

ELEMENTOS TRAÇO EM UMA LAGOA COSTEIRA QUE RECEBE EFLUENTES DA EXTRAÇÃO E PROCESSAMENTO DE MINÉRIO DE FERRO: ESTUDOS INTEGRADOS SOBRE NÍVEIS AMBIENTAIS, BIODISPONIBILIDADE, EXPOSIÇÃO BIOLÓGICA E EFEITOS¹

Adriana Alves Pereira²

Resumo

Este estudo investigou, através de uma abordagem multidisciplinar, a possível influência das atividades de extração e processamento de minério de ferro da empresa Samarco Mineração S/A na descarga de metais e elementos traço (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, As e Hg), especiação e biodisponibilidade em uma lagoa costeira (Lagoa Mãe-Bá) que recebe seus efluentes finais. Adicionalmente, avaliou-se o potencial de bioacumulação e transferência trófica desses elementos, bem como os potenciais riscos à saúde humana em consequência do consumo de peixe da lagoa. Além disso, possíveis alterações em marcadores bioquímicos de exposição e efeito de elementos traço foram investigadas em espécies de peixes. As principais constatações são: As operações da empresa constituem uma fonte potencial de Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, Pb, As e Hg para a Lagoa Mãe-Bá; Entretanto, devido às baixas biodisponibilidades, há evidências de que as descargas periódicas na lagoa têm influência limitada nos níveis ambientais de elementos traço na lagoa; Estudos da acumulação de elementos traço revelaram ausência de biomagnificação na Lagoa Mãe-Bá; De acordo com normas nacionais e internacionais para consumo humano, músculos de todas as espécies de peixes estudadas na lagoa são apropriados ao consumo humano; Não foram evidenciadas associações diretas entre os níveis hepáticos de elementos traço e biomarcadores de estresse oxidativo; No geral, não há indicação de efeitos adversos à saúde das espécies de peixe estudadas.

Palavras-chave: Mineração de ferro; Elementos traço; Bioacumulação; Estresse oxidativo.

TRACE ELEMENTS IN A TROPICAL COASTAL LAGOON IN BRAZIL RECEIVING EFFLUENTS FROM IRON-ORE MINING AND PROCESSING: INTEGRATED FIELD STUDIES ON ENVIRONMENTAL LEVELS, BIOAVAILABILITY, BIOLOGICAL EXPOSURE, AND EFFECTS

Abstract

This study investigated, using a multidisciplinary approach, the possible influence of iron-ore mining and processing activities from Samarco Mineração S/A on metals and trace elements release (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, As e Hg), speciation and bioavailability in a coastal lagoon (Mãe-Bá Lagoon) that receives its final effluents. In addition, the potential of element bioaccumulation and trophic transfer, as well as the potential risks to human health due to fish consumption were assessed. Moreover, possible changes in biochemical markers of exposure and effects of trace elements were investigated in fish species. The main findings are: The mining and processing operations constitute a potential source of Fe, Mn, Cr, Cu, Ni, Pb, As and Hg to Mãe-Bá Lagoon; However, because of indication of reduced bioavailability, there is an indication that the periodical discharges into the lagoon have limited influence on environmental levels of trace elements; Studies on trace elemental accumulation revealed absence of biomagnification at Mãe-Bá Lagoon; Based on national and international standards for human consumption, fish muscle of all species studied from Mãe-Bá Lagoon is suitable for human consumption. No straight forward associations were found between the levels of hepatic trace elements and biomarkers for oxidative stress. In general, there is no indication of the presence of adverse effects on health of the fish species studied.

Keywords: Iron-ore mining; Trace elements; Bioaccumulation; Oxidative stress.

¹ Contribuição técnica ao 68º Congresso Anual da ABM - Internacional, 30 de julho a 2 de agosto de 2013, Belo Horizonte, MG, Brasil.

² Engenheira Química, PhD, Consultora Ambiental; Professora na Universidade Federal de Minas Gerais e Faculdade Pitágoras – Belo Horizonte - MG

1 INTRODUÇÃO

Minério de ferro constitui a matéria-prima principal para as indústrias mundiais de ferro e aço. Quase todo minério de ferro (98%) é usado na produção de aço. Austrália e Brasil dominam a produção mundial de minério de ferro, e a China é o maior consumidor. No Brasil, a produção desse minério ocorre principalmente no Sudeste, na região conhecida como Quadrilátero Ferrífero. Nessa mesma região, há presença dispersa de ouro. No passado, atividades artesanais de mineração de ouro em pequena escala eram frequentes nessa área.

Atividades de mineração e processamento de minério de ferro constituem fontes potenciais de metais e outros elementos traço no meio ambiente.⁽¹⁻³⁾ Além disso, essas atividades podem influenciar a química da água⁽⁴⁾ alterando, conseqüentemente, a disponibilidade de elementos traço à biota aquática. Características de qualidade de águas tais como pH, temperatura, alcalinidade, dureza e o teor de ligantes orgânicos e inorgânicos regulam as formas físico-químicas nas quais elementos traço se encontram na água, aumentando ou atenuando a possibilidade de acumulação desses elementos na biota aquática. Além disso, fatores fisiológicos, diferenças entre as espécies e posição na cadeia trófica também controlam a extensão da bioacumulação de elementos traço, potencializando ou atenuando seus efeitos toxicológicos na biota aquática.^(5,6)

Alguns elementos traço estão relacionados à ocorrência de estresse oxidativo. Eles podem estimular a produção de espécies reativas de oxigênio (EROs) tais como ânion superóxido ($O_2^{\cdot-}$), peróxido de hidrogênio (H_2O_2), radical hidroxila ($\cdot OH$) e oxigênio singlete (O_2^1).⁽⁷⁾ EROs são gerados durante o metabolismo normal em organismos aeróbicos. A produção normal de EROs envolve mecanismos celulares com moléculas antioxidantes, que constituem-se em importantes sistemas de remoção das EROs. O estresse oxidativo é uma condição biológica em que ocorre desequilíbrio entre a produção de EROs e a sua desintoxicação através das defesas antioxidantes. Quando as defesas antioxidantes não são suficientes, podem ocorrer diferentes tipos de danos, dentre eles, dano oxidativo a lipídios (peroxidação de lipídios).⁽⁸⁾ A peroxidação de lipídios promove modificações físicas nas membranas celulares, que resultam em alterações na fluidez e permeabilidade, comprometendo as funções biológicas.⁽⁹⁾ Biomarcadores de estresse oxidativo comumente utilizados por pesquisadores para avaliar os danos causados por elementos traço são o malondialdeído (indicativo da ocorrência de peroxidação de lipídios), e agentes antioxidantes como superóxido dismutase, catalase, glutathione S-transferase e vitamina A.

O presente estudo envolve as atividades de mineração, concentração e pelotização de minério de ferro operadas pela Samarco Mineração S/A. Durante essas atividades, o minério de ferro proveniente da mina de Germano (município de Mariana, MG) é lavrado, concentrado e transportado na forma de polpa de minério (mistura de minério de ferro e água) por um mineroduto de 396 km até as plantas de pelotização, no litoral do Estado do Espírito Santo (Unidade de Ponta Ubu, município de Anchieta). Nessas plantas, o minério é separado da água e os efluentes resultantes são depositados, após tratamento, em um lago artificial chamado Barragem Norte. Periodicamente esse lago transborda para a lagoa costeira chamada Mãe-Bá.

O principal objetivo deste trabalho foi investigar possíveis impactos das atividades de extração e processamento de minério de ferro nos níveis ambientais de elementos traço e eventuais consequências às espécies de peixe presentes na

Lagoa Mãe-Bá. Para tanto, uma abordagem multidisciplinar foi utilizada. Como base de comparação foram selecionadas lagoas semelhantes no entorno, que, no entanto, não eram impactadas diretamente pelas atividades de processamento de minério de ferro. Fundamentada em uma série de estudos de campo, esta pesquisa examinou a possível influência das atividades de extração e processamento de minério de ferro na descarga de metais e elementos traço (Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, As e Hg), especiação e biodisponibilidade em diferentes sistemas aquáticos (rios e lagoas costeiras). Adicionalmente, níveis de elementos traço foram medidos em invertebrados e peixes para se avaliar o potencial de bioacumulação e transferência trófica desses elementos, bem como os potenciais riscos à saúde humana em consequência do consumo de peixe da Lagoa Mãe-Bá. Além disso, possíveis alterações em marcadores bioquímicos de exposição e efeito de elementos traço foram investigadas em espécies de peixes das lagoas costeiras.

2 MATERIAIS E MÉTODOS

Concentrações dos elementos traço Fe, Mn, Al, Cr, Zn, Cu, Ni, Pb, Cd, Hg e As foram determinadas em água, sedimentos (superfície e perfis), invertebrados e peixes (fígados, músculos e brânquias) da Lagoa Mãe-Bá e de locais diretamente influenciados pelas operações de mineração e processamento de minério de ferro (barragens de sedimentação e córrego vizinho). Além disso, lagoas costeiras vizinhas, que não recebem efluentes de nenhum processo industrial, nem de esgotos domésticos, foram incluídas para comparação (Lagoas Guanabara, Icarai e Ubu). A Figura 1 ilustra os locais de coleta de amostras na área de estudo.

Uma abordagem multidisciplinar, incluindo métodos geoquímicos clássicos, métodos biológicos padrões e métodos bioquímicos modernos foi aplicada no estudo. A Tabela 1 mostra um resumo dos métodos utilizados, os locais e parâmetros avaliados e as metodologias de análises aplicadas. Descrição detalhada das metodologias de coleta, preservação e preparo das amostras e das análises utilizadas encontram-se em Pereira.⁽¹⁰⁾

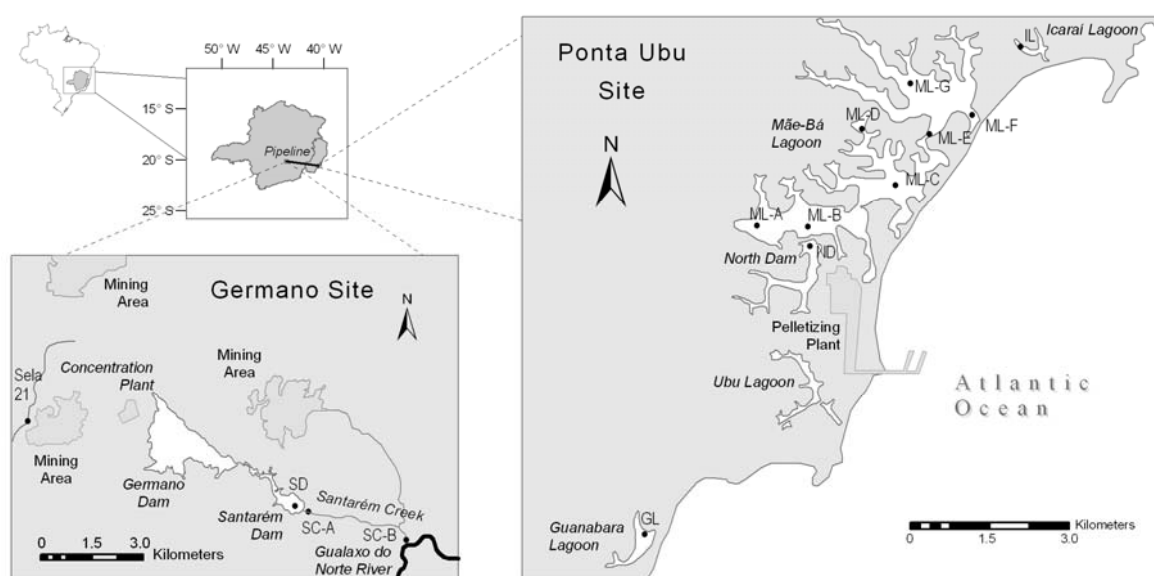


Figura 1. Mapa de localização dos locais de coleta de amostras na área de estudo. Locais de coleta: Área de mineração: Sela 21, Barragem de Santarém (SD), Córrego Santarém (SC-A e SC-B). Área de processamento: Barragem Norte (ND). Lagoa Mãe-Bá (ML-A a ML-G). Lagoas vizinhas: Lagoa Guanabara (GL), Lagoa Icarai (LI), Lagoa Ubu (UL).

Tabela 1. Métodos geoquímicos: locais de coleta, parâmetros e metodologias de medição

Compartimento	Local de coleta	Parâmetros	Medição
Água	Sela 21, SD, SC-A, SC-B, ND, ML (ML-A a ML-G), GL, IL	Ca, K, Mg, Na, Al, Fe Mn, Zn, Cd, Pb, Cu, Ni, Cr, As Hg Alkalinity, Cl^- , NO_3^- , NO_2^- , SO_4^{2-} , PO_4^{3-} T, OD, Salinidade, pH, condutividade SPM (material particulado suspenso) COP (carbono orgânico particulado), NPT (nitrogênio particulado total) COD (carbono orgânico dissolvido) Modelo de especiação química - CHEAQS	ICP-AES* ICP-MS* CV-AFS* APHA ⁽¹¹⁾ Sonda Hydrolab Pesagem CHN/S analisador COT analisador Verweij ⁽¹²⁾
Sedimento	Sela 21, SD, SC-A, SC-B, ND, ML (ML-A a ML-G), GL, IL	Fe, Mn, Zn Al, Cu, Cd, Ni, Pb, Cr Hg As AVS and SEM (sulfetos ácidos voláteis e metais simultaneamente extraídos) Tamanho de partícula (normalização geoquímica) COT (carbono orgânico total), NT (nitrogênio total) $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (isótopos estáveis de carbono e nitrogênio)	AAS*/ICP-AES GF-AAS*/ICP-AES CV-AFS ICP-AES-hidreto* Van Griethuysen et al., ⁽¹³⁾ Espalhamento de laser CHN/S analisador EA-IRMS*

*ICP-AES: espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente; ICP-MS: espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado; CV-AFS: espectrometria de fluorescência atômica do vapor frio; AAS: espectrometria de absorção atômica; GF-AAS: espectrometria de absorção atômica com forno de grafite; ICP-AES-hidreto: espectrometria de emissão atômica por plasma acoplado indutivamente com geração de hidretos; EA-IRMS: análise elementar com espectrometria de massa de razões isotópicas.

Tabela 2. Métodos biológicos: locais de coleta, parâmetros e metodologias de medição

Compartimento	Local de coleta	Parâmetros	Medição
Invertebrados	ND, ML (ML-A a ML-G), GL, IL	Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, As Hg $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$ (isótopos estáveis de carbono e nitrogênio)	ICP-MS* CV-AFS* EA-IRMS*
Peixe (músculos)	ML (ML-A a ML-G), ML-C (+ brânquias e fígados), GL, IL	Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, As Hg $\delta^{13}\text{C}$, $\delta^{15}\text{N}$	ICP-MS CV-AFS EA-IRMS

*ICP-MS: espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado; CV-AFS: espectrometria de fluorescência atômica do vapor frio; EA-IRMS: análise elementar com espectrometria de massa de razões isotópicas.

Tabela 3. Métodos bioquímicos: locais de coleta, parâmetros e metodologias de medição

Compartimento	Local de coleta	Parâmetros	Medição
Peixe (fígado)	ML (ML-A a ML-G), GL, IL, UL	Fe, Mn, Al, Zn, Cu, Cr, Ni, Pb, Cd, As Hg MDA (malondialdeído), SOD (superóxido dismutase), GST (glutathione S-transferase) CAT (catalase) Retinóides (Vitamina A)	ICP-MS* CV-AFS* Espectrofotômetro Fluorímetro HPLC*

*ICP-MS: espectrometria de massa com plasma indutivamente acoplado; CV-AFS: espectrometria de fluorescência atômica do vapor frio; HPLC: cromatografia líquida de alta eficiência.

Testes estatísticos foram realizados para comparar diferenças nas concentrações de elementos traço em água, sedimentos, invertebrados e peixes em relação aos locais de coleta. Três grupos foram selecionados: locais diretamente influenciados pelas atividades de mineração e processamento (SD, SC-A e ND), Lagoa Mãe-Bá

(ML-A a ML-G) e Lagoas vizinhas (GL, IL, UL). Antes da análise estatística, os dados foram testados quanto à normalidade usando o teste Kolmogorov–Smirnov e quanto à homogeneidade de variância usando o teste de Levene. Quando a homogeneidade de variâncias entre grupos não era atendida, o efeito do local de coleta foi testado usando o teste de Mann-Whitney. Testes *t* de student para amostras independentes, teste *t* para uma amostra e análise de variância (ANOVA) seguida de Bonferroni pós teste foram usados para comparar as concentrações de elementos traço entre compartimentos (sedimentos, invertebrados e músculos de peixes), entre tecidos de peixes (músculos, brânquias e fígados) e entre espécies. Normalização geoquímica de elementos traço com a fração fina (< 63µm) em sedimentos foi aplicada para os resultados na Lagoa Mãe-Bá como descrito em Loring e Rantala.⁽¹⁴⁾ Esta análise de regressão foi usada para determinar relações entre a fração fina de sedimentos e as concentrações de elementos traço consideradas “naturais” ou de “background”, além de ter sido usada para determinar locais considerados enriquecidos com elementos traço.⁽¹⁵⁾ Análise de regressão foi aplicada para analisar relações entre concentrações de elementos traço e $\delta^{15}\text{N}$ (indicador do nível trófico).⁽¹⁶⁾ Análises de variância (ANOVA) seguida de Gabriel ou Games-Howell pós-testes e testes *t* de student para amostras independentes foram usadas para comparar concentrações de elementos traço, dados morfométricos de peixes e biomarcadores entre as diferentes espécies de peixes e regiões de coleta. Além disso, relações entre concentrações de elementos traço, dados morfométricos e biomarcadores de estresse oxidativo foram analisadas utilizando o teste não paramétrico de Spearman.^(10,17) Um nível de significância < 0,05 foi usado no estudo. Análise estatística foi realizada utilizando o pacote SPSS para windows (SPSS versão 15.0 e 16.0, Chicago, IL, USA).

3 RESULTADOS

Concentrações de elementos traço em água indicaram distribuição homogênea entre os locais de coleta e a maioria dos resultados abaixo dos limites máximos recomendados pela Resolução Conama 357/05.⁽¹⁸⁾ Estudos de biodisponibilidade em água utilizando o modelo de especiação química (*Chemical Equilibria in Aquatic Systems*) indicaram baixa biodisponibilidade de elementos traço nas áreas de mineração e processamento e também na Lagoa Mãe-Bá. Além disso, o modelo de especiação indicou maior biodisponibilidade de elementos traço nas lagoas vizinhas em comparação com a Lagoa Mãe-Bá.

A seguir são apresentados alguns resultados relevantes advindos da abordagem multidisciplinar aplicada no estudo. Concentrações de elementos traço em água, sedimentos, invertebrados e peixes foram comparados entre os locais de coleta e entre as espécies amostradas. Análises de regressão foram utilizadas para identificar locais enriquecidos com elementos traço em sedimentos e determinar relações entre elemento traço e nível trófico.

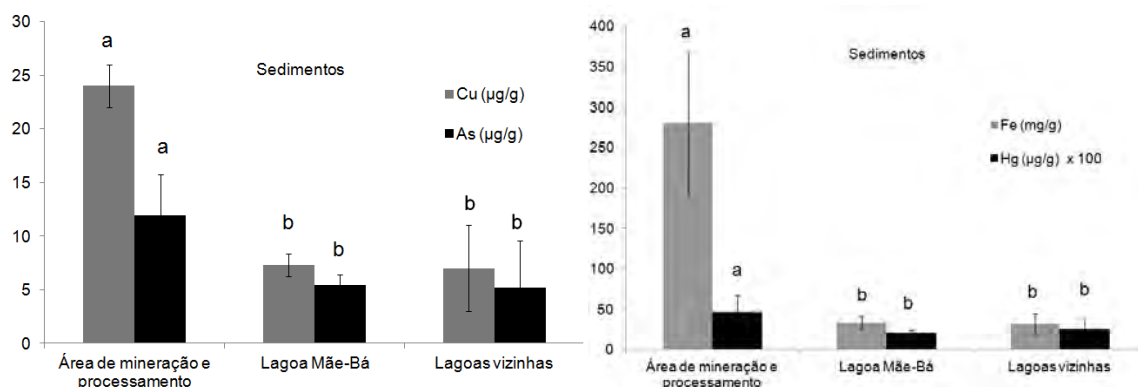


Figura 2. Concentrações de cobre, arsênio, ferro e mercúrio em sedimentos superficiais (fração total, peso seco) coletados em diferentes locais de coleta na área de estudo. Para cada elemento traço, locais de coleta que apresentam as mesmas letras não são significativamente diferentes umas das outras ($p > 0,05$).

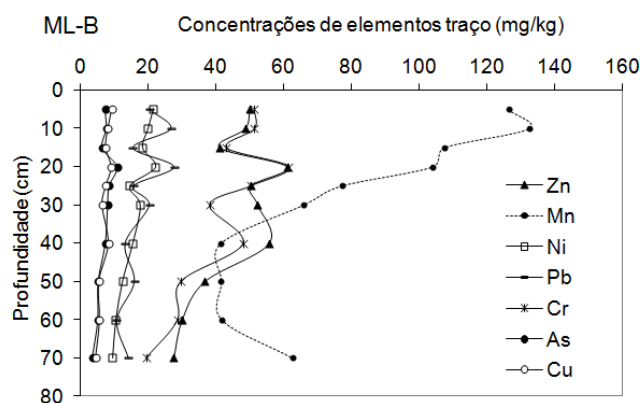


Figura 3. Concentrações de elementos traço em perfil na Lagoa Mãe-Bá (ponto ML-B).

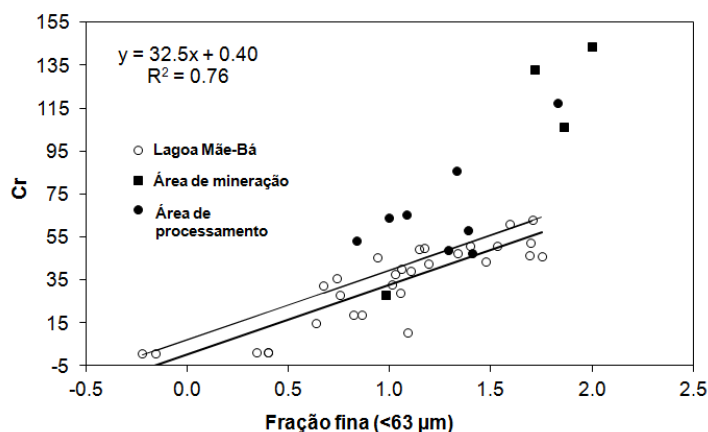


Figura 4. Concentrações de cromo em função do tamanho da partícula (fração < 63 µm) em sedimentos da Lagoa Mãe-Bá (círculos abertos). Dados da área de mineração (quadrados) e da área de processamento (círculos fechados) foram incluídos no modelo de regressão final, cuja significância foi $p < 0,001$.

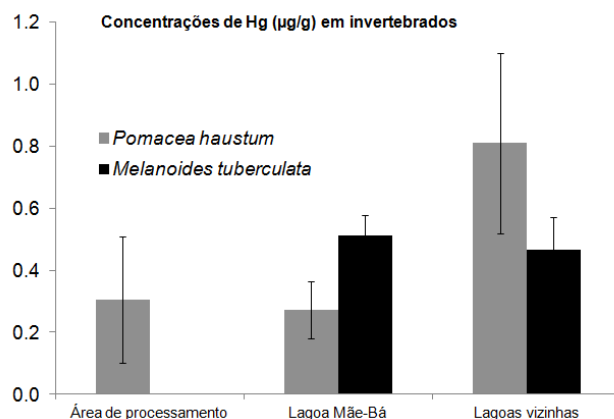


Figura 5. Concentrações de mercúrio em invertebrados (espécies: *Pomacea haustum* e *Melanoides tuberculata*) coletados na área de processamento, Lagoa Mãe-Bá e Lagoas vizinhas. Diferenças entre os locais de coleta não foram significativas ($p > 0,05$).

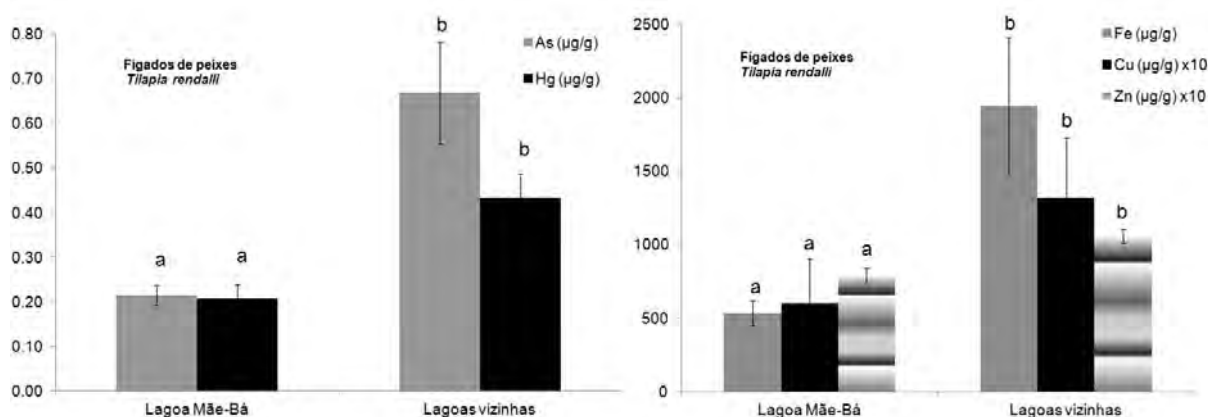


Figura 6. Concentrações de arsênio, mercúrio, ferro, cobre e zinco em fígados de *Tilapia rendalli* coletados na Lagoa Mãe-Bá e Lagoas vizinhas. Letras diferentes indicam diferenças significativas nas médias de elementos traço observadas entre os locais de coleta ($p < 0,05$).

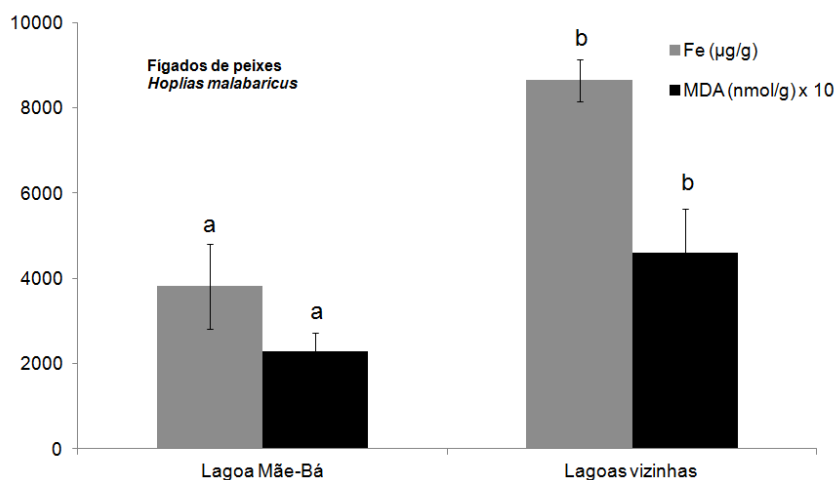


Figura 7. Concentrações de ferro e malondialdeído em fígados de *Hoplias malabaricus* coletados na Lagoa Mãe-Bá e Lagoas vizinhas. Letras diferentes indicam diferenças significativas nas médias observadas entre os locais de coleta ($p < 0,05$).

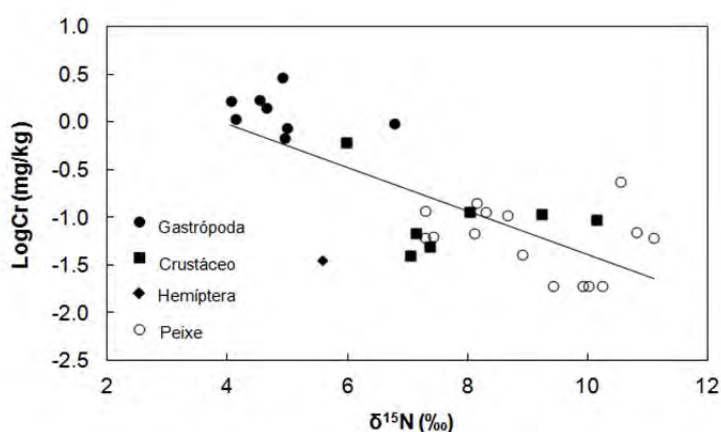


Figura 8. Relações entre concentrações de cromo (log tranformadas) e isótopo estável de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$) em invertebrados e peixes da Lagoa Mãe-Bá. Linha representa a estimativa de relação linear entre as variáveis. Nível de significância: $p < 0,001$.

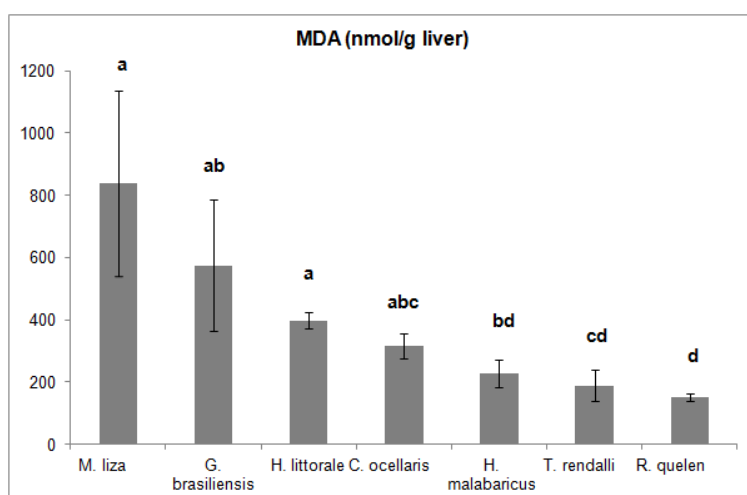


Figura 9. Concentrações de malondialdeído em fígados sete espécies de peixe coletadas na Lagoa Mãe-Bá. Médias contendo as mesmas letras não são significativamente diferentes umas das outras ($p > 0,05$).

4 DISCUSSÃO

Os níveis de alguns elementos traço, tais como ferro, cobre, arsênio e mercúrio em sedimentos superficiais das áreas de mineração e processamento (Figura 2) foram estatisticamente maiores em comparação com os sedimentos da Lagoa Mãe-Bá. No entanto, os níveis de elementos traço em sedimentos da Lagoa Mãe-Bá não foram considerados elevados em comparação com dados disponíveis na literatura, com exceção do arsênio e do mercúrio, cujos níveis foram similares aos de outras lagoas costeiras brasileiras consideradas moderadamente contaminadas por esses elementos.⁽¹⁹⁻²²⁾ Por outro lado, concentrações similares de elementos traço, incluindo o arsênio e o mercúrio, foram encontradas em água e sedimento da Lagoa Mãe-Bá e das lagoas costeiras vizinhas Guanabara e Icaraí, lagoas do entorno que não recebem efluentes industriais da Barragem Norte (Figura 2).

O enriquecimento de alguns elementos traço nas camadas superficiais de sedimentos da Lagoa Mãe-Bá em relação às camadas mais profundas (Figura 3) indicaram influência das operações de mineração e processamento na lagoa. Além disso, a normalização geoquímica identificou que as operações de mineração e

processamento constituem fontes potenciais de Cr (Figura 4) e outros elementos traço, tais como, Fe, Mn, Cu, Hg e Ni⁽¹⁵⁾ para a Lagoa Mãe-Bá. No entanto, estudos de biodisponibilidade em água indicaram baixa biodisponibilidade de elementos traço nas áreas de mineração e processamento e também na Lagoa Mãe-Bá. A baixa biodisponibilidade foi explicada pelos elevados teores de íons dissolvidos na água, como carbonatos, sulfatos e hidróxidos, possivelmente formados pela adição de substâncias químicas ao longo do processo da Samarco, e que agem como ligantes aos elementos traço diminuindo seu potencial de assimilação pela biota. A baixa biodisponibilidade de elementos traço na Lagoa Mãe-Bá foi também explicada pela presença de carbono orgânico dissolvido e cloretos, naturalmente encontrados na lagoa, e que também funcionam como agentes complexantes ou ligantes aos elementos traço.⁽¹⁵⁾

A previsão de maior biodisponibilidade de elementos traço nas lagoas costeiras do entorno foi confirmada pelas maiores concentrações de elementos traço em invertebrados (apesar de significância estatística não ter sido alcançada) e peixes dessas lagoas em comparação com organismos da Lagoa Mãe-Bá (Figuras 5 e 6). Além disso, estudos com biomarcadores para avaliar a exposição e efeitos de elementos traço em fígados de peixe revelaram concentrações significativamente maiores de peroxidação de lipídios na espécie *Hoplias malabaricus* (traíra) das lagoas do entorno (Guanabara, Icaraí e Ubu) em comparação com a Lagoa Mãe-Bá (Figura 7).

Correlações significativas negativas entre nível trófico (determinado por isótopos estáveis de nitrogênio ($\delta^{15}\text{N}$)) e concentrações de elementos traço em invertebrados e peixes (Figura 8) indicaram ausência de biomagnificação de elementos traço na Lagoa Mãe-Bá. De acordo com padrões nacionais e internacionais para consumo humano,⁽²³⁻²⁹⁾ músculo de peixe das oito espécies estudadas da Lagoa Mãe-Bá (*Geophagus brasiliensis*, *Tilapia rendalli*, *Mugil liza*, *Cichla ocellaris*, *Hoplosternum littorale*, *Trachelyopterus striatulus*, *Rhamdia quelen* e *Hoplias malabaricus*) é adequado ao consumo humano.⁽¹⁶⁾

Comparações entre as espécies de peixes coletadas na Lagoa Mãe-Bá indicaram estresse oxidativo em *Mugil liza* e *Geophagus brasiliensis* (Figura 9). No entanto, a inexistência de locais de referência para comparação não permitiu determinar se as alterações observadas indicavam efeitos da exposição a elementos traço ou eram naturalmente induzidas.

Geralmente não foram encontradas correlações significativas entre elementos traço nos fígados de peixes e biomarcadores de estresse oxidativo, como peroxidação de lipídios (malondialdeído) e atividade antioxidante (superóxido dismutase, catalase e glutathione S-transferase), na Lagoa Mãe-Bá.⁽¹⁰⁾ Além disso, não foi evidenciada uma relação de causa e efeito entre exposição a elementos traço decorrentes da mineração e processamento de minério de ferro no metabolismo da vitamina A em fígados dos peixes coletados na Lagoa Mãe-Bá.⁽¹⁷⁾

5 CONCLUSÃO

Os resultados da abordagem multidisciplinar aplicada no presente estudo evidenciaram que as descargas periódicas das operações de mineração e processamento de minério de ferro têm influência limitada nos níveis de elementos traço na Lagoa Mãe-Bá. Apesar das operações de mineração e processamento de minério de ferro representarem fontes potenciais de vários elementos traço, tais como Cu, As, Fe, Hg e Cr (Figuras 2 e 4), para a Lagoa Mãe-Bá, estudos de

especialização indicaram baixa biodisponibilidade de elementos traço nesses locais e também na Lagoa Mãe-Bá.⁽¹⁵⁾ A despeito de receber os efluentes das operações de processamento de minério de ferro, a Lagoa Mãe-Bá apresentou níveis de elementos traço menores em invertebrados e peixes quando comparados com organismos coletados nas lagoas do entorno, que não recebem efluentes industriais ou domésticos (Figuras 5 e 6). Além disso, resultados de biomarcadores indicaram menor exposição da espécie *Hoplias malabaricus* a elementos traço na Lagoa Mãe-Bá em comparação com as lagoas do entorno (Figura 7). Ademais, foi evidenciada ausência de biomagnificação de elementos traço na Lagoa Mãe-Bá. (Figura 8) De uma forma geral, não há evidência de efeitos adversos na saúde dos peixes estudados em relação a exposição a elementos traço na Lagoa Mãe-Bá, devido principalmente à ausência de correlações significativas entre elementos traço nos fígados de peixes e biomarcadores de estresse oxidativo.⁽¹⁰⁾ Além disso, não há risco no consumo de peixes da Lagoa Mãe-Bá, pois os níveis de elementos traço em músculos de peixes ficaram abaixo de padrões nacionais e internacionais.⁽¹⁶⁾

REFERÊNCIAS

- 1 WONG, M. H. Environmental impacts of iron-ore tailings - the case of Tolo Harbor, Hong-Kong. *Environmental Management* v. 5, p.135-45. 1981.
- 2 RATHA, D. S.; VENKATARAMAN, G. Environmental impact of iron ore mines in Goa, India. *International Journal for Environmental Studies* v. 47, p. 43-53. 1995.
- 3 ZABOWSKI, D.; HENRY, C. L.; ZHENG, Z.; ZHANG, X. Mining impacts on trace metal content of water, soil, and stream sediments in the Hei River basin, China. *Water Air and Soil Pollution* v. 131, p. 261-73. 2001.
- 4 HOLOPAINEN, I. J.; HOLOPAINEN, A. L.; HAMALAINEN, H.; RAHKOLA-SORSA, M.; TKATCHEVA, V.; VILJANEN, M. Effects of mining industry waste waters on a shallow lake ecosystem in Karelia, north-west Russia. *Hydrobiologia* v. 506, p. 111-19. 2003.
- 5 LUOMA, S.N., RAINBOW, P. S. Why is metal bioaccumulation so variable? Biodynamics as a unifying concept. *Environmental Science and Technology* v. 39, p. 1921-31. 2005.
- 6 RAINBOW, P.S. Trace metal bioaccumulation: models, metabolic availability and toxicity. *Environment International* v. 33, p. 576-82. 2007.
- 7 LUSHCHAK, V.I. Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic Toxicology* v. 101, p.13-30. 2011.
- 8 MATÉS, J.M. Effects of antioxidant enzymes in the molecular control of reactive oxygen species toxicology. *Toxicology* v. 153, p. 83-104. 2000.
- 9 MARTINEZ-ALVAREZ, R.M., MORALES, A. E., SANZ, A. Antioxidant defenses in fish: biotic and abiotic factors. *Reviews in Fish Biology and Fisheries* v. 15, p. 75-88. 2005.
- 10 PEREIRA, A.A. Trace elements in a tropical coastal lagoon in Brazil receiving effluents from iron-ore mining and processing. Integrated field studies on environmental levels, bioavailability, biological exposure, and effects. Tese de Doutorado, Vrije Universiteit Amsterdam. Amsterdam, 137 págs. 2012.
- 11 APHA. Standard methods for the examination of water and wastewater. American Public Health Association, 20th ed., Washington, DC. 1998.
- 12 VERWEIJ, W. Equilibria and constants in CHEAQS: selection, criteria, sources and Assumptions. Rijksinstituut voor Volksgezondheid en Milieuhygiene, Bilthoven, The Netherlands. 2005.
- 13 VAN GRIETHUYSEN, C., GILLISSEN, F., KOELMANS, A. A. Measuring acid volatile sulphide in floodplain lake sediments: effect of reaction time, sample size and aeration. *Chemosphere* v. 47, p. 395-400. 2002.
- 14 LORING, D. H., RANTALA, R. T. T. Manual for the geochemical analyses of marine sediments and suspended particulate matter. *Earth-Science Reviews* v. 32, p. 235-83. 1992.

- 15 PEREIRA, A. A., VAN HATTUM, B., BROUWER, A., VAN BODEGOM, P. M., REZENDE, C. E., SALOMONS, W. Effects of iron-ore mining and processing on metal bioavailability in a tropical coastal lagoon. *Journal of Soils and Sediments* v. 8, p. 239-52. 2008.
- 16 PEREIRA, A. A., VAN HATTUM, B., de BOER, J., VAN BODEGOM, P. M., REZENDE, C. E., SALOMONS, W. Trace elements and carbon and nitrogen stable isotopes in organisms from a tropical coastal lagoon. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology* v. 59, p. 464-77. 2010.
- 17 PEREIRA, A. A., VAN HATTUM, B., BROUWER, A. Hepatic retinoid levels in seven fish species (teleosts) from a tropical coastal lagoon receiving effluents from iron-ore mining and processing. *Environmental Toxicology and Chemistry* v. 31, p. 408-16. 2012.
- 18 BRASIL. Resolução N° 357, de 17 de março de 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente (CONAMA). 2005.
- 19 MARINS, R. V., LACERDA, L. D., PARAQUETTI, H. M., DE PAIVA, E. C., VILLAS BOAS, R. C. Geochemistry of mercury in sediments of a sub-tropical coastal lagoon, Sepetiba Bay, Southeastern Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology* v. 61, p. 57-64. 1998.
- 20 LACERDA, L. D., GONCALVES, G. O. Mercury distribution and speciation in waters of the coastal lagoons of Rio de Janeiro, SE Brazil. *Marine Chemistry* v. 76, p. 47-58. 2001.
- 21 MIRLEAN, N., ANDRUS, V. E., BAISCH, P., GRIEP, G., CASARTELLI, M. R. Arsenic pollution in Patos Lagoon estuarine sediments, Brazil. *Marine Pollution Bulletin* v. 46, p. 1480-84. 2003.
- 22 SOUSA, W. P., CARVALHO, C. E. V., CARVALHO, C. C. V., SUZUKI, M. S. Mercury and organic carbon distribution in six lakes from the north of Rio de Janeiro State. *Brazilian Archives of Biology and Technology* v. 47, p. 139-45. 2004.
- 23 BRASIL. Decreto N° 55.871, de 26 de março de 1965. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 1965.
- 24 BRASIL. Portaria N° 685, de 27 de agosto de 1998. Diário Oficial da União, Brasília, DF. 1998.
- 25 NAUEN, C. E. Compilation of legal limits for hazardous substances in fish and fishery products. FAO Fisheries Circular N°. 764. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy. 1983.
- 26 UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Assessing human health risks from chemically contaminated fish and shellfish: a guidance manual EPA-503/8-89-002. Office of Marine Protection, Washington, DC. 1989.
- 27 UNITED STATES ENVIRONMENTAL PROTECTION AGENCY. Integrated risk information system. Available at: <http://cfpub.epa.gov/ncea/iris/index.cfm>. 1998.
- 28 EUROPEAN UNION. Commission Regulation N°. 466/2001 of 8 March 2001. Official Journal of European Communities 1.77/1. 2001.
- 29 FAO/WHO. Summary of evaluations performed by the Joint FAO/WHO Expert Committee on Food Additives (JECFA 1956-2007). ILSI Press International Life Sciences Institute. 2007.