

Avaliação geoquímica de metais em sistemas fluviais afetados por atividades antrópicas no Quadrilátero Ferrífero

Geochemical assessment of metals in fluvial systems affected by anthropogenic activities in the Iron Quadrangle

Laura Pereira do Nascimento^{1*}, Deyse Almeida Reis¹,
Hubert Mathias Peter Roeser², Anibal da Fonseca Santiago³

RESUMO

O presente estudo foi realizado na bacia hidrográfica do Rio do Peixe, Quadrilátero Ferrífero (QF), em Minas Gerais. Essa bacia apresenta um cenário geológico distinto e atividades antrópicas diversificadas, como a mineração de ferro, ouro e gemas, a agropecuária e a silvicultura. O principal objetivo desta pesquisa foi investigar as possíveis fontes de contribuições antropogênicas dos metais em sedimentos de fundo. Para isso, foram realizadas duas campanhas com amostragens de sedimentos de fundo em 12 pontos da bacia, nos meses de março e julho de 2015. A partir da técnica analítica de espectrometria de emissão óptica com plasma, foram detectadas concentrações de Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti e Zn nos sedimentos de fundo. Os resultados dos indicadores da qualidade dos sedimentos fator de contaminação (FC), fator de enriquecimento (FE) e índice de geoacumulação (IGEO) demonstraram que há interferências antrópicas, sendo as atividades minerárias e industriais, o despejo de efluentes domésticos e o uso e a ocupação do solo inapropriado apontados como as principais fontes de contaminação de metais da bacia.

Palavras-chave: sedimento de fundo; metais; Quadrilátero Ferrífero; Rio do Peixe.

ABSTRACT

The present study was carried out in the river basin area of Rio do Peixe, Iron Quadrangle, in Minas Gerais, Brazil. This basin presents geological scenario and diversified anthropic activities, such as iron, gold and gems mining, agriculture, and forestry. The main objective of this research was to investigate the possible sources of anthropogenic contributions of metals in bottom sediments. Thus, two surveys were carried out on bottom sediments at twelve basin sites from March to July of 2015. Based on the plasma optical emission spectrometry analytical technique, we found concentrations of Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti and Zn in the bottom sediments. The results of the FC, FE and IGEO sediment quality indicators showed that there are anthropic interferences, in which mining and industrial activities, disposal of domestic effluents and use and occupation of inappropriate soil are identified as the main sources of metals contamination of the basin.

Keywords: bottom sediment; metals; iron quadrangle, Rio do Peixe.

INTRODUÇÃO

A ocorrência dos metais em sistemas fluviais pode ser resultante dos processos intempéricos dos substratos litológicos ou das atividades antrópicas desenvolvidas na bacia hidrográfica (MARENCO *et al.*, 2006; LOSKA; WIECHULA; KORUS, 2004). Porém, diversos estudos e pesquisas de campo, realizados em ambientes fluviais, mostraram que grande parte

dos metais tóxicos encontrados são de origem antropogênica. Apesar da diversidade geológica, pesquisas realizadas no Quadrilátero Ferrífero (QF), constataram teores de metais em sistemas fluviais oriundos das atividades antropogênicas (COSTA *et al.*, 2015; MENESES; RENGGER; DESCHAMPS, 2011; COSTA *et al.*, 2006; DESCHAMPS & MATSCHULLAT, 2007; MATSCHULLAT *et al.*, 2000; MENDONÇA, 2012; PARRA *et al.*, 2007).

¹Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP) - Ouro Preto (MG), Brasil.

²Professor titular do Departamento de Engenharia Ambiental da Escola de Minas da UFOP - Ouro Preto (MG), Brasil.

³Professor adjunto do Departamento de Engenharia Civil da Escola de Minas da UFOP - Ouro Preto (MG), Brasil.

*Autor correspondente: lauraifmg@gmail.com

Recebido: 28/06/2016 - Aceito: 09/05/2017 - Reg. ABES: 165852

Nesse sentido, considerando a capacidade de refletir a assinatura geoquímica, adsorver metais e incorporar características e informações das atividades antrópicas da bacia hidrográfica, os sedimentos de fundo, são de alta relevância para estudos e identificação de fonte de áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas por metais, pois permitem a avaliação da qualidade dos sistemas fluviais. (FRANZ *et al.*, 2013; SALEEM; IQBAL; SHAH, 2015).

No Brasil, pesquisas e estudos voltados à qualidade dos sedimentos são realizados pelo Programa Nacional de Geoquímica Ambiental e Geologia Médica (PGAGEM), coordenado pela Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais (CPRM), por meio do Serviço Geológico do Brasil. Mas, infelizmente, essas pesquisas ainda são insuficientes, pois o país nem sequer dispõe de parâmetros ou padrões de qualidade de sedimentos que respeitem as peculiaridades e as condições geológicas locais.

Em virtude disso, a análise comparativa dos resultados e das aplicações de indicadores da qualidade dos sedimentos, a partir da utilização valores de referência regionais, é útil tanto para a identificação de potenciais fontes de poluição quanto para a tomada de decisões relacionadas à remediação

de áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas (HANIF *et al.*, 2016; GHREFAT; ABU-RUKAH; ROSEN, 2011; LOSKA; WIECHULA; KORUS, 2004; ABRAHIM & PARKER, 2008; REIS *et al.*, 2017).

Diante do exposto, o objetivo deste estudo consistiu em avaliar a qualidade do sistema fluvial de uma bacia intensamente antropizada a partir da utilização de valores de *background* regional e de indicadores de qualidade de sedimentos de fundo.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

A área de estudo contempla a bacia hidrográfica do Rio do Peixe, localizada no Estado de Minas Gerais, entre os municípios de Itabira e Nova Era. A bacia encontra-se no Complexo Itabira, uma unidade geológica localizada na extremidade nordeste do QF, conforme apresenta a Figura 1. A seguir, o Quadro 1 descreverá os principais aspectos de cada ponto de amostragem na bacia.

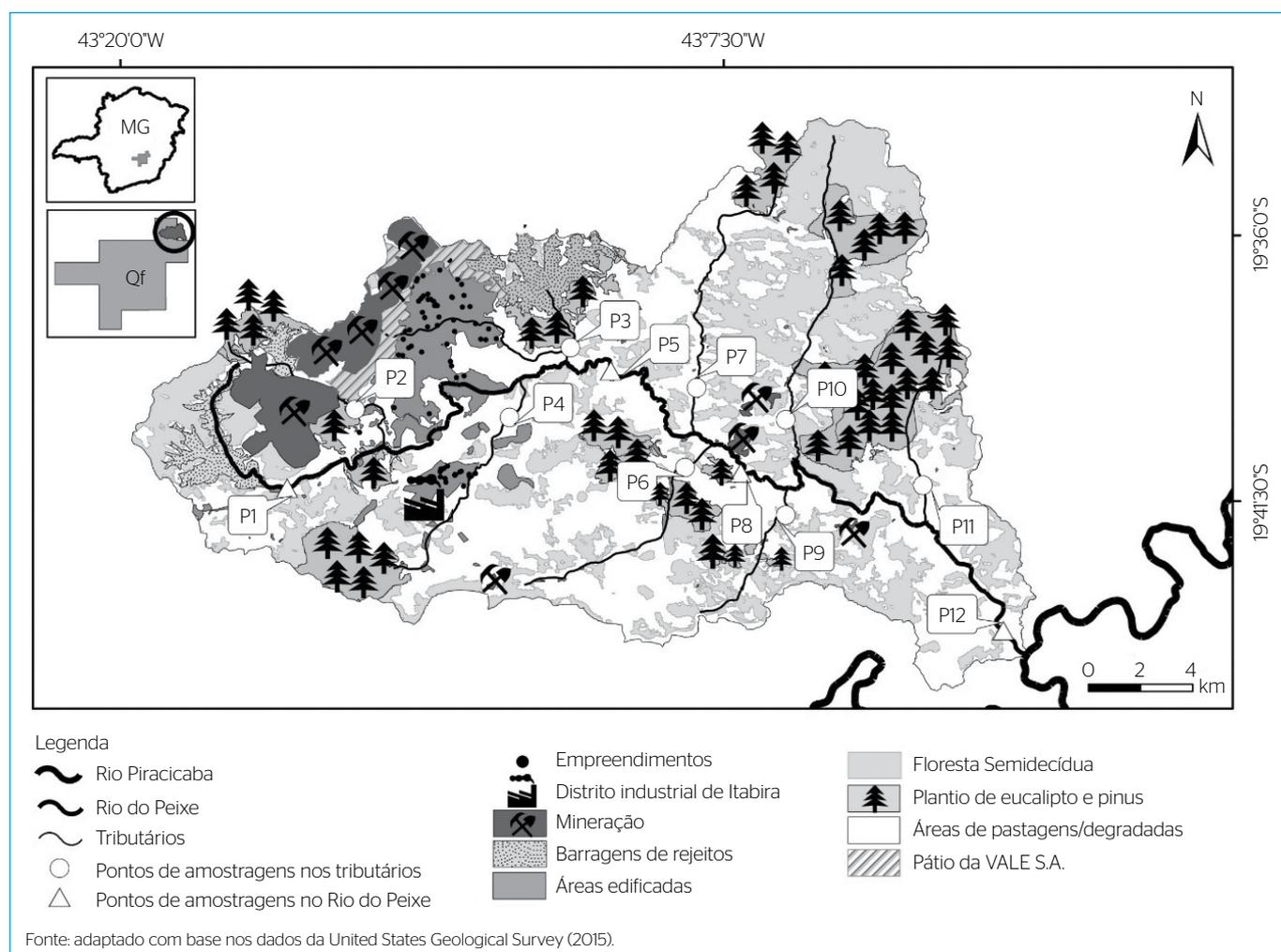


Figura 1 - Mapa de localização da área de estudo com os pontos amostrados.

Aspectos geológicos da bacia

Geologicamente, a área de estudo está inserida na porção nordeste do QF, uma das áreas clássicas do Pré-Cambriano, situado

no extremo sul do Cráton de São Francisco. A composição litológica da bacia hidrográfica do Rio do Peixe está representada na Figura 2 e no Quadro 2.

Quadro 1 – Descrição dos pontos de amostragens.

Pontos de amostragens		Descrições e observações dos pontos de amostragens
P1	Rio do Peixe	A jusante da barragem de rejeitos de ferro Itabiruçu.
P2	Córrego Conceição	Recebe cargas de efluente de minério de ferro e esgoto doméstico de moradias do núcleo urbano de Itabira.
P3	Córrego dos Dozes	A jusante do núcleo urbano de Itabira e da barragem do Pontal da VALE S.A. Recebe uma carga de esgoto doméstico de moradias do núcleo urbano de Itabira.
P4	Córrego Candinópolis	A jusante do distrito industrial de Itabira e do ponto de captação de abastecimento. Recebe carga de esgoto doméstico. Mata ciliar pouco preservada.
P5	Rio do Peixe	A jusante do núcleo urbano de Itabira e da estação de tratamento de esgoto LABOREAUX. Recebe elevadas cargas de esgoto doméstico clandestinos do núcleo urbano de Itabira
P6	Córrego Santa Cruz	Área rural. Plantações de eucalipto.
P7	Córrego Cachoeira	Área rural. Plantações de eucalipto. Esgoto doméstico.
P8	Rio do Peixe	Área rural. Mata ciliar não preservada.
P9	Córrego das Goiabeiras	Área rural. Plantações de eucalipto. Esgoto doméstico.
P10	Córrego São José	Área rural. Plantações de eucalipto. Esgoto doméstico.
P11	Córrego Cabral	Área rural. Plantações de eucalipto. Esgoto doméstico.
P12	Rio do Peixe	Área rural. Próximo de sua foz no Rio Piracicaba.

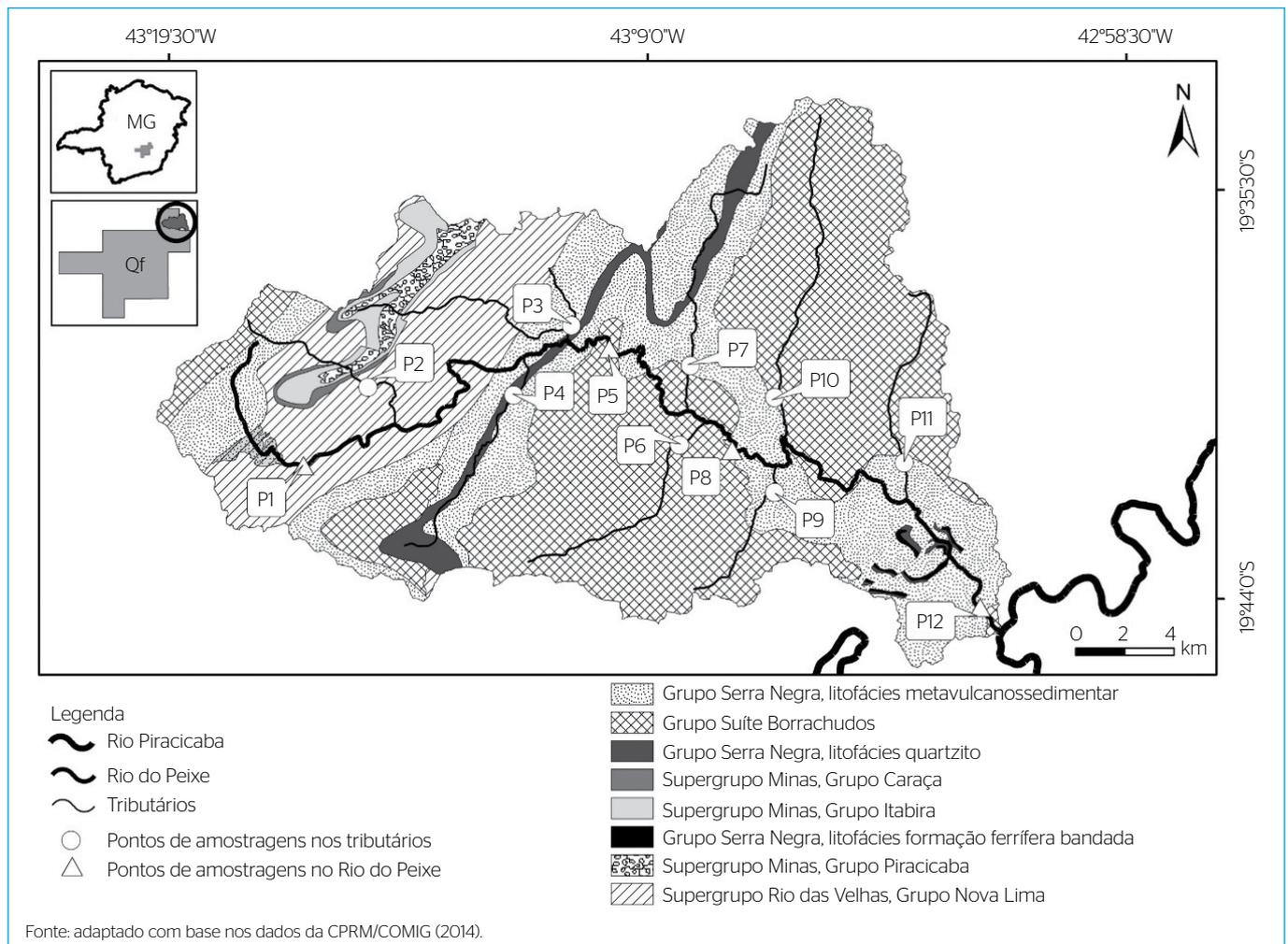


Figura 2 – Mapa geológico da bacia do Rio do Peixe.

Quadro 2 - Composição litológica da área da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe.

Percentual de classes na área da bacia	Unidade estratigráfica	Litotipos
30,87%	Grupo Serra Negra - litofácies metavulcanossedimentar	Rocha metalultramáfica e metamáfica tholeiíticas, gnaisses bandados, quartzito, metabasalto komatiítico, metavulcânica félsica, formações químico-exalativas, FFB e xisto.
45,16%	Suíte Borrachudos	Quartzito monzonito, álcali-feldspato granito, ortogneisse granítico alcalino.
3,54%	Grupo Serra Negra, litofácies quartzito	Quartzito puro, quartzito laminado argiloso e localmente ferruginoso, formação ferrífera bandada; biotita gnaisse bandado; calcissilicática laminada; anfibolito eventual. Predominâncias conforme a litofácies.
0,48%	Supergrupo Minas, Grupo Caraça	Quartzito com metaconglomerado e filito quartzoso subordinados.
1,93%	Supergrupo Minas, Grupo Itabira	Itabirito, dolomito.
0,25%	Grupo Serra Negra, Litofácies formação ferrífera bandada	Formação ferrífera bandada predominante intercaladas em gnaisse bandado tipo TTG. Ocorrência eventual de quartzito puro, quartzito laminado argiloso e localmente ferruginoso, calcissilicática laminada e anfibolito e rochas metalultramáficas.
1,42%	Supergrupo Minas, Grupo Piracicaba	Filito quartzoso e/ou grafitoso com intercalações de metarenito e metaconglomerado.
16,35%	Supergrupo Rio das Velhas, Grupo Nova Lima	Rocha metalultramáfica e metamáfica tholeiíticas, metabasalto komatiítico, metavulcânica félsica, formações químico-exalativas, FFB e xisto.

Fonte: adaptado com base nos dados da CPRM/COMIG (2014).

Com intuito de compreender o comportamento dos sistemas fluviais em distintos cenários climáticos, foram realizadas duas campanhas de amostragens de sedimentos de fundo nos corpos hídricos da bacia hidrográfica do Rio do Peixe, nos períodos úmido e seco, nos meses de março e julho de 2015.

Foram coletados, em 12 pontos de amostragens, aproximadamente 2 kg da camada superficial do sedimento fundo nas proximidades das margens dos corpos hídricos. Essa etapa contou com o auxílio de um coletor com haste alongada e uma draga tipo *Birge-Ekman*. Após a coleta, os sedimentos foram acondicionados em saco plástico de polietileno, identificados e conduzidos para o Laboratório de Saneamento Ambiental do Departamento de Engenharia Civil da Universidade Federal de Ouro Preto (UFOP), em caixa de isopor.

Posteriormente, cada amostra de sedimentos de fundo foi acondicionada em recipientes de plástico e os resíduos foram secos ao natural. Após esse procedimento, as amostras foram quarteadas e peneiradas. A porção mais fina das porções (menor que 0,062 mm) foi submetida ao processo de digestão parcial conforme o método proposto por Rauret *et al.* (2001).

Seguidamente, as amostras de sedimentos foram analisadas pela técnica de espectrometria de emissão atômica com plasma indutivamente acoplado (ICP-OES), marca *Spectro* e modelo *Ciros*, no Laboratório de Geoquímica Ambiental do Departamento de Geologia da UFOP, Ouro Preto, Minas Gerais.

Para avaliação das contribuições antropogênicas, foram utilizados valores de referência (*backgrounds* regionais) propostos por Costa (2015), conforme o Quadro 3. A escolha da utilização dos valores de referência deu-se em função da particularidade que a unidade geológica do QF apresenta e pelo fato de o Brasil não possuir norma ou valores de referência adaptados às condições geológicas locais para avaliação da qualidade dos sedimentos de fundo.

Quadro 3 - Valores de *backgrounds* de metais em sedimentos para o Quadrilátero Ferrífero.

Elementos	Valores propostos em (mg.kg ⁻¹)
Alumínio (Al)	45.200,00
Cálcio (Ca)	3.200,00
Cobalto (Co)	30,72
Cromo (Cr)	292,50
Cobre (Cu)	48,34
Ferro (Fe)	281.000,00
Manganês (Mn)	3.264,00
Níquel (Ni)	80,12
Chumbo (Pb)	45,40
Titânio (Ti)	1072,34
Zinco (Zn)	105,40

Fonte: Costa (2015).

Fator de contaminação (FC) avalia o nível de contaminação dos sedimentos, definido como o quociente entre a concentração do metal no sedimento e o seu nível de concentração natural ou *background* no sedimento (HAKANSON, 1980). O FC é calculado pela Equação 1:

$$FC = \left(\frac{Me_{am}}{[Me]_{bg}} \right) \quad (1)$$

Em que:

Me_{am} = concentração do metal na amostra dos sedimentos;

Me_{bg} = “*background*” ou concentração natural do metal na área de estudo.

Hakanson (1980) propôs quatro classes baseadas em valores do FC, conforme apresenta o Quadro 4.

O fator de enriquecimento (FE) é uma estimativa para a diferenciação entre os metais originários de atividades humanas e os provenientes de processo natural, para avaliar o grau de influência antrópica no ambiente (GRESENS, 1967). É calculado pela Equação 2:

$$FE = \frac{[Me]_{am} / [Al]_{am}}{[Me]_{bg} / [Al]_{bg}} \quad (2)$$

Em que:

$[Me]_{am}$ = concentração do metal na amostra do sedimentos;

$[Al]_{am}$ = concentração do alumínio na amostra de sedimentos;

$[Me]_{bg}$ = “background” ou concentração natural do metal na área de estudo para o metal da amostra;

$[Al]_{bg}$ = concentração de background média do alumínio para a bacia do Rio do Peixe.

Neste trabalho, no cálculo do FE, foi escolhido como elemento de referência o alumínio, considerando sua baixa mobilidade natural no meio ambiente (CHEN *et al.*, 2007). Gresens (1967) propôs cinco classes a partir dos valores do FE, conforme apresenta o Quadro 5.

O índice de geoacumulação (IGEO) é um método para avaliar a contaminação do ambiente por metais (MÜLLER, 1969). O índice é calculado pela Equação 3:

$$IGEO = \log_2 \left(\frac{Me_{am}}{1,5 [Me]_{bg}} \right) \quad (3)$$

Quadro 4 - Classificação do fator de contaminação.

Classes do FC	Qualidade dos sedimentos
<1	Baixa contaminação
1 e 3	Contaminação moderada
3 e 6	Contaminação considerável
>6	Alta Contaminação

FC: fator de contaminação.

Quadro 5 - Classificação do fator de enriquecimento.

Classes do FE	Qualidade dos sedimentos
<2	Deficiência de enriquecimento
2-5	Enriquecimento moderado
5-20	Enriquecimento significativo
20-40	Enriquecimento muito alto
>40	Enriquecimento extremamente alto

FE: fator de enriquecimento.

Em que:

IGEO quantifica o acúmulo de metal no sedimento;

Me_{am} = concentração do metal na amostra dos sedimentos;

Me_{bg} = “background” ou concentração natural do metal na área de estudo. Müller (1969) propôs setes classes descritivas para valores crescentes de IGEO, conforme o Quadro 6.

RESULTADOS

As Tabelas 1, 2 e 3 representam as concentrações dos metais para duas campanhas de amostragens, bem como os resultados dos indicadores de qualidade dos sedimentos de fundo dos sistemas fluviais da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe.

DISCUSSÃO

Alumínio

Em geral, as concentrações de alumínio nos sedimentos variaram entre 235,8 e 34.221,5 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 566,3 a 45.516,4 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme a Tabela 1. Em termos de concentrações, estudos realizados por Andrade (2000), Cruz (2002) e Mendes (2007) em áreas não impactadas ou sob influência antrópica mínima no QF encontraram valores máximos de alumínio em sedimentos entre 494,8 e 21.100,0 mg.kg⁻¹. Na mesma ordem, Oliveira (1999), ao estudar o Parque Estadual do Itacolomi, constatou teor máximo de alumínio em sedimentos equivalente a 65.400,0 mg.kg⁻¹. Estudo de Gonçalves (2010) reportou concentração máxima de alumínio em sedimentos de até 104.593,0 mg.kg⁻¹. Considerando a background para o alumínio em sedimentos, os resultados encontrados nesta pesquisa foram inferiores em relação ao valor de referência sugerido por Costa (2015), em estudo cuja concentração foi de 45.200 mg.kg⁻¹, com exceção apenas para o P9, que apresentou 45.516,4 mg.kg⁻¹ de alumínio em sedimento no período seco. A aplicação do FC permitiu classificar todos os pontos de amostragens com “Baixa contaminação”, exceto o P9, que

Quadro 6 - Classificação do índice de geoacumulação.

Classes do IGEO	Nível de contaminação
IGEO <0	Não poluído
0 < IGEO < 1	Não poluído a poluído
1 < IGEO < 2	Moderadamente poluído
2 < IGEO < 3	Moderadamente a fortemente poluído
3 < IGEO < 4	Fortemente poluído
4 < IGEO < 5	Fortemente a extremamente poluído
IGEO > 5	Extremamente poluído

IGEO: índice de geoacumulação.

foi enquadrado pelo fator com “Contaminação moderada”, conforme Tabelas 2 e 3. Com base nos resultados do IGEO, todos os pontos amostrais foram classificados como “Não poluído a poluído”. A ocorrência de alumínio em sedimentos está relacionada ao intemperismo de rochas de álcali-feldspato granito da Formação Suíte Borrachudos presentes na bacia. Porém, a degradação e exposição dos solos pelas atividades agropecuárias bem como o despejo de esgoto doméstico sem tratamento nos corpos hídricos no ponto de amostragem P9 podem estar favorecendo o aceleração dos processos de lixiviação da sílica e laterização dos minerais argilosos, provocando o enriquecimento das partículas de solos e rochas com óxidos de alumínio na superfície do terreno, que posteriormente serão carreadas para os sedimentos dos corpos hídricos.

Cálcio

Os resultados de cálcio nos sedimentos oscilaram entre 282,6 e 3.864,1 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 238,8 a 1.593,5 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme a Tabela 1. Cruz (2002), ao estudar uma área sob influência antrópica mínima no QE, encontrou teor máximo de cálcio em sedimentos equivalente a 3.120,0 mg.kg⁻¹. Com base no valor de *background* para cálcio em sedimentos, todos os pontos de amostragens ficaram abaixo do preconizado por Costa (2015), em pesquisa cujo teor encontrado foi de 3.200 mg.kg⁻¹, com exceção apenas para o P10, que apresentou concentração de 3.864,14 mg.kg⁻¹ no período úmido. Os resultados do FC possibilitaram classificar todos os pontos de amostragens com “Baixa contaminação”, exceto o P10, que apresentou “Contaminação moderada”, conforme Tabelas 2 e 3. De acordo com

Tabela 1 - Resultados dos teores de metais em sedimentos de fundo em (mg.kg⁻¹), nos períodos úmido e seco, na Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe.

Pontos de amostragens	Al		Fe		Ca		Ti		Mn	
	Úmido	Seco	Úmido	Seco	Úmido	Seco	Úmido	Seco	Úmido	Seco
P1	9.516	9.279,4	190.475,4	128.749,4	847,4	753,3	296,2	309,1	7.270,4	5.489,6
P2	235,8	566,3	400.222,3	340.127,4	282,6	458,2	57,7	58,5	461,8	690,1
P3	12.040,1	11.414,3	128.229,7	154.116,1	1.862,6	1.593,5	412,2	503,8	513,3	554,9
P4	6.854,4	33.304	9.430,4	26.765,3	460,6	901,4	106,7	291,2	103,2	175,4
P5	21.231,1	13.958,9	106.601,7	168.011	2.556,1	1.309,9	345,6	557,4	779,9	354
P6	20.167,3	27.993,3	47.755,9	66.508,3	659,3	1.125,8	921	1.648,3	387,4	632,4
P7	21.749,8	23.369,8	84.580,3	58.759,3	1.245,8	590,4	976,3	975,4	1.451,1	425,4
P8	12.768,4	19.118,8	179.266	124.039,8	999,7	1.210,1	379,7	514,2	736,1	741,2
P9	34.221,5	45.516,4	59.088,8	97.861,2	755,9	238,8	124,1	1.200,9	461,4	205,9
P10	13.711,4	26.981,8	1.615,4	45.974,8	3.864,1	1.180,5	<LQ	812,9	254,3	340,5
P11	25.662,4	28.229,4	3.812,9	54.628,1	1.221,6	576,1	<LQ	1.461,6	1.029,5	332,7
P12	23.597,2	5.002,2	117.232,4	191.566,7	1.214,9	280,3	546,8	369,5	2.053,6	451,3

Pontos de amostragens	Co		Cr		Cu		Ni		Pb		Zn	
	Úmido	Seco	Úmido	Seco	Úmido	Seco	Úmido	Seco	Úmido	Seco	Úmido	Seco
P1	10,9	10,8	76,1	71,3	26,1	33,8	14,1	14,1	10,8	17,5	40,6	47
P2	<LQ	<LQ	16,3	12,2	1,3	5,1	<LQ	<LQ	<LQ	<LQ	20	21,6
P3	4,8	5,6	34,6	39,2	30,7	37,3	6,9	6,5	15,6	30,9	74,3	85,4
P4	<LQ	2,9	10,8	50,5	7,7	50,8	<LQ	11,6	<LQ	117,7	11,9	257,3
P5	6,2	5,7	89,4	51,3	87,9	34,4	16,8	10,4	20	26,5	133	64,6
P6	2,9	5,7	9,4	26,4	10,8	147,7	<LQ	5,6	22,7	62,9	61,2	174,6
P7	23,8	12	72,3	63,9	32,1	27,2	17,3	13,5	29,2	26,3	67,9	59
P8	4,4	5,7	60,9	57,4	17,8	24,1	8,3	9,3	12,1	20,3	52,9	66,2
P9	5,8	2,4	114,5	177,3	61,6	67,7	11,2	16,5	44,9	36,7	76,8	42,5
P10	4,1	5,6	29,6	77,8	24,7	23,8	6,7	11,2	21	38,7	112,4	52,8
P11	8,9	6,6	18,7	33	79,9	24,7	6,5	6,9	40,7	39,5	106	79,1
P12	10,4	<LQ	84	31,4	26,7	8,4	14,4	<LQ	22,4	<LQ	68,9	23

FC: fator de contaminação; FE: fator de enriquecimento; IGEO: índice de geoacumulação; <LQ: limite de quantificação.

o FE, o P3 e o P10 foram classificados com “Enriquecimento moderado”, enquanto o P2 foi considerado com “Enriquecimento significativo”. Os resultados elevados do FE para P2 e P3 estão associados à atividade de exploração de minério de ferro realizada a montante desses pontos, que expõe e revolve os afloramentos de rochas dolomíticas do Supergrupo Minas, Grupo Itabira, devido à intensificação dos processos de intemperismo. Enquanto o valor destacável do FE para o P10 no período chuvoso exibe relação direta do uso de corretivos agrícolas à base de calcário dolomítico nas plantações de eucalipto e outras culturas e o manejo inapropriado dos solos. Os valores do IGEO classificaram todos os pontos amostrais como “Não poluído a poluído”; o P10 persistiu em apresentar o maior valor desse índice no período úmido.

Ferro

Os teores de ferro nos sedimentos variaram entre 1.615,3 e 400.222,3 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 26.765,2 a 340.127,3 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme a Tabela 1. Teores de ferro em sedimentos de 260.000 mg.kg⁻¹ foram reportados por Cunha e Machado (2005) em áreas não impactadas ou sob influência antrópica mínima no QF. Estudo de Oliveira (2009) constatou concentração de ferro em sedimentos de até 209.300 mg.kg⁻¹. Nesse mesmo sentido, teor máximo de 427.000 mg.kg⁻¹ de ferro em sedimentos foi alcançado por Cruz (2002). Em termos de *background* para o ferro no QF, apenas o P2 superou o valor sugerido por Costa (2015) (o valor de referência do ferro é de 281.000 mg.kg⁻¹), cujas concentrações atingidas foram de 400.222,3 a 340.127,4 mg.kg⁻¹ para as duas campanhas de amostragens. Conforme os resultados do

Tabela 2 - Resultados do fator de contaminação, fator de enriquecimento e índice de geoacumulação para os metais nos sedimentos de fundo da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe, no período úmido.

Pontos de amostragens	Al			Ca			Fe			Mn			Ti		
	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO
P1	0,2	-	0,0	0,3	1,3	0,1	0,7	3,2	0,1	2,2	10,6	0,4	0,3	1,3	0,1
P2	0,0	-	0,0	0,1	16,9	0,0	1,4	273,0	0,3	0,1	27,1	0,0	0,1	10,3	0,0
P3	0,3	-	0,1	0,6	2,2	0,1	0,5	1,7	0,1	0,2	0,6	0,0	0,4	1,4	0,1
P4	0,2	-	0,0	0,1	0,9	0,0	0,0	0,2	0,0	0,0	0,2	0,0	0,1	0,7	0,0
P5	0,5	-	0,1	0,8	1,7	0,2	0,4	0,8	0,1	0,2	0,5	0,0	0,3	0,7	0,1
P6	0,4	-	0,1	0,2	0,5	0,0	0,2	0,4	0,0	0,1	0,3	0,0	0,9	1,9	0,2
P7	0,5	-	0,1	0,4	0,8	0,1	0,3	0,6	0,1	0,4	0,9	0,1	0,9	1,9	0,2
P8	0,3	-	0,1	0,3	1,1	0,1	0,6	2,3	0,1	0,2	0,8	0,0	0,4	1,3	0,1
P9	0,8	-	0,2	0,2	0,3	0,0	0,2	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	0,1	0,2	0,0
P10	0,3	-	0,1	1,2	4,0	0,2	0,0	0,0	0,0	0,1	0,3	0,0	0,0	0,0	0,0
P11	0,6	-	0,1	0,4	0,7	0,1	0,0	0,0	0,0	0,3	0,6	0,1	0,0	0,0	0,0
P12	0,5	-	0,1	0,4	0,7	0,1	0,4	0,8	0,1	0,6	1,2	0,1	0,5	1,0	0,1

Pontos de amostragens	Co			Cr			Cu			Ni			Pb			Zn		
	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO
P1	0,4	1,7	0,1	0,3	1,2	0,1	0,5	2,6	0,1	0,2	0,8	0,0	0,2	1,1	0,0	0,4	1,8	0,1
P2	0,0	0,0	0,0	0,1	10,7	0,0	0,0	5,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	36,4	0,0
P3	0,2	0,6	0,0	0,1	0,4	0,0	0,6	2,4	0,1	0,1	0,3	0,0	0,3	1,3	0,1	0,7	2,6	0,1
P4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	0,0	0,2	1,1	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,1	0,7	0,0
P5	0,2	0,4	0,0	0,3	0,7	0,1	1,8	3,9	0,4	0,2	0,4	0,0	0,4	0,9	0,1	1,3	2,7	0,3
P6	0,1	0,2	0,0	0,0	0,1	0,0	0,2	0,5	0,0	0,0	0,0	0,0	0,5	1,1	0,1	0,6	1,3	0,1
P7	0,8	1,6	0,2	0,2	0,5	0,0	0,7	1,4	0,1	0,2	0,4	0,0	0,6	1,3	0,1	0,6	1,3	0,1
P8	0,1	0,5	0,0	0,2	0,7	0,0	0,4	1,3	0,1	0,1	0,4	0,0	0,3	0,9	0,1	0,5	1,8	0,1
P9	0,2	0,2	0,0	0,4	0,5	0,1	1,3	1,7	0,3	0,1	0,2	0,0	1,0	1,3	0,2	0,7	1,0	0,1
P10	0,1	0,4	0,0	0,1	0,3	0,0	0,5	1,7	0,1	0,1	0,3	0,0	0,5	1,5	0,1	1,1	3,5	0,2
P11	0,3	0,5	0,1	0,1	0,1	0,0	1,7	2,9	0,3	0,1	0,1	0,0	0,9	1,6	0,2	1,0	1,8	0,2
P12	0,3	0,6	0,1	0,3	0,6	0,1	0,6	1,1	0,1	0,2	0,3	0,0	0,5	0,9	0,1	0,7	1,3	0,1

FC: fator de contaminação; FE: fator de enriquecimento; IGEO: índice de geoacumulação.

FC, o P2 foi enquadrado com “Contaminação moderada”. A aplicação do FE possibilitou classificar o P1, o P3 e o P8 com “Enriquecimento moderado” e o P2 com “Enriquecimento extremamente alto”, conforme Tabelas 2 e 3. Os resultados do IGEO classificaram todos os pontos amostrais como “Não poluído a poluído”. A ocorrência do ferro em sedimentos está relacionada basicamente com a goethita, a hematita compacta e friável e as formações ferríferas bandadas que ocorrem na área investigada. Porém, valores exacerbados para o P2 possuem relação direta com as atividades antropogênicas, sendo os resíduos escapados das bacias de rejeitos de exploração e beneficiamento do minério de ferro na cabeceira da área de estudo um dos responsáveis pelo enriquecimento desse elemento nos sedimentos para o P2. Porém, a atividade minerária não é a única responsável pelo enriquecimento de

ferro nos sistemas fluviais da bacia do Rio do Peixe, o manejo e o uso e a ocupação do solo inapropriados, aliados aos altos índices pluviométricos, ocasionam maior aporte de ferro para os corpos receptores de água. Além disso, o transporte de minério de ferro pela linha férrea (Estrada de Ferro Vitória a Minas) em torno do Rio do Peixe e a inexistência de mata ciliar favorecem o enriquecimento de ferro nos corpos hídricos por deposição atmosférica provocada pela ação dos ventos. Parra *et al.* (2007), ao estudarem uma bacia com características semelhantes, também constataram o enriquecimento de ferro pelas atividades minerárias exercidas na bacia. Rodrigues *et al.* (2013) salientam que as concentrações excessivas de Fe para os sistemas fluviais podem favorecer a capacidade de adsorção e complexação dos metais tóxicos, devendo, por isso, assim ser monitoradas frequentemente, especialmente as do P2.

Tabela 3 – Resultado do fator de contaminação, fator de enriquecimento e índice de geoacumulação para os metais nos sedimentos de fundo da Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe, no período seco.

Pontos de Amostragens	Al			Ca			Fe			Mn			Ti		
	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO
P1	0,2	-	0,0	0,2	1,1	0,0	0,5	2,2	0,1	1,7	8,2	0,3	0,3	1,4	0,1
P2	0,0	-	0,0	0,1	11,4	0,0	1,2	96,6	0,2	0,2	16,9	0,0	0,1	4,4	0,0
P3	0,3	-	0,1	0,5	2,0	0,1	0,5	2,2	0,1	0,2	0,7	0,0	0,5	1,9	0,1
P4	0,7	-	0,1	0,3	0,4	0,1	0,1	0,1	0,0	0,1	0,1	0,0	0,3	0,4	0,1
P5	0,3	-	0,1	0,4	1,3	0,1	0,6	1,9	0,1	0,1	0,4	0,0	0,5	1,7	0,1
P6	0,6	-	0,1	0,4	0,6	0,1	0,2	0,4	0,0	0,2	0,3	0,0	1,5	2,5	0,3
P7	0,5	-	0,1	0,2	0,4	0,0	0,2	0,4	0,0	0,1	0,3	0,0	0,9	1,8	0,2
P8	0,4	-	0,1	0,4	0,9	0,1	0,4	1,0	0,1	0,2	0,5	0,0	0,5	1,1	0,1
P9	1,0	-	0,2	0,1	0,1	0,0	0,3	0,3	0,1	0,1	0,1	0,0	1,1	1,1	0,2
P10	0,6	-	0,1	0,4	0,6	0,1	0,2	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	0,8	1,3	0,2
P11	0,6	-	0,1	0,2	0,3	0,0	0,2	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	1,4	2,2	0,3
P12	0,1	-	0,0	0,1	0,8	0,0	0,7	6,2	0,1	0,1	1,2	0,0	0,3	3,1	0,1

Pontos de Amostragens	Co			Cr			Cu			Ni			Pb			Zn		
	FC	FE	IGEO	FC	FE	IGEO												
P1	0,4	1,7	0,1	0,2	1,2	0,0	0,7	3,4	0,1	0,2	0,9	0,0	0,4	1,9	0,1	0,4	2,2	0,1
P2	0,0	0,0	0,0	0,0	3,3	0,0	0,1	8,4	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	16,3	0,0
P3	0,2	0,7	0,0	0,1	0,5	0,0	0,8	3,1	0,2	0,1	0,3	0,0	0,7	2,7	0,1	0,8	3,2	0,2
P4	0,1	0,1	0,0	0,2	0,2	0,0	1,1	1,4	0,2	0,1	0,2	0,0	2,6	3,5	0,5	2,4	3,3	0,5
P5	0,2	0,6	0,0	0,2	0,6	0,0	0,7	2,3	0,1	0,1	0,4	0,0	0,6	1,9	0,1	0,6	2,0	0,1
P6	0,2	0,3	0,0	0,1	0,1	0,0	3,1	4,9	0,6	0,1	0,1	0,0	1,4	2,2	0,3	1,7	2,7	0,3
P7	0,4	0,8	0,1	0,2	0,4	0,0	0,6	1,1	0,1	0,2	0,3	0,0	0,6	1,1	0,1	0,6	1,1	0,1
P8	0,2	0,4	0,0	0,2	0,5	0,0	0,5	1,2	0,1	0,1	0,3	0,0	0,4	1,1	0,1	0,6	1,5	0,1
P9	0,1	0,1	0,0	0,6	0,6	0,1	1,4	1,4	0,3	0,2	0,2	0,0	0,8	0,8	0,2	0,4	0,4	0,0
P10	0,2	0,3	0,0	0,3	0,4	0,1	0,5	0,8	0,1	0,1	0,2	0,0	0,9	1,4	0,2	0,5	0,8	0,1
P11	0,2	0,3	0,0	0,1	0,2	0,0	0,5	0,8	0,1	0,1	0,1	0,0	0,9	1,4	0,2	0,8	1,2	0,2
P12	0,0	0,0	0,0	0,1	1,0	0,0	0,2	1,6	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,2	2,0	0,0

FC: fator de contaminação; FE: fator de enriquecimento; IGEO: índice de geoacumulação.

Manganês

Em geral, as concentrações de manganês nos sedimentos oscilaram entre 103,2 e 7270,4 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 175,4 a 5.489,6 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme a Tabela 1. Cruz (2002) e Cunha e Machado (2005) identificaram, em áreas sob influência antrópica mínima no QF, concentrações de manganês em sedimentos de 8.850 a 12.600 mg.kg⁻¹. Considerando o *background* do manganês para sedimentos, todos os pontos de amostragens ficaram abaixo do valor de manganês proposto por Costa (2015): 3.264 mg.kg⁻¹, com exceção apenas para o P1, que apresentou teores equivalentes a 7.270,4 a 5.489,6 mg.kg⁻¹ para as duas campanhas de amostragens. De acordo com os resultados do FC, apenas o P1 apresentou “Contaminação moderada”, conforme Tabelas 2 e 3. Os resultados do FE possibilitaram classificar o P1 com “Enriquecimento significativo” e o P2 com “Enriquecimento muito alto”; enquanto o IGEO classificou o P1 com “Não poluído a poluído”. A ocorrência de manganês nos sedimentos é oriunda do intemperismo de mármores manganíferos e itabiritos manganíferos presentes no Supergrupo Minas, principalmente no Grupo Itabira, mas também nos Grupos Piracicaba e Caraça (DORR, 1969). Mas, apesar de os teores de manganês serem originados de fontes geogênicas, a atividade minerária localizada a montante do P1, do P2 e do P3 tem provocado revolvimento e exposição do substrato litológico às condições intempéricas, que favorecem a disponibilização desse elemento para os corpos hídricos da bacia.

Titânio

Os teores de titânio nos sedimentos variaram de 57,7 a 976,3 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 58,5 a 1.648,3 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme a Tabela 1. Em termos de concentração, esses valores foram inferiores ao valor máximo encontrado por Mendes (2007) e Cruz (2002) em áreas não impactadas no QF, cujos teores alcançados variaram de 1.548,9 a 3.170 mg.kg⁻¹. Em relação ao valor de *background* para o titânio, o P6 (1.648,3 mg.kg⁻¹), o P9 (1.200,9 mg.kg⁻¹) e o P11 (1.461,6 mg.kg⁻¹) apresentaram valores superiores no período seco em relação ao número sugerido por Costa (2015): 1072,34 mg.kg⁻¹. Os resultados do FC classificaram o P6, o P9 e o P11 com “Contaminação moderada”, conforme Tabelas 2 e 3. A aplicação do FE permitiu enquadrar o P6, o P11 e o P12 com “Enriquecimento moderado”, e o P2 com “Enriquecimento significativo”; enquanto para os resultados do IGEO, a maioria dos pontos foi classificada como “Não poluído a poluído”. Os altos teores de titânio para o P6, o P9 e o P11 revelam relação direta da assinatura geoquímica de rochas máficas e ultramáficas, filitos, quartzitos e xistos da Formação Suíte Borrachudo e do Grupo Serra Negra Litofácies Metavulcanossedimentar. Porém, a substituição da vegetação nativa por pastagens em quase 50% do território da bacia provocou a exposição dos solos e das rochas, que, aliada ao despejo de efluentes domésticos das residências, proporcionou a disponibilização desse elemento para os corpos hídricos da bacia (MATSCHULLAT *et al.*, 2000; COSTA, 2015).

Cobalto

As concentrações de cobalto nos sedimentos variaram entre 2,9 e 23,8 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 2,4 a 12,0 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme Tabela 1. Em termos de concentração, Cruz (2002) e Mendes (2007) constaram em áreas não impactadas no QF teores de 85 a 95,6 mg.kg⁻¹ de cobalto em sedimentos. Oliveira (1999) ao determinar o teor de cobalto em sedimentos no Parque Estadual do Itacolomi encontrou valor máximo de 22 mg.kg⁻¹. Rhodes (2010) e Parra *et al.* (2007) ao estudarem os teores de cobalto em sedimentos de bacias com características semelhantes, encontraram valores de 12,6 a 13,7 mg.kg⁻¹. Em relação ao *background*, esses teores foram inferiores ao valor proposto por Costa (2015) para o cobalto no QF: 30,72 mg.kg⁻¹, cuja concentração é de 30,72 mg.kg⁻¹. Os resultados do FC possibilitaram classificar todos os pontos de amostragens com “Baixa contaminação”, conforme Tabelas 2 e 3. As aplicações do FE permitiram classificar todos os pontos de amostragens com “Deficiência de enriquecimento”. Os valores do IGEO classificaram todos os pontos de amostragens como “Não poluído a poluído”. As maiores concentrações de cobalto nos sedimentos para o P7 estão associadas aos processos intempéricos das rochas máficas e metaltramáficas da Formação do Grupo Serra Negra. Teores destacáveis de cobalto para o P7 podem ter tanto associações de fontes geogênicas como antropogênicas, visto que esse ponto de amostragens abriga atividades agropecuárias e silviculturais que podem estar utilizando agroquímicos à base de cobalto.

Cobre

As concentrações de cobre em sedimentos oscilaram entre 1,3 e 87,9 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 5,1 a 147,7 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme Tabela 1. Valores máximos entre 89 e 123 mg.kg⁻¹ de cobre em sedimentos foram relatados por Cunha e Machado (2005) e Cruz (2002) em regiões não impactadas no QF. Considerando o *background*, esses teores foram inferiores ao valor de *background* para o cobre no QF preconizado por Costa (2015): 48,34 mg.kg⁻¹, com exceção para o P4 (50,8 mg.kg⁻¹), o P5 (87,9 mg.kg⁻¹), o P6 (147,7 mg.kg⁻¹), o P9 (61,6–67,7 mg.kg⁻¹) e o P11 (79,9 mg.kg⁻¹), que apresentaram resultados superiores. A determinação do FC permitiu classificar o P4, o P5, o P9 e o P11 com “Baixa contaminação”, e o P6 com “Baixa considerável”, conforme Tabelas 2 e 3. A aplicação do FE enquadrou o P4, o P7, o P8, o P10 e o P12 com “Deficiência de enriquecimento”; o P1, o P3, o P5 e o P11 com “Enriquecimento moderado”; e o P2 com “Enriquecimento significativo”. De acordo com o IGEO, todos os pontos amostrais foram classificados como “Não poluído a poluído”. Os teores elevados de cobre para o P4, o P5, o P6, o P9 e o P11 podem ter sido originados tanto dos processos intempéricos de olivina, piroxênio, anfíbólio, biotita, plagioclásio e magnetita como da utilização de sulfato de cobre e do manejo incorreto das atividades agropecuárias e silviculturais, que têm exposto as rochas a acelerado processo de intemperismo.

Níquel

Os teores de níquel em sedimentos variaram entre 6,5 e 17,3 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 5,6 a 16,5 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme Tabela 1. Em termos de concentrações, teores máximos de níquel em sedimentos entre 44 e 100 mg.kg⁻¹ foram constatados por Oliveira (1999) e Cruz (2002) no QF. Considerando os valores *background* para o níquel em sedimentos, todos os pontos de amostragem encontram-se com concentrações inferiores ao preconizado por Costa (2015): 80,12 mg.kg⁻¹. Rhodes (2010) e Parra *et al.* (2007), ao estudarem os teores de níquel em sedimentos de bacias com características semelhantes, encontraram valores máximos de até 34,92 mg.kg⁻¹. Larizzatti, Marques e Silveira (2014) encontraram no QF teor máximo de níquel nos sedimentos de fundo de 23,36 mg.kg⁻¹. De acordo com o FC, todos os pontos de amostragens apresentaram “Baixa contaminação”, conforme Tabelas 2 e 3. A aplicação do FE permitiu enquadrar todos os pontos de amostragens com “Deficiência de enriquecimento”. Os resultados do IGEO apontaram ausência de contaminação de níquel para todos os pontos amostrais, classificando-os como “Não poluídos”. O P1, o P5, o P7 e o P9, que apresentaram os maiores teores de níquel em sedimentos, exibem relação direta com os intemperismos de rochas metalúrgicas e metamáficas tholeiíticas da Formação do Grupo Serra Negra Litofácies Metavulcanossedimentar. Porém, não se descarta hipótese de utilização de sulfato de níquel como fertilizante nas culturas existentes nas imediações desses pontos.

Chumbo

Os teores de chumbo em sedimentos variaram entre 10,8 e 44,9 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 17,5 a 117,7 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme Tabela 1. Cruz (2002) encontrou teor de chumbo em área não impactada ou sob influência antrópica mínima no QF de até 107 mg.kg⁻¹. Rhodes (2010) e Parra *et al.* (2007), ao estudarem os teores de chumbo em sedimentos de bacias com características semelhantes, encontraram valores entre 40,62 e 49,55 mg.kg⁻¹. Larizzatti, Marques e Silveira (2014) encontraram teor máximo de chumbo de até 114,91 mg.kg⁻¹. Considerando os valores *background* para o chumbo, todos os pontos de amostragens encontram-se com concentrações inferiores ao preconizado por Costa (2015): 45,4 mg.kg⁻¹, com exceção apenas para o P4 (117,7 mg.kg⁻¹) e o P6 (62,9 mg.kg⁻¹), que apresentaram concentrações superiores. O FC classificou todos os pontos de amostragens com “Baixa contaminação”, conforme Tabelas 2 e 3. Já o P4, o P5, o P9 e o P11, também pelo FC, foram classificados com “Baixa contaminação”, e o P6 foi considerado com “Baixa considerável”. O FE enquadrou apenas o P1 e o P12 com “Deficiência de enriquecimento”, os demais foram considerados com “Enriquecimento moderado”; enquanto o IGEO classificou todos os pontos amostrais como “Não poluído a poluído”. A ocorrência de chumbo em sedimentos da bacia pode ter sido originada nos processos intempéricos das rochas de álcali-feldspato granito

e pegmatitos associadas da Formação Suíte Borrachudos. Porém, teores elevados de chumbo nos sedimentos para o P4 podem ter associações com o Distrito Industrial de Itabira, localizado a montante do ponto de captação de água para abastecimento humano investigado.

Zinco

Os teores de zinco em sedimentos variaram entre 11,9 e 133,0 mg.kg⁻¹ no período úmido e de 21,6 a 257,3 mg.kg⁻¹ no período seco, conforme Tabela 1. Cruz (2002) e Cunha e Machado (2005) encontraram teores máximos de zinco em sedimentos entre 116 e 171 mg.kg⁻¹ em áreas não impactadas ou sob influência antrópica mínima no QF. Considerando o valor de *background* para o zinco, todos os pontos de amostragens encontram-se com concentrações inferiores ao preconizado por Costa (2015): 105,40 mg.kg⁻¹. O FC permitiu classificar todos os pontos de amostragens com “Baixa contaminação”, excetuando-se o P4, o P5, o P6 e o P10, que foram enquadrados com “Contaminação moderada”, conforme Tabelas 2 e 3. A aplicação do FE permitiu classificar o P1, o P2, o P3, o P4, o P5, o P6, o P10 e o P12 com “Enriquecimento moderado”, e o P2 com “Enriquecimento muito alto”; enquanto o IGEO considerou todos os pontos amostrais como “Não poluído a poluído”. A ocorrência de zinco em sedimentos pode ter sido originada nos processos intempéricos de rochas sulfetadas, como calcopirita e esfarelita presentes na área investigada. Porém, teores elevados de zinco nos sedimentos observados no P4 podem ter associações com o Distrito Industrial de Itabira, localizado a montante desse ponto investigado.

CONCLUSÃO

No presente estudo foi possível verificar a distribuição espacial dos metais Al, Ca, Co, Cr, Cu, Fe, Mn, Ni, Pb, Ti e Zn nos sedimentos de fundos na Bacia Hidrográfica do Rio do Peixe. A utilização dos valores de *background* regional como subsídio nas investigações ambientais na bacia permitiu identificar os valores anômalos e das fontes poluidoras na bacia. As investigações das possíveis interferências antrópicas na qualidade dos sedimentos de fundo da bacia, a partir da análise comparativa dos resultados com o valor de *background* regional e as aplicações dos indicadores de qualidade de sedimentos, mostraram-se coerentes entre si.

Não foram observadas diferenças destacáveis dos índices calculados para os metais em sedimentos entre período chuvoso e período seco na bacia hidrográfica do Rio do Peixe. Os resultados obtidos pelos indicadores de qualidade FC, FE e IGEO demonstraram que, de forma geral, está ocorrendo poluição nos sedimentos por origem antrópica, principalmente para os metais Ca, Co, Cu, Fe, Mn, Pb e Zn. Valores destacáveis dos indicadores FC, FE e IGEO para o P1, o P2 e o P3 corroboram a afirmativa de que o revolvimento e a exposição dos

substratos litológicos pela atividade minerária, o despejo de efluentes domésticos do núcleo urbano de Itabira (sem o devido tratamento) e os resíduos das atividades industriais são os prováveis responsáveis pela disponibilização e pelo enriquecimento dos metais Ca, Fe, Mn, Ni, Ti e Zn nos sedimentos. Observou-se aumento de Al, Cu, Ni e Zn para o P4. Taxas incrementais desses elementos para o P4 mostram que os resíduos das atividades realizadas no Distrito Industrial de Itabira podem estar favorecendo a contaminação dos sedimentos nessa área. A exposição e a degradação dos solos, o despejo de efluentes domésticos sem tratamento e os resíduos das atividades agropecuárias e silviculturais no P6, no P7, P8, no P9, no P10 e no

P11 podem ter influenciado nos teores elevados de Al, Ca, Co, Cu, Mn nos sedimentos de fundo.

Portanto, conclui-se que as atividades antrópicas realizadas na bacia propiciaram a mobilização e a disponibilização dos metais para os sistemas fluviais da mesma. Nesse sentido, recomendam-se o monitoramento e a fiscalização mais rigorosa para os pontos de amostragens que apresentaram valores elevados de FC, FE e IGEO, visto que quaisquer mudanças que venham a ocorrer em função das atividades antrópicas podem alterar as condições ambientais e favorecer ainda mais a disponibilização dos metais para o sistema hídrico, podendo causar danos irreversíveis à população e à cadeia alimentar.

REFERÊNCIAS

- ABRAHIM, G.M.S.; PARKER, R.J. (2008) Assessment of heavy metal enrichment factors and the degree of contamination in marine sediments from Tamaki Estuary, Auckland, New Zealand. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 136, n. 1-3, p. 227-238. <https://doi.org/10.1007/s10661-007-9678-2>
- ANDRADE, J.A.M. (2000) *Geoambiental da Cabeceira do Rio das velhas - APA Cachoeira das Andorinhas, Ouro Preto, Minas Gerais*. 188 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- CHEN, C.W.; KAO, C.M.; CHEN, C.F.; DONG, C.D. (2007) Distribution and accumulation of heavy metals in the sediments of Kaohsiung Harbor, Taiwan. *Chemosphere*, v. 66, n. 8, p. 1431-1440. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2006.09.030>
- COSTA, A.T.; NALINI, H.A.; CASTRO, P.T.A.; LENA, J.C.; MORGENSTERN, P.; FRIESE, K. (2006) Sediment contamination in floodplains and alluvial terraces as an historical record of gold exploitation in the Carmo River basin, Southeast Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. *Acta Hydrochimica et Hydrobiologica*, v. 34, n. 3, p. 245-256. <https://doi.org/10.1002/aheh.200400625>
- COSTA, R.D.V.F.D. (2015) *Mapeamento geoquímico e estabelecimento de valores de referência (background) de sedimentos fluviais do Quadrilátero Ferrífero*. 185 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- CRUZ, L.V. (2002) *Avaliação geoquímica ambiental da Estação Ecológica do Tripuí e adjacências, sudeste do quadrilátero ferrífero - MG*. 147 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- CUNHA, F.G.; MACHADO, G.J. (2005) *Projeto APA Sul RMBH: geoquímica ambiental, mapas geoquímicos escala 1:225.000*. Belo Horizonte: SEMAD/CPRM. v. 7. 80 p.
- DESCHAMPS, E.; MATSCHULLAT, J. (2007) *Arsênio antropogênico e natural: um estudo em regiões do Quadrilátero Ferrífero*. Belo Horizonte: Fundação Estadual do Meio Ambiente.
- DORR, J.V.N. (1969) *Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil*. Washington, DC.: U.S. Government Printing Office.
- FRANZ, C.; MAKESCHIN, F.; WEIß, H.; LORZ, C. (2013) Geochemical signature and properties of sediment sources and alluvial sediments within the Lago Paranoá catchment, Brasília DF: A study on anthropogenic introduced chemical elements in an urban river basin. *Science of the Total Environment*, v. 452, n. 452-453, p. 411-420. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2013.02.077>
- GHREFAT, H.A.; ABU-RUKAH, Y.; ROSEN, M.A. (2011) Application of geoaccumulation index and enrichment factor for assessing metal contamination in the sediments of Kafraïn Dam, Jordan. *Environmental Monitoring and Assessment*, v. 178, n. 1-4, p. 95-109. <https://doi.org/10.1007/s10661-010-1675-1>
- GONÇALVES, G.H.T. (2010) *Avaliação geoambiental de bacias contíguas situadas na área de proteção ambiental Cachoeira das Andorinhas e floresta estadual do Uaimi, Ouro Preto/MG: diagnóstico e percepção ambiental*. 129 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Ambiental) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- GRESENS, R.L. (1967) Composition-volume relationships of metasomatism. *Chemical geology*, v. 2, p. 47-65. [https://doi.org/10.1016/0009-2541\(67\)90004-6](https://doi.org/10.1016/0009-2541(67)90004-6)
- HAKANSON, L. (1980) An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. *Water Research*, v. 14, n. 8, p. 975-1001. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(80\)90143-8](https://doi.org/10.1016/0043-1354(80)90143-8)
- HANIF, N.; EQANI, S.A.M.A.S.; ALI, S.M.; CINCINELLI, A.; ALI, N.; KATSOYIANNIS, I.A.; TANVEER, Z.I.; BOKHARI, H. (2016) Geoaccumulation and enrichment of trace metals in sediments and their associated risks in the Chenab River, Pakistan. *Journal of Geochemical Exploration*, v. 165, p. 62-70. <https://doi.org/10.1016/j.gexplo.2016.02.006>
- LARIZZATTI, J.H.; MARQUES, E.D.; SILVEIRA, F.V. (2014) *Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno - MG*. Rio de Janeiro: CPRM. (Informe de Recursos Minerais, Rio de Janeiro, n. 2).

- LOSKA, K.; WIECHULA, D.; KORUS, I. (2004) Metal contamination of farming soils affected by industry. *Environment International*, v. 30, n. 2, p. 159-165. [https://doi.org/10.1016/S0160-4120\(03\)00157-0](https://doi.org/10.1016/S0160-4120(03)00157-0)
- MARENGO, E.; GENNARO, M.C.; ROBOTTI, E.; ROSSANIGO, P.; RINAUDO, C.; ROZ-GASTALDI, M. (2006) Investigation of anthropic effects connected with metal ions concentration, organic matter and grain size in Bormida river sediments. *Analytica Chimica Acta*, v. 560, n. 1, p. 172-183. <https://doi.org/10.1016/j.aca.2005.11.086>
- MATSCHULLAT, J.; BORBA, R.P.; DESCHAMPS, E.; FIGUEIREDO, B.R.; GABRIO, T.; SCHWENK, M. (2000) Human and environmental contamination in the Iron Quadrangle, Brazil. *Applied Geochemistry*, v. 15, n. 2, p. 181-190. [https://doi.org/10.1016/S0883-2927\(99\)00039-6](https://doi.org/10.1016/S0883-2927(99)00039-6)
- MENDES, M.A.M. (2007) *Influência antrópica nas características hidrossedimentológicas e geoquímicas da bacia do ribeirão Caraça, Quadrilátero Ferrífero, MG*. 90 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- MENDONÇA, F.P.C. (2012) *Influência da Mineração na Geoquímica das Águas Superficiais e dos Sedimentos no Alto Curso da Bacia do Ribeirão Mata Porcos, Quadrilátero Ferrífero - Minas Gerais*. 131 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- MENESES, I.; RENGER, F.E.; DESCHAMPS, E. (2011) History and socioeconomy—Iron Quadrangle. In: DESCHAMPS, E.; MATSCHULLAT, J. *Arsenic: natural and anthropogenic*. Flórida: CRC Press. v. 4, p. 73-80.
- MÜLLER, G. (1969) Index of geoaccumulation in the sediments of the Rhine River. *Geojournal*, v. 2, n. 3, p. 108-118.
- OLIVEIRA, M.R. (1999) *Investigação da contaminação por metais pesados no sedimento de corrente e água do Parque Estadual do Itacolomi, Minas Gerais e arredores*. 180 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- PARRA, R.R.; ROESER, H.M.P.; LEITE, M.G.P.; NALINI JR., H.A.; GUIMARÃES, A.T.A.; PEREIRA, J.C.; FRIESE, K. (2007) Influência Antrópica na Geoquímica de Água e Sedimentos do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais-Brasil. *Geochimica Brasiliensis*, v. 21, n. 1, p. 36-49. <https://doi.org/10.21715/gbv.21i1.255>
- RAURET, G.; LOPEZ-SANCHEZ, J.F.; LUCK, D.; YLI-HALLA, M.; MUNTAU, H.; QUEVAUVILLER, P. (2001) *The certification of the extractable contents (mass fractions) of Cd, Cr, Cu, Ni, Pb and Zn in freshwater sediment following sequential extraction procedure-BCR 701*. Bruxelles: BCR Information European Commission. BCR Information. Reference Materials Report EUR, 19775.
- REIS, D.A.; SANTIAGO, A.F.; NASCIMENTO, L.P.; ROESER, H.M.P. (2017) Influence of environmental and anthropogenic factors at the bottom sediments in a Doce River tributary in Brazil. *Environmental Science and Pollution Research*, p. 7456-7467. <https://doi.org/10.1007/s11356-017-8443-5>
- RHODES, V.D.P. (2010) *Distribuição de mercúrio e arsênio nos sedimentos da área afetada por garimpo de ouro - Rio Gualaxo do Norte, Mariana, MG*. 93 f. Dissertação (Mestrado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto.
- RODRIGUES, A.S.L.; MALAFAIA, G.; COSTA, A.T.; NALINI JR., H.A. (2013) Background values for chemical elements in sediments of the Gualaxo Do Norte River Basin, MG, Brazil. *Revista de Ciências Ambientais*, v. 7, n. 2, p. 15-32.
- SALEEM, M.; IQBAL, J.; SHAH, M.H. (2015) Geochemical speciation, anthropogenic contamination, risk assessment and source identification of selected metals in freshwater sediments—A case study from Mangla Lake, Pakistan. *Environmental Nanotechnology, Monitoring & Management*, v. 4, p. 27-36. <https://doi.org/10.1016/j.enmm.2015.02.002>
- SERVIÇO GEOLÓGICO DO BRASIL (CPRM); COMPANHIA DE DESENVOLVIMENTO ECONÓMICO DE MINAS (COMIG). (2014) *Mapa geológico do estado de Minas Gerais*. Escala 1:1.000.000. Belo Horizonte: Convênio COMIG/CPRM.
- UNITED STATES GEOLOGICAL SURVEY (USGS). Disponível em: <<http://earthexplorer.usgs.gov/>>. Acesso em: 17 jan. 2015.