidos de alumínio correspondem a 4,3% e 2,5%, respectivamente, da massa amostral. Para os rejeitos misturados ao solo natural, os teores médio e mediano de Ferro foi de 70,8% e 74,9%, respectivamente, e de sílica a média foi de 17,9% e mediana 16,4% da massa amostral. Tanto para o rejeito original quanto para o rejeito misturado, foram encontradas correlações entre o teor de Manganês (Mn) e a maioria dos outros metais, ou seja, quanto maior o teor de Mn, maior o teor desses outros metais, indicando potencial de associação mineral entre Mn e os elementos traço das amostras.

Cromo e níquel apresentaram concentrações mais elevadas para as amostras de rejeito do que para o rejeito misturado ao solo, indicando que esses metais são parte e provenientes do rompimento. O rejeito misturado ao solo é representado por menores teores

de Ferro, maiores de Sílica e Alumínio, indicando contribuição de solos, sedimentos e outros materiais misturados ao rejeito. Os parâmetros Cobre, Bário, Cobalto, Arsênio e Níquel, tanto nas amostras de rejeito misturado com solo quanto nas amostras de rejeito com características originais apresentaram maiores extrapolações aos valores de referência de qualidade. Manganês, ferro e alumínio foram mais solubilizados nas amostras de solo do que de rejeito. Como Mn apresentou concentrações mais elevadas nos extratos avaliados, os rejeitos podem ser fonte potencial para este elemento. As amostras de solo exibiram concentrações de manganês menores em média às amostras de rejeitos, que apresentaram extrapolação aos limites previstos para as amostras solubilizadas.

Com relação aos índices de turbidez, os resultados provenientes do Plano de Recuperação Socioambiental apontam uma relação entre goethita e caulinita presentes no rejeito e sua capacidade de não sedimentar no fundo do rio, percorrendo grandes distâncias quando em suspensão no rio Paraopeba. Tais dados ajudam a justificar as baixas taxas de sedimentação reportadas por CPRM (2020) e o relato de suspensão desse material após as cheias do rio Paraopeba em 2020 (ARCADIS, et al., 2021, NACAB et al., 2020) e 2022 (IGAM, 2022).

Como apontado pela CPRM (2020), as partículas sólidas do rejeito são transportadas ao longo do rio Paraopeba de acordo com o aumento de energia, sendo que as partículas finas são capazes de percorrer maiores distâncias de dispersão e as mais grossas se depositam no fundo do rio. Devido ao maior tempo de permanência em suspensão de partículas menores, com maior capacidade de percorrer distâncias maiores do que partículas mais grosseiras, espera-se o aumento principalmente de Ferro e Manganês carregados em suspensão ao longo do rio Paraopeba.

3.2 SOLOS

Não foram publicados artigos que investigaram a qualidade do solo nos municípios da Região 3 e não houve atualizações em relação a dados secundários de monitoramento ambiental de solos provenientes de órgãos públicos. A equipe da ATI Paraopeba teve acesso ao Capítulo 2, Volume 2, do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba executado pela empresa Arcadis, no qual estão dispostos os estudos de caracterização socioambiental pós-rompimento e avaliação de impactos que incluem dados referentes a solos.

Neste capítulo do PRSA, em um tópico voltado a solos, foram apresentadas as caracterizações dos solos após o rompimento da barragem, iniciando pelos solos da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão em Brumadinho, considerados diretamente afetados pelo rejeito. Para estes foram apresentados os dados das análises de solo realizadas pela empresa Chammas Engenharia (2019) na área da mancha de espalhamento do rejeito. Foram apresentados também os resultados das análises do solo que foi utilizado na recuperação da área do Marco Zero, derivadas do estudo de monitoramento realizado pela Universidade Federal de Viçosa - UFV (2020). Para o presente levantamento dos danos, serão adotados apenas os resultados do estudo da Chammas Engenharia e da UFLA, uma vez que o da UFV não caracteriza o solo afetado pelo rejeito. Ambos os estudos ainda não foram disponibilizados na íntegra para as Assessorias Técnicas Independentes, sendo a presente discussão baseada nos dados e informações descritos pela empresa Arcadis no PRSA.

No mesmo tópico de solos foi apresentada a caracterização dos solos dos demais municípios atingidos da bacia do rio Paraopeba, os quais a Arcadis considera não terem sido diretamente afetados pelo rejeito. Para esta última caracterização, a empresa utilizou os dados do estudo preliminar da Universidade Federal de Lavras - UFLA (2020), realizado por meio de uma parceria técnico-científica com a Vale S.A., que prevê quatro expedições a campo, durante dois anos, nas estações seca e chuvosa, a fim de coletar e analisar amostras de solos das áreas atingidas pelas inundações. O relatório preliminar de pesquisa adotado pela Arcadis reúne os dados da primeira expedição realizada durante o Período Chuvoso de 2019/2020. A ATI Paraopeba ainda não havia tido acesso aos dados deste relatório, tendo acessado apenas os dados do Relatório de Pesquisa da segunda expedição, com os resultados das análises derivadas da coleta do Período Seco de 2020, que foram descritos e discutidos no 3º Relatório Trimestral. Desta forma serão utilizados os dados dos dois relatórios para as discussões do tópico de caracterização dos solos da bacia do rio Paraopeba. Até o presente momento, são desconhecidos outros relatórios de pesquisa deste estudo tornados públicos pela UFLA.

O Relatório de Pesquisa da segunda expedição de campo do estudo, foi finalizado em abril de 2021 e o Capítulo II do PRSA foi tornado público em maio de 2021. Não se sabe o motivo dos dados do relatório não terem sido utilizados na caracterização do Capítulo.

3.2.1 Caracterização dos solos atingidos da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão (Barragem B-I e mancha de rejeitos)

A caracterização dos solos da sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão foi realizada a partir dos resultados de sondagens na área da mancha de rejeitos e no local onde se encontrava a antiga barragem B-I. As sondagens foram realizadas entre março de 2019 e abril de 2020 pela empresa Chammas Engenharia. A maior parte dos pontos de amostragem estão localizados dentro da mancha que, segundo descrição da Arcadis, ocupa uma área total de 294,05 ha e ocorrem as classes de solo intituladas de cambissolos e latossolos. A equipe da ATI Paraopeba não teve acesso, até o presente momento, à integra dos resultados destas sondagens, uma vez que não foram disponibilizados como anexo do capítulo. Sendo assim, a descrição e discussão a seguir estão baseadas nos dados e informações das análises que foram fornecidas pela Arcadis no texto do documento.

O objetivo das sondagens realizadas foi fazer o reconhecimento geológico-geotécnico das camadas de rejeito, solo e subjacentes (porção transicional entre o solo e a rocha ou rocha sã) a fim de utilizar os resultados para orientar a execução de obras emergenciais de engenharia. Além da área da antiga barragem B-I, as sondagens foram realizadas nas obras da ponte metálica, barreira hidráulica 0 (BH-0), barreira hidráulica 1 (BH-1), dique 2 e do duto da Transpetro. Foram realizados 31 furos de sondagem de percussão e 26 de sondagem mista nos diferentes locais, e feitas análises de parâmetros como permeabilidade do solo, granulometria, plasticidade, cor e origem para descrição do material coletado.

Entre os principais resultados descritos no resumo feito pela Arcadis, estão a constatação da presença de uma camada espessa de rejeito sobre os solos remanescentes das áreas analisadas, divididos em solos residuais maduros e jovens, inclusive sobre o saprólito. Nas áreas mais próximas à antiga barragem B-I, os solos maduros parecem ter sido misturados ou, até mesmo, erodidos em grandes quantidades e profundidades, devido a força com que a pluma de rejeitos se deslocou sobre a área. Este comportamento não foi detectado nas áreas mais distantes da barragem, onde ainda foi verificada a manutenção da estrutura do perfil do solo abaixo da camada de rejeito.

A espessura da camada de rejeito variou entre quatro e 13 metros, encontrados na área do duto da Transpetro, local mais distante da barragem B-I, e na região da ponte metálica, local mais próximo, respectivamente. Mesmo na área mais distante, alguns furos chegaram a apresentar uma camada com espessura variando entre cinco e seis metros.

A caracterização granulométrica do rejeito apontou que o material coletado na área da barragem B-I apresentou maior quantidade de areia com granulação fina a grossa. De acordo com a descrição dos dados, a concentração de silte no rejeito parece ir aumentando à medida que se distancia do ponto do rompimento, variando de arenoso a silte arenoso, silte argilo-arenoso, silte arenoso, entre outras, e nas áreas mais distantes da barragem B-I, silte arenoso, silte argiloso, areia siltosa, argila siltosa. A cor variou de marrom escura acinzentada, passando por tons de cinza escuro, a marrom escuro nas partes mais distantes do rompimento.

As características granulométricas da primeira camada do solo sotoposto ao rejeito também variaram quanto mais distantes da barragem B-I. O solo da barragem B-I, por exemplo, apresentou composição argilo-silto-arenosa, e nos demais pontos onde foi realizada a sondagem, o material foi, em sua maioria, argilo-siltoso ou silto-argiloso. Como explicado no tópico anterior, que atualiza os dados de caracterização do rejeito da barragem, a movimentação e transporte de partículas sólidas menores como o silte e a argila tende a ser muito maior quando comparada à de partículas maiores como a areia (CPRM, 2020). Mesmo não sendo discutidos os resultados no documento elaborado pela Arcadis, é possível inferir a partir do observado que **o rejeito transportado a longas distâncias tende a carrear e depositar mais material silto-argiloso sob os solos atingidos**. Partículas pequenas também tendem a ser mais facilmente transportadas pelo perfil do solo, com ajuda da água que escoar verticalmente (JAGERCIKOVA et al., 2017). O fato da maioria dos solos em contato com o rejeito ter apresentado maior ou significativa proporção de silte em sua composição, possibilita inferir ainda que **os solos sotopostos ao rejeito podem ter sofrido incremento de silte, em função do transporte vertical destas partículas**.

Os resultados das análises de permeabilidade apresentados pela Arcadis apontaram que nenhum dos pontos analisados apresentou solo com alta permeabilidade, variando entre média e baixa. Esta condição indica que **grande parte dos solos soterrados pelo rejeito e coletados na sondagem apresentam um quadro favorável à compactação ou já se encontram compactados**. A baixa permeabilidade pode estar atrelada às características granulométricas, uma vez que grande parte dos solos apresentaram altos teores de silte, a exemplo dos solos compostos por siltes argilo-arenosos e argilas siltosas, em que foram detectados os menores coeficientes de permeabilidade.

O incremento de silte na camada superficial de solos afetados pelo rejeito foi detectado no estudo intitulado “Solos da Região 3: Caracterização física e química”, realizado pela ATI Paraopeba (2021). Ao analisar o conjunto total dos dados, foi verificado que a mediana dos teores de silte foi maior que a das demais frações argila e areia, havendo ainda diferença significativa entre os teores de silte entre solos afetados e os solos não afetados pelo rejeito, sendo o silte foi a fração predominante no solo afetado em todas as seis Unidades

de Paisagem avaliadas. Estes resultados corroboram com a hipótese levantada anteriormente, de que o rejeito à medida que entra em contato com os solos aluviais, pode promover o incremento dos teores naturais de silte, promovendo alterações físicas e na estrutura do solo, muitas vezes irreversíveis. A diminuição da permeabilidade do solo devido à obstrução dos poros do solo pela presença de silte dificulta e muitas vezes impede a infiltração da água, gerando como consequência problemas como o aumento do escoamento superficial e processos erosivos, diminuição da fertilidade natural do solo, assoreamento de cursos d'água, entre outros.

Não foram apresentados dados para caracterização química, biológica e/ou física dos solos da bacia do ribeirão Ferro-Carvão. A Arcadis S/A chegou a elaborar o “Estudo de baseline e avaliação da qualidade do solo superficial nas regiões da bacia rio Paraopeba e do entorno da represa de Três Marias-MG”, em maio de 2019, após o rompimento da barragem. Neste, foi realizada a amostragem de solos superficiais na sub-bacia do ribeirão Ferro-Carvão e ao longo da bacia do rio Paraopeba até o entorno da Represa Três Marias, entre 32 a 64 dias após o rompimento. Nenhuma amostra foi coletada na mancha coberta pelo rejeito. Segundo a empresa Arcadis, o tempo entre o rompimento e a coleta das amostras não é considerado suficiente para promover modificações nos parâmetros de interesse. Uma vez que o material não foi depositado diretamente no solo das margens do rio Paraopeba após o rompimento, a empresa julga que os resultados não retratam modificações derivadas do rejeito, sendo necessário um tempo maior para avaliar a manifestação de alterações. Desta forma a empresa decidiu utilizar o estudo para caracterização dos solos da sub-bacia do Ferro-Carvão em uma condição de não atingimento. De acordo com a Arcadis, até o momento da construção do Capítulo II do PRSA, não havia dados que caracterizassem estes parâmetros para o solo atingido pelo rejeito na bacia do ribeirão Ferro-Carvão.

3.2.2 Caracterização dos solos atingidos da bacia hidrográfica do rio Paraopeba

O objetivo central do estudo desenvolvido pela UFLA, em parceria com a Vale S.A., foi fornecer informações para subsidiar estudos que visem avaliar os riscos que as áreas inundadas pelo rio Paraopeba podem oferecer à saúde da população. Como informado anteriormente, as coletas de solo da primeira expedição foram realizadas no período chuvoso de 2019/2020 e a segunda expedição no período seco de 2020. Em ambos os estudos foram realizadas análises de caracterização textural, composição química, atividade microbiológica e avaliação de amostras de tecido vegetal nas áreas no entorno do Rio Paraopeba.

Na primeira expedição foram avaliadas 11 localidades, a partir da coleta de 66 amostras de solo entre os dias 18 e 20 de fevereiro de 2020. Deste total, 33 amostras foram

coletadas em áreas inundadas e 33 em áreas de referência (áreas não inundadas na mesma propriedade e com os mesmos tipos de solos e vegetação dos pontos inundados). Ainda foram coletadas 86 amostras de tecido vegetal, considerando as áreas inundadas e referências. Destes 11 pontos amostrados, 6 estão localizados em municípios da Região 3, nos municípios de Pará de Minas (1), São José da Varginha (1), Esmeraldas (2), Pequi (1) e Papagaios (1).

Já na segunda expedição o número de localidades amostradas foi maior, uma vez que foram consideradas uma série de variáveis ambientais. Ao total foram coletadas amostras de solos de 24 propriedades, totalizando 144 amostras de solo, 72 em áreas inundadas e 72 em áreas de referência, além de 140 amostras de tecido vegetal. Dos 24 pontos, 12 estão localizados em municípios da Região 3. Segundo descrito no relatório, os pontos de amostragem foram selecionados considerando a distribuição espacial ao longo da calha, delimitação das áreas inundadas, demandas pontuais, áreas próximas as zonas onde há coleta de sedimento e rejeitos, e áreas com mesma classe de solo e cultura, tanto nas áreas inundadas como nas áreas de referência (UFLA, 2021).

Os resultados das análises dos solos coletados no período chuvoso e no período seco indicaram, no que compete à parte física dos solos amostrados, que as alterações nas classes texturais foi pequena. Ainda assim foi detectado o **incremento da fração silte nas amostras de solo das áreas inundadas**, quando comparadas às não inundadas. Os teores de silte foram maiores nas áreas inundadas de 90,9% das localidades amostradas na expedição 1, e nas áreas inundadas de 87,5% das localidades amostradas na expedição 2. O estudo do solo realizado pela ATI Paraopeba, já mencionado anteriormente neste tópico, também detectou este padrão de incremento de silte, de modo que foi verificada diferença estatística significativa para os teores de silte entre pontos afetados e não afetados pelo rejeito em todas as unidades de paisagem, com medianas de silte maiores nos pontos afetados pela deposição de rejeito.

As análises de granulometria no contexto dos solos afetados pelas inundações são extremamente importantes na análise de possíveis danos aos atributos físicos do solo gerados pelo contato com o rejeito trazido pelas enchentes. O rejeito apresenta em sua composição partículas finas de silte e argila com alto potencial de deslocamento, podendo ser revolvidas e depositadas no solo a cada ciclo de inundações, alterando a condição natural destas áreas (NACAB, 2020). Em nenhum dos dois relatórios preliminares foi discutida a possível relação deste incremento com a composição do rejeito.

Os resultados das análises de metais evidenciaram que as concentrações de Ferro foram mais elevadas na maior parte das áreas inundadas quando comparadas às não inundadas. Mesmo com concentrações superiores, houve diferença significativa em apenas quatro pontos para Ferro e em três pontos para Manganês, entre as 24 localidades da

expedição 2. A UFLA afirma não ser possível afirmar a relação dos incrementos detectados nas áreas inundadas com o rejeito da barragem B-I, mesmo sendo estes os elementos predominantes na composição química do rejeito. Segundo a mesma, processos pedogenéticos nos solos da bacia podem causar a concentração de óxidos de ferro e alumínio, entre outros metais.

Para os elementos potencialmente tóxicos analisados na expedição 1 e 2, os metais Arsênio, Chumbo, Cobalto, Cromo, Cádmio e Níquel apresentaram diferenças estatísticas significativas entre áreas inundadas e de referência para alguns pontos. Nos resultados da expedição 1, o elemento Arsênio foi significativamente diferente e com maiores concentrações em locais inundados em oito pontos (sendo 3 no território da Região 3), o Chumbo em seis pontos (sendo 3 na Região 3), o Cobalto em seis pontos (sendo 3 na região 3), o Cromo em cinco pontos (sendo 3 na Região 3), Cádmio em três pontos (sendo 1 na Região 3). Já os resultados da expedição 2 foi detectado Arsênio em dez áreas inundadas significativamente diferentes às suas respectivas áreas de referência não inundadas, dessas dez áreas avaliadas, sete se encontram na região 3. Para Chumbo, foram identificadas diferenças significativas em quatro áreas distintas, sendo três delas dentro da Região 3. Para Cobalto, foram identificadas diferenças significativas em sete pontos, sendo seis deles dentro da Região 3 (Tabela 1).

Diante dos resultados obtidos em ambas as expedições, é importante ressaltar que houve problemas metodológicos no estudo realizado pela UFLA. O primeiro, e talvez mais grave, refere-se ao desenho amostral proposto pela equipe técnica responsável pelo estudo. Neste estudo, foram amostradas apenas 24 áreas de interesse ao longo de toda a calha do rio Paraopeba atingida. Esse número é extremamente baixo se considerado o comprimento total da calha atingida pelas cheias do rio Paraopeba em 2020 e as variações geológicas e pedológicas existentes ao longo dessas áreas. A título de exemplo, apenas dentro da Região 3 existem seis unidades da paisagem, definidas a partir das características pedológicas e morfológicas da região. Desta forma, entende-se que a amostragem de apenas 11 locais dentro da Região 3 não garante um número mínimo de amostragem por unidade da paisagem, minimizando a efetividade do estudo, visto que essas características naturais da paisagem são variáveis de extrema importância na avaliação de elementos potencialmente tóxicos, como mencionado pelos próprios técnicos da UFLA. Enquanto a UFLA avaliou 11 pontos de amostragem dentro da Região 3, a equipe da ATI Paraopeba/NACAB avaliou 169 pontos de amostragem apenas nessa região, considerando pontos em áreas impactadas e pontos em área controle.

Tabela 1. Concentrações de elementos químicos potencialmente tóxicos nas amostras de solos coletadas ao longo da calha do rio Paraopeba, em fevereiro de 2020, pela Universidade Federal de Lavras.

Cidade	Ponto	Área	Elementos Potencialmente Tóxicos - EPT (mg/kg)					
			Arsênio	Chumbo	Cobalto	Cromo	Cádmio	Níquel
Brumadinho	P0	Referência	3,58	16,92	3,58	21,25	<0,5	6,25
		Inundado	7,92	23,83	8,42	24,25	<0,5	8,33
Brumadinho	P20	Referência	5,08	74,25	15,50	30,25	2,67	13,83
		Inundado	15,83	40,00	13,17	48,75	1,00	19,08
Mário Campos	P79	Referência	6,67	23,67	7,75	30,75	<0,5	13,50
		Inundado	11,75	51,83	16,08	39,17	2,50	26,67
Betim	P2149	Referência	4,67	27,42	3,50	36,25	0,50	10,08
		Inundado	12,92	38,50	9,33	50,50	0,75	16,83
Pará de Minas	PH	Referência	<1	25,25	<1	8,00	<0,5	2,00
		Inundado	3,08	38,50	3,25	25,08	<0,5	6,50
São José da Varginha	PHR3	Referência	1,50	43,75	8,08	20,83	1,33	7,92
		Inundado	8,50	34,08	9,08	21,58	0,67	6,25
Esmeraldas	PF	Referência	<1	83,83	11,75	9,08	2,83	11,00
		Inundado	7,50	52,13	12,38	44,33	2,63	18,83
Esmeraldas	PE	Referência	<1	82,67	13,83	15,75	5,25	17,33
		Inundado	36,50	114,75	28,08	86,67	6,67	42,17
Pompéu	P136 (pastagem)	Referência	5,67	119,25	25,42	45,42	7,33	32,50
		Inundado	6,42	92,58	19,92	42,67	6,17	28,67
Pompéu	P136 (milho)	Referência	6,25	126,17	28,08	49,58	8,08	36,33
		Inundado	7,25	133,00	26,08	58,17	8,54	37,54
Pequi	P131	Referência	1,00	162,50	32,42	27,83	12,42	39,83
		Inundado	11,58	154,92	35,75	69,83	11,58	49,58
Papagaios	P334	Referência	4,00	163,25	33,17	70,33	13,25	42,83
		Inundado	4,58	159,08	30,83	69,75	12,08	41,33

Valores em VERDE = concentração superior ao Valor de Referência de Qualidade (VRQ), valores em LARANJA = concentração superior ao Valor de Prevenção (VP), valores em VERMELHO = concentração superior ao Valor de Investigação Agrícola (VIA), valores em VERMELHO ESCURO = concentração superior ao Valor de Investigação Residencial (VIR), de acordo com a Deliberação Normativa COPAM n.º 166/2011. Adaptado de Arcadis (2021).

3.3 ESPÉCIES VEGETAIS E PRODUTOS DERIVADOS

Em relação às espécies vegetais, não foram encontrados estudos ou publicações que avaliem os efeitos do rompimento nas espécies vegetais e ou produtos derivados na bacia do rio Paraopeba. Porém, como a ATI Paraopeba/NACAB teve acesso ao Capítulo II do Plano de Recuperação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba, optou-se por utilizar as informações desse plano para esse relatório.

Segundo os dados desse plano, a classe de floresta semidecidual foi a segunda classe mais atingida pelas cheias do rio Paraopeba de 2020 (15,5%). Devido a isso, foram feitos estudos para verificar se o rejeito pode ter contribuído para essa contaminação e se as plantas acumularam elementos potencialmente tóxicos oriundos do rejeito. Foram avaliadas espécies vegetais utilizadas na produção de forragem para alimentação do gado, como braquiária (*Brachiaria brizantha*), tifton (*Cynodon spp*), colômbia (*Panicum maximum*), napier (*Pennisetum purpureum*) e milho (*Zea mays*). Apesar de preliminares, os resultados indicam que não houve influência do alagamento nos parâmetros biológicos analisados – carbono da biomassa microbiana, respiração basal e enzima β -glucosidase –, com a ressalva de que é necessário acompanhamento para avaliar a mudança desses indicadores e da funcionalidade do solo.

Como conclusão desse estudo, os autores afirmam que os parâmetros físicos e microbiológicos apresentam pouca diferença em função do alagamento e que os parâmetros químicos sofreram alterações em função do alagamento em alguns locais, indicando a possibilidade de contaminação por rejeito de mineração. De qualquer forma, também foi concluído que os fatores de transferência dos elementos potencialmente tóxicos avaliados não indicam alteração que tenham como causas evidentes o transporte e a deposição de rejeitos em função do alagamento decorrente das chuvas extremas de 2019/2020 (UFLA, 2020 apud ARCADIS, 2020). Esses resultados são diferentes ao encontrado por outros estudos em mesma condição (vide NACAB, 2020; NACAB, 2021). A diferença desses resultados pode estar relacionada ao número de amostras coletadas pela UFLA e, portanto, a baixa chance de detecção de anomalias em campo.

3.4 FAUNA SILVESTRE TERRESTRE, ANIMAIS DOMÉSTICOS E PRODUTOS DERIVADOS

O estudo realizado por Siqueira *et al.* (2022), apresentado anteriormente nesse relatório para caracterização do rejeito de mineração, também avaliou os efeitos desse rejeito em organismos terrestres. Nesse estudo foram utilizadas duas espécies de organismos, que normalmente servem como indicadores de anomalias ligadas à contaminação ambiental:

Eisenia andrei (minhoca californiana) e a *Folsomia candida* (colêmbolos, invertebrados do solo). Para minhocas, foram realizados bioensaios agudos, com o tempo de exposição de 14 horas. A capacidade de retenção de água foi ajustada para 50% em todos os testes, para que o efeito da saturação por água não influencie na taxa de sobrevivência ou perda de biomassa da espécie. Para os colêmbolos, diferente do feito para as minhocas, optou-se por aplicar o bioensaio crônico, cuja o tempo de exposição é de 28 dias. Em ambos os casos, foram utilizados 10 organismos vivos, com tamanho e peso padronizados.

Para as minhocas, foram identificadas mortalidades significativas em três amostras de rejeito de mineração. Para uma das amostras na zona quente, todos os indivíduos morreram. Para a amostra na qual o níquel atingiu valores superiores ao nível 2 da legislação (cujo atingimento implica a alta probabilidade de efeitos tóxicos à biota aquática), 60 % dos indivíduos vieram a óbito. Em relação aos colêmbolos, todas as amostras de rejeito causaram uma redução significativa dos níveis de reprodução, que foram extremamente mais baixos e pelo menos quatro vezes menores se comparados à amostra de referência. Foi identificada uma mortalidade significativa em sete amostras se comparadas ao solo de referência.

Segundo os autores da pesquisa, devido ao aumento da densidade do solo, é provável que as minhocas tiveram sua mobilidade potencial afetada e, portanto, tiveram que gastar mais energia para se mover no solo. Tal suposição pode explicar parcialmente a redução da biomassa observada nos testes. Além disso, segundo os autores, a diminuição da retenção de água nos poros do solo associada ao enriquecimento de ferro pode ter comprometido o micro-habitat das minhocas e colêmbolos.

Os teores extremamente baixos de carbono total e nitrogênio total, identificados no rejeito de mineração, também podem ter desempenhado um papel vital nos efeitos agudos e crônicos observados nos bioensaios com organismos do solo, uma vez que baixos teores de matéria orgânica implicam na redução da disponibilidade de alimentos, especialmente para minhocas. Os níveis de reprodução dos colêmbolos foram muito baixos e mostram uma toxicidade crônica extremamente alta. Muito provavelmente, a toxicidade observada nos testes se deve a exposições combinadas a muitos estressores físicos e químicos (incluindo metais, mas não apenas metais) contidos nas amostras.

Cabe destacar que os colêmbolos estão em uma posição-chave na cadeia alimentar do solo, pois controlam populações de fungos, são fonte de alimento para ácaros e desempenham um papel vital na decomposição da serapilheira e nos ciclos de nutrientes (Silva et al., 2016 apud Siqueira et al., 2022). Assim, a redução das populações de colêmbolos também pode comprometer a integridade dos ecossistemas do solo (Thomsen et al., 2012 apud Siqueira et al., 2022). Os autores concluíram, que os efeitos crônicos ecotoxicológicos foram muito mais intensos e graves do que os agudos. Outro ponto citado pelos autores é

que as características físicas do rejeito desempenharam um papel crucial na toxicidade observada nos bioensaios, até maior que as características químicas.

O capítulo II do Plano de Recuperação Socioambiental, também traz os resultados da avaliação toxicológica e de bioacumulação, utilizando como organismo teste, a minhoca (*Eisenia andrei*), mesma espécie utilizada no estudo de Siqueira *et al.* (2022). Foram feitos testes de sensibilidade, ensaio agudo e crônico em solo natural e teste de fuga. Segundo informações provenientes do plano, não foi observada toxicidade aguda ou letalidade nos organismos expostos ao rejeito. Esse resultado é diferente ao encontrado por Siqueira *et al.* (2022), na mesma avaliação. Os dados do plano também indicam que não foram observados efeitos negativos sobre a biomassa das minhocas. Esse resultado também é diferente do encontrado por Siqueira *et al.* (2022). Foi observada apenas uma mudança comportamental dos indivíduos. Segundo os autores, 80% das minhocas fugiram quando se adicionou 37,5% de rejeito ao solo natural. Embora os efeitos sobre a reprodução não tenham sido conclusivos, foi observada uma redução reprodutiva na amostra com 12,5% de rejeito. O estudo não chegou a conclusões específicas sobre a bioacumulação de metais nesses organismos.

Porém, estudos realizados com girinos expostos ao rejeito de mineração no contexto do rompimento da barragem de Fundão (Mariana-MG) constataram que o rejeito não causou mortalidade nos girinos, mas trouxe uma série de efeitos subletais à sua capacidade natatória, já no ensaio agudo (curta exposição). Na exposição crônica (longo prazo), todos os indivíduos testados tiveram sua capacidade natatória reduzida após 16 dias. Os girinos não possuem comportamento de fuga quando expostos ao rejeito, tornando-se alvos de processos bioacumulativos. As análises toxicológicas mostraram aumento de cádmio (Cd), chumbo (Pb), ferro (Fe), manganês (Mn), zinco (Zn) e alumínio (Al) com a exposição ao rejeito.

Cabe destacar que o Plano de Recuperação Socioambiental da Bacia do rio Paraopeba afirma que os cenários de atingimento após as cheias:

“ [...] conferem a re-exposição de rejeito e derivados aos indivíduos da fauna silvestre de hábito terrestre, principalmente àqueles com hábito semiaquático, inviabilizando o acesso à água e a outros recursos, além de o cenário facilitar a deposição de material de frações mais finas do que o solo, causando infiltração de água no solo e aumentando a suscetibilidade a processos erosivos, o que retroalimenta outros impactos, como a própria perda e redução da qualidade de habitat [...] (ARCADIS, 2020. Pág. 206)

Em relação à possível bioacumulação, o Plano de Recuperação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba indica que os estudos de solo demonstraram uma pequena alteração nas classes texturais dos solos amostrados, em função da deposição de traços de rejeito sobre áreas marginais que podem configurar potencial redução da qualidade ambiental do habitat e, portanto, diminuição do seu uso pelas espécies terrestres. No que tange aos aspectos toxicológicos, o plano conclui que os bioensaios em organismos testes sugerem comportamento furtivo à exposição ao rejeito a longo prazo (crônico) em organismos de hábito terrestre e evidenciam processos bioacumulativos de metais.

No tocante à contaminação dos animais domésticos e produtos derivados devido ao rompimento da barragem de rejeito de mineração da Mina Córrego do Feijão, não houve a produção de estudos ou registro de dados pelos órgãos ambientais relativos à contaminação dos animais domésticos e produtos derivados, entre o último relatório trimestral e o presente. O Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba não traz informações relativa à contaminação, apenas uma contextualização dos possíveis danos associados à perda da capacidade de dessedentação no rio Paraopeba e a morte de animais em decorrência da onda de rejeito no momento do rompimento.

Segundo os responsáveis pelo plano, a restrição do acesso à água, associada à perda de área produtiva, gerou problemas à manutenção dos rebanhos. Esse cenário restritivo do uso da água para a dessedentação animal tem como consequências a redução do crescimento, do bem-estar, de saúde e o aumento do estresse dos animais. O comprometimento da qualidade das águas do rio Paraopeba traz, então, impactos negativos relacionados a fatores zootécnicos, bem como consequências psicossociais e econômicas àqueles que dependem do animal para alguma atividade econômica, em particular aquelas ligadas à subsistência.

Os resultados relativos às carcaças encontradas podem ser visualizados no “Diagnóstico Emergencial Integrado”, promovido pela Gerência Socioambiental da ATI Paraopeba (NACAB, 2020).

3.5 MATERIAL PARTICULADO E POEIRA DOMICILIAR

Não houve a produção de estudos ou registro de dados pelos órgãos ambientais relativos a danos à qualidade do ar devido ao rompimento da barragem de rejeito de mineração da Mina Córrego do Feijão, entre o último relatório trimestral e este. Desta forma, assim como feito para caracterização do rejeito e os danos aos solos, optou-se por utilizar os dados provenientes do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba (ARCADIS, 2020) que traz os dados provenientes das estações de monitoramento de

qualidade da FEAM, utilizados como base para o “Diagnóstico Emergencial Integrado” (NACAB, 2020) e os dados provenientes de estações particulares da Vale S.A. instaladas após o rompimento. Cabe dizer ainda, que os dados provenientes do monitoramento de qualidade do ar em Taquaras, em Esmeraldas, ainda não foram divulgados ou anexados a esse plano. Portanto, todos os dados indicados no relatório são provenientes das estações de monitoramento próximos à zona quente, em Brumadinho.

Antes do rompimento, três estações de monitoramento operavam próximo à Mina do Córrego do Feijão. As Estações PS21, PS26 e PS28. Para a estação PS21, localizada dentro da mina, registrou-se um aumento de 114,6% entre 2018 e 2019 de MP10, particulado fino. Considerando só o mês de abril de 2019 (início do período seco), a média da concentração de particulados finos (MP10) foi de 20,77 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2018, para 70,66 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ em 2019 (pós rompimento), um aumento de 240,2%. Os valores encontrados ultrapassaram o Padrão Final de qualidade do ar, definido pela Resolução Conama 491/2018. Já para a estação PS26, que analisa partículas em suspensão total (PTS), a média anual de 2018 foi de 36,56 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, e a de 2019, de 75,50 $\mu\text{g}/\text{m}^3$, o que representa um aumento de 106,5%. Porém, a estação não indicou valores anuais superiores ao previsto pela legislação. Por fim, para a estação PS28, que também analisa partículas totais em suspensão (PTS) o aumento foi de 21,4% entre 2018 e 2019. Desta forma, têm-se que todas as estações de monitoramento indicaram aumento na quantidade de partículas suspensas no ar, invariavelmente ligadas ao rompimento.

Considerando apenas as estações instaladas após o rompimento, segundo informações do PRSA, foram coletados 34.572 dados para MP10 (partículas finas), 34.794 dados para MP2,5 (Partículas ultrafinas) e 34.360 dados para PTS (Partículas totais em suspensão). Em média 80% dos dados coletados foram considerados válidos. Para partículas totais (PTS), os equipamentos não registraram valores acima do limite legal, inclusive considerando os valores médios anuais. Segundo os técnicos responsáveis, esse resultado pode estar correlacionado ao clima frio e seco, que diminui a capacidade de dispersão dos poluentes próximos da superfície. Para partículas finas (PM10), os dados indicam que as concentrações desse tipo de partícula ultrapassaram os limites do Padrão Final da legislação brasileira, de forma intermitente entre julho e novembro, em quase todas as estações. Todas as estações ultrapassaram o limite legislativo para a média anual de partículas finas (PM10). Para partículas ultrafinas (PM2,5), entre agosto e outubro, cinco estações ultrapassaram de modo intermitente os limites legislativos. A concentração média anual só foi ultrapassada em uma estação, onde os trabalhos de busca e limpeza foram mais intensos nesse período.

Segundo o inventário de emissões, as vias de tráfego e áreas expostas à dispersão eólica são as principais contribuintes para os valores encontrados, sendo a ressuspensão de partículas nas vias o principal problema. Esse problema também foi relatado pelas pessoas atingidas nas comunidades que estão recebendo água potável, mineral e silo, devido ao

aumento da circulação dos veículos pesados. Outro ponto se refere ao material depositado nas planícies fluviais após as cheias do rio Paraopeba que, quando seco, também pode ser uma fonte de material particulado e deve ser alvo de investigação mais profunda, visto que o PRSA não aborda essa possibilidade.

3.6 COMUNIDADES AQUÁTICAS

O estudo realizado por Siqueira *et al.* (2022) apresenta resultados sobre os níveis de motilidade de *Daphnia similis* (microcústáceo) e taxas reprodutivas de *Chlorella vulgaris* (microalga) a partir dos bioensaios realizados.

D. similis foi submetida a testes ecotoxicológicos agudos com exposição à água do rio Paraopeba com e sem rejeitos de mineração por 48 horas. Em três pontos das nove amostras provenientes da área denominada “Zona Quente - ZQ” (área muito próxima à ruptura da barragem) e em um ponto das três amostras da área “Alberto Flores - AF” (à jusante do ponto ZQ) houve significativa redução da motilidade dos indivíduos dessa espécie. Os critérios de validade assumiram motilidade média de organismos inferiores a 20% em relação aos indivíduos testados na amostra controle (área a montante do rompimento, não atingida pelos rejeitos de mineração da barragem).

A população de algas da espécie *C. vulgaris* foi exposta durante cinco dias ao mesmo tipo de preparação a que foi submetida *D. similis*. Comparativamente aos indivíduos de *C. vulgaris* presentes na amostra controle, em 100% das amostras das áreas impactadas foi detectada significativa redução dos níveis reprodutivos devido à toxicidade crônica extremamente alta. Exceto em dois pontos de ZQ e dois pontos de amostras de AF, os níveis de reprodução foram excessivamente baixos e cerca de dez vezes menor do que o observado na amostra controle. Muito provavelmente, a toxicidade observada nos testes é devida a exposições combinadas de muitos aspectos físicos e estressores químicos contidos nas amostras, como metais e outros elementos químicos (SIQUEIRA *et al.*, 2022). As algas são a base da teia alimentar aquática e quedas de suas taxas reprodutivas podem afetar em grande medida o equilíbrio dos ecossistemas aquáticos.

Os altos níveis de toxicidade aquática, especialmente para algas, encontrados no estudo de Siqueira *et al.* (2022) estão de acordo com os resultados encontrados por Vergilio *et al.* (2020), que estudou a ecotoxicidade de amostras de água coletadas na bacia do rio Paraopeba. Esses autores, ao realizarem ensaios biológicos com *Raphidocelis subcapitata*, *D. similis* e *Danio rerio*, encontraram alta toxicidade aguda e crônica para produtores (algas) e diferentes níveis de consumidores (microcústáceos e peixes), sugerindo potenciais efeitos nocivos para os ecossistemas fluviais. De forma similar, Thompson *et al.* (2020), ao realizar

experimentos *in vivo* com embriões de peixe-zebra (*D. rerio*) a partir de amostras de água da bacia do rio Paraopeba, também relataram efeitos tóxicos significativos relacionados à deposição de rejeitos de mineração oriundos do rompimento da barragem.

No Volume III do Capítulo II do Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba, foi apresentada uma caracterização das comunidades aquáticas pós-rompimento. Neste documento, os estudos referentes ao trecho do rio Paraopeba presentes na Região 3 correspondem à denominada região 2, que abrange as proximidades de Juatuba/MG até a Represa de Três Marias. Para alguns pontos amostrais, normalmente os mais distantes do ponto de rompimento da barragem, como por exemplo, a região 2, o monitoramento foi iniciado antes da chegada da pluma de rejeitos, o que garantiu a possibilidade de comparações diretas entre a situações anterior e posterior ao evento. A Região 2 foi subdividida em ambientes lóticos, de água corrente, correspondendo ao rio Paraopeba; em ambientes intermediários, de águas mais lentas, correspondendo ao reservatório da UHE Retiro Baixo; e em ambientes lênticos, correspondendo ao reservatório de Três Marias, que não tinha sido afetado pela pluma de rejeitos até o final do monitoramento (ARCADIS, 2020).

Um panorama da estrutura dessas comunidades (fitoplâncton, zooplâncton, zoobentos e macrófitas aquáticas), após a passagem da pluma de rejeitos na região 2, é apresentado abaixo.

3.6.1 Comunidade fitoplânctonica

A composição florística não se apresentou muito alterada após a passagem da pluma de rejeitos, mantendo-se a predominância das classes Chlorophyceae, Bacillariophyceae e Cyanophyceae. Para a região 2, a riqueza variou nos ambientes lóticos entre quatro e sete táxons, representando uma diminuição da riqueza em relação ao cenário pré-pluma (8,2 e 13,4 táxons). Nos ambientes intermediários, a variação da riqueza média foi de 9 e 15 táxons e, neste caso, mantendo valores semelhantes aos anteriormente encontrados (8,5 e 14,4 táxons). A partir da realização de um teste estatístico, comprovou-se que a riqueza fitoplanctônica diminuiu significativamente nos ambientes lóticos. Entretanto, não se verificou o mesmo padrão para os ambientes intermediários após a passagem da pluma de rejeitos (ARCADIS, 2020).

3.6.2 Comunidade zooplânctonica

Após a passagem da pluma de rejeitos, a comunidade zooplanctônica passou a ter um predomínio ainda maior de rotíferos, os quais compuseram mais de 60% da riqueza da comunidade na maioria dos pontos amostrais. Nos ambientes lóticos, a variação da riqueza

foi de 5,7 e 10,6 táxons, enquanto nos ambientes intermediários variou entre 13,1 e 17,2 táxons. Para a região 2, não foram apresentadas diferenças estatisticamente significativas entre os cenários com e sem plumas relativo à riqueza da comunidade em questão (ARCADIS, 2020).

3.6.3 Comunidade zoobentônica

Na série de amostragens após a passagem da pluma, as amostras estiveram frequentemente compostas pela subclasse Oligochaeta (84%). Esse resultado demonstra uma alteração na composição da comunidade, passando a ter predomínio de anelídeos, um dos grupos faunísticos considerados mais resistentes a alterações e perda de qualidade ambiental. Em ambientes lóticos, houve variação de riqueza entre 1,3 e 2,4 táxons e, em ambientes intermediários, entre 0,25 a 0,83 táxons. O teste estatístico utilizado mostrou que a riqueza zoobentônica diminuiu significativamente na região 2. Em relação aos ambientes lóticos, foram registradas também alterações significativas, no entanto, os valores superiores estiveram associados à passagem da pluma, o que não pode ser atribuído a algum efeito benéfico da pluma de rejeitos, mas ao esforço amostral desbalanceado, pois as amostragens foram mais numerosas no período após a pluma (ARCADIS, 2020).

3.6.4 Macrófitas aquáticas

A maioria dos bancos de macrófitas identificados foi composto por uma única espécie, *Eichhornia crassipes*, notadamente conhecida como invasora aquática. Foi igualmente observada colonização das margens por *Polygonum hydropiperoides*, também classificada como invasora aquática.

A partir de novembro de 2019, com o início do período chuvoso, grande parte dos bancos de macrófitas compostos por *E. crassipes* foi carregada em decorrência do aumento do nível do rio Paraopeba, observando-se apenas dois pequenos bancos, restritos à região a montante da área a ser dragada, a qual fica nas proximidades da confluência do rio Paraopeba e ribeirão Ferro-Carvão. Entre novembro de 2019 e março de 2020, o nível do rio permaneceu elevado, não sendo observada formação de qualquer outro banco de macrófitas aquáticas, apenas poucos remanescentes de *P. hydropiperoides* nas margens da área dragada (ARCADIS, 2020).

3.6.5 Análise de persistência das comunidades aquáticas

A verificação das mudanças temporais na composição das comunidades foi realizada por meio da análise de persistência que consiste nas respostas da comunidade ou população a distúrbios discretos ou pontuais que interferem nas abundâncias, porém sem causar mudanças de longa duração no ambiente (CONNELL & SOUZA, 1983 apud ARCADIS, 2020). A persistência, realizada pelo método de pares agrupados com média ponderada, é confirmada quando as estações amostrais (pontos) entre cenários diferentes são mais similares que pontos dentro do mesmo cenário (VIEIRA et al., 2005 apud ARCADIS, 2020).

Para a comunidade fitoplânctônica, a análise de agrupamento demonstrou que as estações amostrais dentro do mesmo cenário são mais semelhantes entre si do que a mesma estação em cenários diferentes, indicando que não houve persistência das espécies fitoplanctônicas após a passagem da pluma de rejeitos.

Com relação aos táxons de zooplâncton, demonstrou-se que os diferentes pontos amostrais dentro do mesmo cenário são mais semelhantes entre si do que o mesmo ponto amostral em cenários diferentes, o que também indica ausência de persistência das espécies zooplanctônicas após a passagem da pluma de rejeitos.

A análise de agrupamento de macrófitas aquáticas evidenciou que unicamente a comunidade de um ponto da região 2 se manteve persistente com a passagem da pluma, uma vez que os dois cenários para este ponto foram agrupados juntos. No caso dos demais ambientes amostrados, assim como ocorreu para o fitoplâncton e o zooplâncton, demonstrou-se que as diferentes estações amostrais dentro do mesmo cenário são mais semelhantes entre si do que a mesma estação em cenários diferentes, indicando a ausência de persistência das espécies após a passagem da pluma de rejeitos.

A análise de persistência para essas três comunidades hidrobiológicas corrobora os resultados encontrados nas análises da estrutura das comunidades, nas quais se verificou que todos esses grupos de organismos sofreram alterações profundas e significativas com a passagem da pluma. Com essa análise, aprofundou-se o entendimento de que o ambiente afetado pela pluma possui baixa resistência e resiliência, seus componentes biológicos não permaneceram no sistema e suas comunidades não persistiram após o impacto da passagem dos rejeitos (ARCADIS, 2020).

O cenário resultante da passagem da pluma de rejeitos tem implicações diretas sobre todo o equilíbrio biológico dos ecossistemas aquáticos. Os distúrbios ocorridos nas comunidades fitoplanctônicas, que compreendem os organismos produtores, podem gerar efeitos cascatas sobre toda a cadeia alimentar, afetando em larga escala as transferências de energia para os níveis mais altos da cadeia (consumidores). Da mesma forma, organismos zooplanctônicos são uma fonte alimentar para outros consumidores da cadeia e, conseqüentemente, a diminuição ou ausência da persistência desses organismos também tem resultados negativos sobre a teia trófica.

3.6.6 Monitoramento de carcaças de peixes no rio Paraopeba

As ações de resgate e salvamento da fauna aquática foram iniciadas em 30 de janeiro de 2019. Esse monitoramento se estende ao longo do rio Paraopeba desde a montante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão até o município de São José da Varginha, próximo à confluência com ribeirão Cova d'Anta.

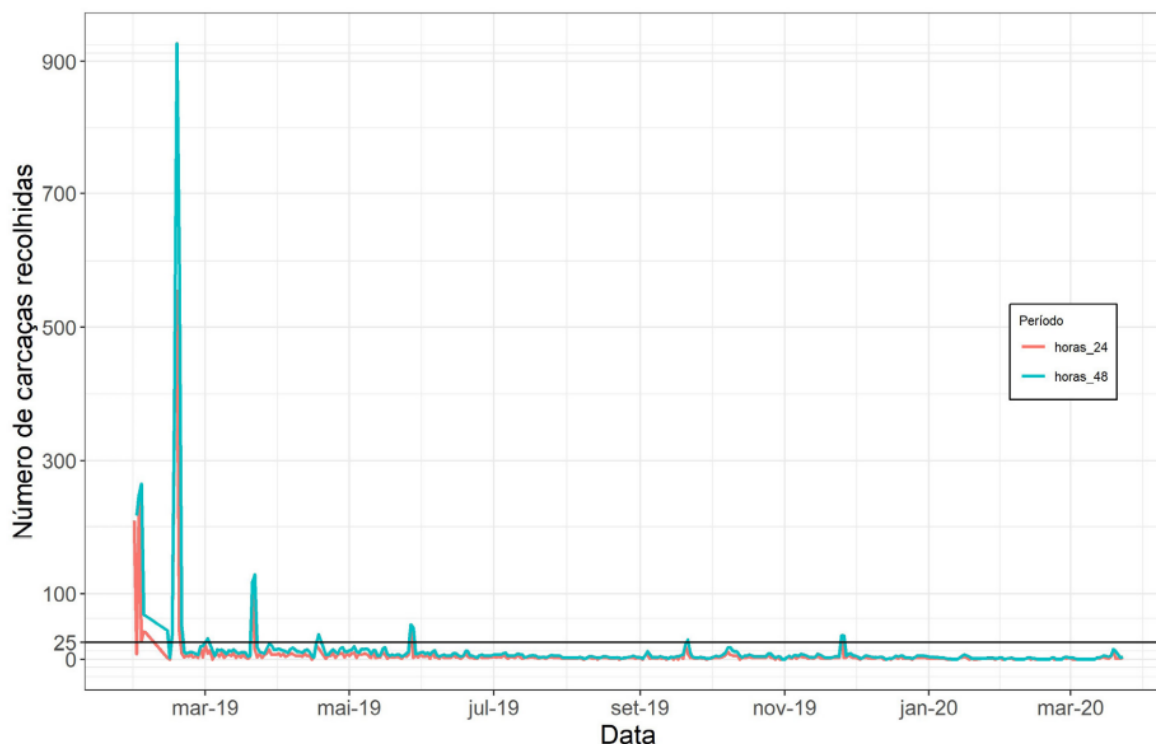
O documento apresenta as discussões sobre os eventos de mortandade¹, com base em dados bióticos e ambientais coletados à época, bem como a partir de informações publicadas, que podem auxiliar na reconstrução dos cenários. A intenção não é determinar a causa, uma vez que as mortandades podem ser causadas pela ação conjunta de múltiplos estressores e que a causalidade raramente é determinada pela investigação (La & Cooke, 2011 apud ARCADIS, 2020).

Durante o período de monitoramento, os trechos com as maiores concentrações de carcaças de peixes abrangem desde a região da confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão até a UTE Igarapé (1.457 carcaças) e 19 km a jusante da referida usina, até uma cachoeira no município de Esmeraldas (2.922 carcaças). Ressalta-se que até o presente momento, nenhuma análise histopatológica foi finalizada para se estabelecer relação de causa e efeito entre o rompimento das barragens (ARCADIS, 2020).

Com base nas informações apresentada no Plano (Figura 1), nos três primeiros meses após o rompimento, que representa o final do período chuvoso de 2019, a turbidez da água do rio Paraopeba a jusante da confluência com o ribeirão Ferro-Carvão apresentou teores elevados até a região a montante do reservatório da UHE Retiro Baixo. Esse período coincidiu com picos de mortandade de peixes. Após maio de 2019 e o consequente período de estiagem, houve a diminuição do revolvimento do sedimento, dissipação da pluma e consequentes alterações na qualidade da água, resultando na redução no número de carcaças coletadas por dia no trecho entre a confluência do ribeirão Ferro-Carvão e a UTE Igarapé.

¹ A partir da literatura disponível sobre o tema, valores de 25 ou mais carcaças recolhidas ou visualizadas em um trecho de 1 km de rio, no período de 48 horas, configuram mortandades de peixes (La & Cooke, 2011).

Figura 1. Número de carcaças recolhidas diariamente e no acumulado de 48 horas, no trecho entre a foz do ribeirão Ferro-Carvão e a UTE Igarapé, de 30/01/2019 até 24/03/2020.



Fonte: ARCADIS, 2020.

Em 29 de outubro de 2019, uma mortandade de peixes de grande magnitude ocorreu no rio Paraopeba a jusante da confluência com o rio Betim. Pela composição da fauna de peixes mortos, com cerca de 1/5 da riqueza da bacia sendo “amostrada” em um trecho relativamente curto do rio, esse evento não tem características de uma mortandade seletiva. A não seletividade desse evento pode estar relacionada a níveis muito altos de substâncias tóxicas ou que tornam o ambiente impróprio para a vida aquática (MEYER & BARCLAY, 1990 apud ARCADIS 2020). Nenhuma carcaça foi encontrada no trecho entre a foz do ribeirão Ferro-Carvão e a UTE Igarapé no dia 28. De acordo com os dados da empresa Clam Engenharia Meio Ambiente, responsável pelo monitoramento das carcaças, durante nove dias, foram recolhidas 3.272 carcaças a jusante da foz do rio Betim e 16 no trecho a montante.

Os dados de monitoramento da qualidade de águas superficiais no rio Paraopeba podem auxiliar na investigação dessa mortandade. De acordo com as sondas localizadas na margem oposta à foz do rio Betim e 4 km a jusante da foz desse rio, as concentrações de oxigênio dissolvido na água do rio Paraopeba a montante da foz do rio Betim não estiveram abaixo de 2,78 mg/L entre os dias 26 e 29 de outubro. Por outro lado, a jusante da foz desse tributário, um decréscimo que levou a condições próximas à anóxia ambiental foi observado entre as 21h do dia 28 e as 3h do dia 29 de outubro de 2019.

Devido ao histórico de mortandades a jusante da foz do rio Betim e ao fato de a qualidade da água nesse trecho ser a pior da bacia do rio Paraopeba (CALAZANS et al., 2018 apud ARCADIS, 2020), muitos fatores podem contribuir para mortandades de peixes.

No dia 12 de fevereiro de 2020, foi realizada uma vistoria técnica na região da UHE Retiro Baixo por profissionais da Arcadis, para averiguação de causas de morte de peixes que justificassem o aparecimento de carcaças no remanso do reservatório da UHE Três Marias, em seu braço que recebe as águas do rio Paraopeba.

Devido às chuvas extremas que ocorreram na bacia e provocavam a inundação do rio Paraopeba, houve necessidade de a usina realizar operações nas unidades geradoras e nos vertedouros, levando a oscilações abruptas no nível a jusante próximo ao período do aparecimento das carcaças. Dada a ocorrência desse evento, existe a possibilidade de que as carcaças coletadas a jusante do barramento sejam de peixes provenientes de montante, que sofreram injúrias ao serem transpostas pelo vertedouro.

No período em questão, houve intensa circulação da coluna de água, o que favoreceu a mistura dos estratos mais profundos com os superficiais e, conseqüentemente, a redução dos níveis de oxigênio nas porções mais superficiais do reservatório. Assim, a água defluente, tanto vertida quanto turbinada, apresentou baixa concentração de OD. Em decorrência dessa circulação, também pode ter ocorrido elevação da concentração de gases, tais como CO₂, CH₄ e H₂S, e liberação de outras substâncias presentes nos sedimentos, com potencial tóxico para fauna aquática.

Pelos fatos apresentados, foi concluído que não há evidência de relação do aparecimento de carcaças de peixes no braço do rio Paraopeba no reservatório da UHE Três Marias com o impacto do rompimento das barragens, o que é corroborado por não ter sido registrada a presença de peixes mortos a montante e no reservatório da UHE Retiro Baixo no mesmo período.

Os dados avaliados apontam que a mortandade foi originada a partir do aumento abrupto da vazão defluente do reservatório da UHE Retiro Baixo. Esse aumento foi ocasionado por chuva extrema na bacia, o que resultou na necessidade de operação diferenciada da UHE Retiro Baixo, promovendo fortes efeitos hidráulicos na massa de águas, bem como no fenômeno de circulação da coluna de água do reservatório, com redução de oxigênio e liberação de substâncias que podem ser nocivas aos peixes.

3.6.7 Ictioplâncton

No período de 20 fevereiro a 14 março de 2019, foi desenvolvido o monitoramento de ictioplâncton (ovos e larvas) pela Clam Engenharia Meio Ambiente. O monitoramento foi realizado em quatro pontos da calha principal do rio Paraopeba: a montante da confluência

do rio Paraopeba, com o ribeirão Ferro-Carvão; a jusante dessa confluência, no pontilhão próximo à área ocupada por indígenas Pataxó; em pontos imediatamente a montante; e a jusante das membranas de retenção de sólidos próximo ao município de Juatuba.

Picos reprodutivos foram observados nos trechos a montante e a jusante da confluência do rio Paraopeba com o ribeirão Ferro-Carvão, indicando atividade reprodutiva em áreas afetadas e não afetadas pelo rejeito. Entretanto, a proporção de larvas inviáveis na estação a jusante da confluência foi maior em relação às capturadas nas estações montante e jusante da membrana localizadas (CLAM, 2019a apud ARCADIS, 2020). Na área de influência das membranas, as densidades de ovos e larvas viáveis foram superiores às dos demais trechos.

Adicionalmente, foi realizada uma estimativa do percentual de ovos que chegam até a membrana, aqueles que passam por ela ou pelo canal lateral. Essas estimativas indicaram que 38% da densidade total de ovos alcançavam a membrana, 8% passavam por ela e 54% passavam pelo canal lateral. A passagem pelo canal pode ser explicada pelo desvio de fluxo do rio ocasionado pela própria membrana, principalmente após o gradativo entupimento da malha. O estudo demonstrou que mesmo após o rompimento que promoveu condições adversas de qualidade de água e a presença das barreiras físicas de retenção de sólidos, houve atividade reprodutiva de peixes na calha principal do rio Paraopeba. O trecho onde foram instaladas as membranas demonstrou ser uma área de desova importante para algumas espécies migradoras. Entretanto, esse monitoramento emergencial foi conduzido ao final do período reprodutivo, impossibilitando uma amostragem mais abrangente e precisa dos picos reprodutivos e de possíveis interferências oriundas do rompimento. Apesar dessas limitações, foi possível observar que 58% do total de larvas capturadas não foram identificadas devido às injúrias. Tal fato, associado aos níveis elevados de turbidez nos primeiros quilômetros da área da pluma, pôde indicar, nesse período, que as condições da água do rio Paraopeba após o rompimento influenciaram na maior taxa de mortalidade das larvas, diminuindo de montante para jusante (Clam, 2019a apud ARCADIS, 2020).

Outro monitoramento de ictioplâncton foi conduzido pela empresa Clam no rio Paraopeba entre 19 de outubro de 2019 e 16 de março de 2020, abrangendo todo o período de piracema.

A avaliação da integridade das larvas demonstrou que 62% da captura total foi composta de larvas íntegras ou pouco danificadas. A proporção de larvas danificadas em relação ao curto período amostrado no primeiro estudo, logo após o rompimento, mostra que os efeitos negativos desse evento não perduraram.

A crescente densidade de ovos da região montante para jusante das barreiras, associada a maior proporção de larvas íntegras em todos os pontos amostrais e à ausência de efeito dos filtros em larvas, demonstrou que os sistemas de membranas exerceram baixa

ou nenhuma influência na deriva do ictioplâncton. Foi possível observar ainda a presença de diferentes estágios de vida em todos os pontos amostrais, indicando que a reprodução ocorreu em toda a região avaliada (Clam, 2019a apud ARCADIS, 2020).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS

A equipe da Gerência Socioambiental seguirá buscando estudos e relatórios que apresentem dados secundários acerca dos danos ocorridos aos fatores bióticos e abióticos. Ademais, as solicitações aos órgãos competentes e demais instituições relacionadas à processo de reparação serão retomadas periodicamente, objetivando a elucidação e atualização dos danos para compartilhamento das informações com as comunidades atingidas.

5. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARCADIS. Plano de Reparação Socioambiental da Bacia do Rio Paraopeba – Rompimento das Barragens B1, B4 e B4-A do Complexo Paraopeba II da Mina Córrego do Feijão. Capítulo II - Diagnóstico Pretérito - Volume III. 2020.

BOSLAUGH, S. Secondary data sources for public health: a practical guide. 1st ed. Cambridge University Press, 2007.

CHOY, L. T. The Strengths and Weaknesses of Research Methodology: Comparison and Complimentary between Qualitative and Quantitative Approaches. Journal Of Humanities And Social Science, v. 19, n. 4 (3), p. 99 – 104, 2014.

CPRM - SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL. Monitoramento Especial da Bacia do Rio Paraopeba. Relatório V. Monitoramento Hidrológico, Sedimentométrico e Geoquímico. Novembro, 2020. Brasília. 366p.

IGAM. Boletim do Cidadão: Qualidade da Água no rio Paraopeba. Nº 32. Janeiro, 2022. Belo Horizonte, 19p.

JAGERCIKOVA, M.; CORNU, S.; BOURLES, D.; EVRARD, O.; HATTÉ, C.; BALESDENT, J. Quantification of vertical solid matter transfers in soils during pedogenesis by a multi-tracer approach. J. Soils Sediments. 17 (2), 408–422, 2017.

NACAB. Diagnóstico Emergencial: Integração de Pesquisas sobre Meio Físico e Biótico. Dezembro, 2020. Belo Horizonte. 392p.

NACAB. Resumo Técnico - Solos da Região 3: Caracterização Física e Química. Abril, 2021. Belo Horizonte, 33p.

SIQUEIRA, D. et al. Terrestrial and aquatic ecotoxicity of iron ore tailings after the failure of VALE S.A mining dam in Brumadinho (Brazil). Journal of Geochemical Exploration, v. 235, n. 106954. Abril, 2022. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2022.106954>>. Acesso em 12 mar. 2022.

VERGILIO, C. S et al. Metal concentrations and biological effects from one of the largest mining disasters in the world (Brumadinho, Minas Gerais, Brazil). *Scientific Reports*, v. 10, n. 5936, 2020. Disponível em: <<https://www.nature.com/articles/s41598-020-62700-w>>. Acesso em 15 mar. 2022.

THOMPSON, et al. Severe impacts of the Brumadinho dam failure (Minas Gerais, Brazil) on the water quality of the Paraopeba River. *Science of The Total Environment*, v. 705, n. 135914. 2020. Disponível em: <<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.135914>>. Acesso em 15 mar. 2022.