

**Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da  
Área Ambiental I – Porção Capixaba do Rio Doce e Região  
Marinha e Costeira Adjacente**

**RELATÓRIO SEMESTRAL – SEÇÃO 3:**

**Anexo 1 – Ecotoxicologia**

**RT-05 RRDM/JUN19**

**Coordenação Geral**

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Junho de 2019

## COORDENAÇÕES

### COORDENAÇÕES POR ANEXO

#### Anexo 1

Adalto Bianchini (FURG)

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>31</b>
<b>2</b>	<b>SUBPROJETO: MONITORAMENTO DO AMBIENTE DULCÍCOLA (RIO DOCE)</b> .....	<b>34</b>
2.1	OBJETIVO .....	34
2.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	34
2.2.1	Área de estudo .....	34
2.2.2	Análise dos parâmetros físicos e químicos e concentração de metais na água e sedimento.....	37
2.2.3	Concentração de metais na biota .....	48
2.2.4	Análise de biomarcadores .....	61
2.2.5	Análises histopatológicas.....	65
2.2.6	Análise integrada dos resultados .....	76
2.2.7	Discussão geral sobre os efeitos biológicos .....	94
2.3	CONCLUSÃO .....	98
2.4	REFERÊNCIAS .....	100
<b>3</b>	<b>SUBPROJETO: MONITORAMENTO DO AMBIENTE MARINHO (FOZ DO RIO DOCE E REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE)</b> .....	<b>107</b>
3.1	OBJETIVO .....	107
3.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	107
3.2.1	Área de estudo .....	107
3.2.2	Parâmetros físico-químicos e análise de metais na água e sedimento.....	110
3.2.3	Análise Integrada .....	122
3.2.4	Concentração de metais na biota .....	125
3.2.5	Análise de Biomarcadores.....	142
3.2.6	Unidades de Conservação .....	172
3.2.7	Discussão geral .....	183
3.3	CONCLUSÃO .....	185

3.4	REFERÊNCIAS .....	186
<b>4</b>	<b>SUBPROJETO: MONITORAMENTO DA COMPOSIÇÃO DA MICROBIOTA EM AMOSTRAS DE ÁGUA, SEDIMENTO E CORAL .....</b>	<b>192</b>
4.1	OBJETIVO .....	192
4.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	192
<b>4.2.1</b>	<b>Resultados - Rio Doce.....</b>	<b>197</b>
<b>4.2.2</b>	<b>Resultados – Ambiente marinho: Foz do Rio Doce e região costeira adjacente.....</b>	<b>207</b>
<b>4.2.3</b>	<b>Resultados – Corais .....</b>	<b>216</b>
4.3	CONCLUSÃO .....	222
4.4	REFERÊNCIAS .....	224
<b>5</b>	<b>SUBPROJETO: MONITORAMENTO DA TOXICIDADE DE AMOSTRAS DE ÁGUA E SEDIMENTO .....</b>	<b>225</b>
5.1	OBJETIVO .....	225
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	225
5.3	CONCLUSÃO .....	239
5.4	REFERÊNCIAS .....	240
<b>6</b>	<b>SUBPROJETO: MONITORAMENTO DO AMBIENTE PRAIAL.....</b>	<b>242</b>
6.1	OBJETIVO .....	242
6.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	242
<b>6.2.1</b>	<b>Área de Estudo.....</b>	<b>242</b>
<b>6.2.2</b>	<b>Análise de metais e parâmetros físico-químico da água e sedimento .....</b>	<b>243</b>
<b>6.2.3</b>	<b>Análise da concentração de metais e níveis de biomarcadores na biota .....</b>	<b>252</b>
6.3	CONCLUSÃO .....	277
6.4	REFERÊNCIAS .....	278
<b>7</b>	<b>SUBPROJETO: MONITORAMENTO DOS MANGUEZAIS .....</b>	<b>280</b>
7.1	OBJETIVO .....	280
7.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	280

7.3	CONCLUSÃO .....	297
7.4	REFERÊNCIAS .....	298
<b>8</b>	<b>SUBPROJETO: MONITORAMENTO DE AVES.....</b>	<b>300</b>
8.1	OBJETIVO .....	300
8.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	300
<b>8.2.1</b>	<b>Área 1 - Aracruz/ES (mangue) .....</b>	<b>310</b>
<b>8.2.2</b>	<b>Área 2 - Regência/ES (estuário e litoral).....</b>	<b>315</b>
<b>8.2.3</b>	<b>Área 3 - São Mateus (litoral, estuário e mangue) .....</b>	<b>323</b>
8.3	CONCLUSÃO .....	331
8.4	REFERÊNCIAS .....	332

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1: Mapa com os pontos e áreas de coleta de amostras ambientais e biológicas no âmbito do Anexo 1. .... 32
- Figura 2: Mapa amostral das campanhas de monitoramento ecotoxicológico na porção capixaba do Rio Doce e estuário e lagoas adjacentes, realizadas na estação seca (setembro/outubro de 2018) e na estação chuvosa (janeiro/fevereiro de 2019). A nomenclatura das estações amostrais bem como as respectivas coordenadas geográficas encontram-se descritas na Tabela 1. .... 35
- Figura 3: Imagens representativas dos pontos de coleta ao longo da porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacentes: Rio Guandu (A); Lagoa do Limão (B); Lagoa Nova (C); Lagoa Juparanã (D); trecho do Rio Doce em Linhares (E); trecho do Rio Doce em Regência (F); Lagoa do Areão (G); Lagoa do Areal (H); Lagoa Monsaras (I) e Foz do Rio Doce (J). Fotos: Carlos Eduardo Delfino Vieira. .... 36
- Figura 4: Fotos das espécies coletadas ao longo da porção capixaba da bacia do Rio Doce, estuário e áreas adjacentes durante monitoramento ecotoxicológico realizado na estação seca (set/2018). A = cascudo (*Hypostomus* sp.); B = tucunaré (*Cichla* sp.); C = mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*); D = curimatá (*Prochilodus vimboides*); E = bagre cumbaca (*Trachelyopterus striatulus*); F = lambari-dorabo-amarelo (*Astyanax* sp.); G= traíra (*Hoplias malabaricus*), H= acará (*Geophagus brasiliensis*); I = pacu manchado (*Metynnis maculatus*); J= cascudo chinelo (*Loricariichthys castaneus*); K= piranha vermelha (*Pygocentrus nattereri*); L= caçari (*Genidens genidens*); M = carapeba (*Eucinostomus* sp.); N = peixe-galo (*Selene vomer*); O= tamboatá (*Hoplosternum litoralle*); P= ticupá (*Pomadasys ramosus*); Q = espécie de girino; R = *Macrobrachium acanthurus*; S= *M. jelskii*; e T = *M. amazonicum*. .... 49
- Figura 5: Concentração de Cromo (Cr), Cádmiio (Cd) e Zinco (Zn) (mg/kg de peso úmido) em Fitoplâncton; Zooplâncton; brânquia, hepatopâncreas e músculo de camarão; e brânquia, fígado e músculo de peixe nos dez pontos amostrados na campanha de monitoramento dulcícola. Destaque para o ponto no Rio Doce em Regência (RDR) que apresentou a maior concentração desses metais nos três subgrupos avaliados. Os dados estão apresentados como média  $\pm$  erro padrão. .... 51
- Figura 6: Alterações morfológicas no fígado dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A: necrose (seta grossa); B: Infiltrado inflamatório (seta grossa) e congestão de vaso sanguíneo (seta fina); C, D e E: Alteração nuclear (seta fina); F: Hemorragia (seta grossa) e vacuolização (seta fina); G: Esteatose (seta grossa) e fibrose (seta fina); H: Hipertrofia dos hepatócitos (seta grossa). Coloração: Hematoxilina & Eosina (A, B, C, D, E, F e H); Tricrômio de Mallory (G). Barras: 25  $\mu$ m = E; 50  $\mu$ m = A, B, C, D, F e H; 100  $\mu$ m = G. .... 72
- Figura 7: Lesões hepáticas dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A e B: Parasita (seta grossa) e hepatopâncreas (seta fina); C: Centro de melanomacrófago; D: Alteração nuclear (seta fina) e inclusões citoplasmáticas (seta grossa); E: Congestão de vaso sanguíneo (seta fina) e atrofia nuclear (seta grossa); F: Tumor benigno (asterisco); G: Tumor maligno (asterisco) e vacuolização (seta

grossa). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: 25  $\mu\text{m}$  = B; 50  $\mu\text{m}$  = C, D, E; 100  $\mu\text{m}$  = A, F e G. .... 73

Figura 8: Lesões encontradas nas brânquias dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A: Aneurisma nas lamelas secundárias (seta grossa); B: Descamação do Epitélio Branquial (seta fina); C: Hiperplasia total das lamelas secundárias (asterisco) e infiltração de leucócitos (seta fina); D: Parasita (seta grossa); E: Fusão das lamelas secundárias (seta grossa); F: Necrose do tecido branquial (seta grossa); G: Hiperplasia das células de muco (seta fina). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: 50  $\mu\text{m}$  = B e G; 100  $\mu\text{m}$  = A, C, D E, F..... 75

Figura 9: Alterações morfológicas nas brânquias dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A: Atrofia da lamela primária (seta fina) e secundária (seta grossa); B: Deslocamento da lamela primária (círculo); C: Tumor benigno (seta grossa); D: Tumor maligno (seta grossa). Coloração: Hematoxila & Eosina. Barra: 50  $\mu\text{m}$  = D; 100  $\mu\text{m}$  = A, B e C. .... 76

Figura 10: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água de fundo (fT), no sedimento (S) e no fitoplâncton (fit) e biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (MT) nos organismos. A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal. .... 78

Figura 11: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas na comunidade fitoplanctônica com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente. .... 79

Figura 12: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas e abióticas e das estações amostrais ao longo da porção capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]). .... 80

Figura 13: Representação gráfica de correlações par a par entre as variáveis abióticas (concentrações de metais na água e sedimento) e biológicas (biomarcadores e concentrações de metais nos organismos) mensuradas na comunidade fitoplanctônica coletada ao longo da porção capixaba do Rio Doce (set/2018). Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0,05$ ) são mostradas na figura. .... 81

- Figura 14: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água de fundo (fT), no sedimento (S) e no zooplâncton (zoo) e biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (MT) nos organismos. A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal. .... 83
- Figura 15: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas na comunidade zooplânctônica com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente (Dim). .... 84
- Figura 16: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas e abióticas e das estações amostrais ao longo da porção capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]). .... 85
- Figura 17: Representação gráfica das correlações par a par entre as variáveis abióticas (concentrações de metais na água e sedimento) e biológicas (biomarcadores e concentrações de metais nos organismos) mensuradas na comunidade zooplânctônica coletada ao longo da porção capixaba do Rio Doce (set/2018). Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0,05$ ) são mostradas na figura. .... 86
- Figura 18: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água de fundo (fT), no sedimento (S) e nos camarões (brânquias = b; hepatopâncreas = e músculo = m) e biomarcadores de dano lipídico (LPO), danos oxidativos em proteínas (PCO), conteúdo de metalotioneínas (MT) e atividade da Na/K ATPase (NKA). A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal. .... 88
- Figura 19: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas nos camarões com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com o componente específico. .... 89
- Figura 20: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas e abióticas e das estações amostrais ao longo da porção

capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]). ..... 90

Figura 21: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) na água de fundo (fT), no sedimento (S) e nas brânquias (b), fígado (f) e músculo (m) dos peixes e biomarcadores de dano lipídico (LPO), dano oxidativo em proteínas (PCO), conteúdo de metalotioneínas (MT), atividade da catalase (CAT), lactato desidrogenase (LDH), malato desidrogenase (MDH), frequência de micronúcleos (MN) e índice de alterações histológicas na brânquia (IH\_b), fígado (IH\_f) e no animal (IH\_A [somatória de alterações observadas nos dois órgãos]). A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal. .... 91

Figura 22: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas em espécies de peixes coletadas na porção capixaba da bacia do Rio Doce com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente. .... 92

Figura 23: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas mensuradas na comunidade de peixes e abióticas das estações amostrais ao longo da porção capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]). ..... 93

Figura 24: Representação gráfica das correlações par a par entre as variáveis abióticas (concentrações de metais na água e sedimento) e biológicas (biomarcadores e concentrações de metais nos organismos) mensuradas na comunidade de peixes coletados ao longo da porção capixaba do Rio Doce (set/2018). Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0,05$ ) são mostradas na figura. .... 94

Figura 25: Mapa amostral das 25 estações de coleta da Campanha Marinha 1 e 2, referente ao Anexo 1- Ecotoxicologia. A nomenclatura das estações amostrais bem como as respectivas coordenadas geográficas encontram-se descritas no Quadro 4. .... 109

Figura 26: Análise de Componentes Principais aplicadas para os dados de concentração de metais na água e no sedimento. O código sT e sD indicam determinações de metais realizadas em água superficial nas frações total e dissolvida, respectivamente. O código fT e fD indicam determinações

realizadas em água de fundo nas frações total e dissolvida, respectivamente. O código S indica determinações de metais realizadas nas amostras de sedimento. ....	122
Figura 27: Concentração (a) de Cromo (Cr), (b) Ferro (Fe) e (d) Manganês (Mn) no sedimento (mg/kg peso seco) por estação amostral, considerando médias e erro padrão. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte. ....	124
Figura 28: Fotos das espécies coletadas durante a Campanha Marinha 1 e 2 do Anexo 1 em diferentes estações amostrais. ....	125
Figura 29: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$ peso úmido) de (a) Cromo (Cr), (b) Ferro em amostras do compartimento fitoplâncton. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho. ....	131
Figura 30: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$ peso úmido) de (a) Cromo (Cr) e (b) Ferro em amostras do compartimento zooplâncton. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho. ....	132
Figura 31: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$ peso úmido) de (a) Cromo (Cr) e (b) Ferro (Fe) no hepatopâncreas de camarão. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho. ....	136
Figura 32: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$ peso úmido) de Cromo em diferentes tecidos de peixe, (a) Brânquia, (b) Fígado e (c) Músculo. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho. ....	141
Figura 33: Diagrama de ordenação obtido a partir da análise de componentes principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água (a), sedimento (S) e no fitoplâncton (fit), e biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (Metalto) nos organismos. ....	144
Figura 34: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente ....	145
Figura 35: Diagrama de ordenação (biplot) a partir da análise de componentes principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água (a), sedimento (S) e no zooplâncton (zoo), e biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (Metalto) nos organismos. ....	146

- Figura 36: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente. .... 147
- Figura 37: Análise de Componentes Principais para os dados de contaminação ambiental e dados de camarões coletados na Campanha I. .... 150
- Figura 38: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente. .... 151
- Figura 39: Índice de Alteração Histológica da brânquia de peixes coletados na campanha I. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho. Valores de IAH acima do indicado pela linha azul (10) são indicativos de dano leve a moderado; Valores acima da linha vermelha (50) são indicativos de dano severo ao tecido. .... 169
- Figura 40: *Biplot* de uma PCA realizada a partir de dados de bioacumulação e respostas biológicas no fitoplâncton (LPO e Metalotioneínas), e dados de contaminação na água e sedimento..... 170
- Figura 41: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente. .... 171
- Figura 42: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) na água de fundo (fT), no sedimento (S), e biomarcadores de dano lipídico (LPO), Ca<sup>2+</sup>-ATPase (CaATP), Mg<sup>2+</sup>-ATPase (MgATP), atividade da anidrase carbônica (AC) em amostras de corais e hidrocorais. A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal. .... 173
- Figura 43: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente. .... 174
- Figura 44: Concentração dos metais analisados na água de quatro pontos amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04). Cada metal foi confrontado com os valores máximos (representado no gráfico como linha em vermelho) estabelecidos pela resolução do CONAMA 357/2005 para água salobra (convertido para unidade µg/L). .... 177

Figura 45: Concentração dos metais analisados no sedimento de pontos amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04). Para cada metal os valores estão apresentados como média $\pm$ erro padrão ( $\mu\text{g/g}$ ).....	178
Figura 46: Concentração dos metais analisados no fitoplâncton nos pontos amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04). ....	179
Figura 47: Biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (MT) mensurados em amostras de pool de fitoplâncton e zooplâncton amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04). ....	180
Figura 48: Níveis de acúmulo de metais no zooplancton coletado dentro da área de Revis de Santa Cruz (CA1 e CA2) e APA Costa das Algas (CA3, CA4 e CA5). ....	181
Figura 49: LPO e MT no zooplancton coletado dentro da área de Revis de Santa Cruz e APA Costa das Algas.....	182
Figura 50: Danos oxidativos (em lipídios e proteínas), atividade da enzima antioxidante Catalase, e índice de alterações histopatológicas em peixes coletados em estações amostrais dentro da área de Revis de Santa Cruz (CA1 e CA2) e APA Costa das Algas (CA4). ....	182
Figura 51: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”. ....	197
Figura 52: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”. ....	198
Figura 53: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”. ....	199
Figura 54: Análise de PCA das amostras de água de superfície do Rio Doce. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise. ....	200
Figura 55: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”. ....	201

Figura 56: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas das Ordens mais frequentemente encontrados bem como as menos abundantes identificados como “Outros”.	201
Figura 57: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.	202
Figura 58: (A) Análise de PCA das amostras de água de fundo do Rio Doce. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.	203
Figura 59: Classificação taxonômica das amostras de sedimento do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.	204
Figura 60: Classificação taxonômica das amostras de sedimento do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”.	204
Figura 61: Classificação taxonômica das amostras de sedimento do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.	205
Figura 62: (A) Análise de PCA das amostras de sedimento do Rio Doce. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.	206
Figura 63: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.	208
Figura 64: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”.	208
Figura 65: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.	209
Figura 66: (A) Análise de PCA das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.	210

- Figura 67: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”..... 211
- Figura 68: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”..... 211
- Figura 69: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”..... 212
- Figura 70: (A) Análise de PCA das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influencias na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise. .... 213
- Figura 71: Classificação taxonômica das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”..... 214
- Figura 72: Classificação taxonômica das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”..... 214
- Figura 73: Classificação taxonômica das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”..... 215
- Figura 74: (A) Análise de PCA das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise. .... 215
- Figura 75: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Mussismilia hartti*. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”..... 217
- Figura 76: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Mussismilia hartti*. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”..... 217

Figura 77: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie <i>Mussismilia hartti</i> . São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.....	218
Figura 78: (A) Análise de PCA das amostras de Coral da espécie <i>Mussismilia hartti</i> . As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.....	219
Figura 79: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie <i>Millepora alcicornis</i> . São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.....	220
Figura 80: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie <i>Millepora alcicornis</i> . São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”.....	220
Figura 81: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie <i>Millepora alcicornis</i> . São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.....	221
Figura 82: (A) Análise de PCA das amostras de coral da espécie <i>Millepora alcicornis</i> . As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.....	221
Figura 83: A Imagem A apresenta o procedimento de desova dos ouriços realizado na Base Oceanográfica da UFES em Coqueiral/ES. As imagens B e C apresentam, respectivamente, ovo fecundado e larva desenvolvida do ouriço do mar <i>Echinometra lucunter</i> , observados nos ensaios de toxicidade com água e elutriado marinhos. A imagem D representa fêmea ovada de <i>Nitokra</i> sp submetida ao ensaio ecotoxicológico com sedimento bruto marinho. As imagens E, F e G representam o cultivo de <i>Daphnia magna</i> e ensaios com amostras de água e elutriado dulcícolas, respectivamente. A Imagem H mostra um ensaio com sedimento bruto de água doce e <i>Hyalella</i> ssp. A imagem I mostra ensaios de toxicidade com algas. As imagens J e K mostram os ensaios de toxicidade com larvas de <i>Danio rerio</i> expostas à amostras de água superficial e elutriado de sedimento de água doce, respectivamente. As imagens L e M mostram peixes adultos ( <i>D. rerio</i> ) em sistema de cultivo e ensaio com água e elutriado de sedimento de água doce com os animais. ....	227
Figura 84: Ensaio de toxicidade crônica (21 dias) com <i>Daphnia magna</i> (OECD 211) e amostras de água e elutriado dos pontos P17 e P26. A toxicidade é medida pela diferença significativa entre o número de neonatos nascidos de animais controles e expostos a diferentes concentrações das amostras ambientais (água e elutriado de sedimento). (*) Indicam diferenças estatisticamente significantes em relação ao respectivo controle. O método estatístico usado foi ANOVA de uma via com teste a posteriori de Dunett's ( $p < 0,05$ ). ....	230

Figura 85: Ensaio de toxicidade aguda (12 horas) com gametas do ouriço do mar <i>Echinometra lucunter</i> com amostras de água e elutriato coletadas nos pontos FRD1 (A), FRD2 (B), CA1 (C) e CA2 (D). A toxicidade é medida pela diferença significativa entre o percentual de ovos fecundados no grupo controle e expostos a diferentes concentrações das amostras ambientais (água e elutriato de sedimento). (*) Indicam diferenças estatisticamente significantes em relação ao controle. O método estatístico usado foi ANOVA de uma via com teste a posteriori de Dunett's ( $p < 0,05$ ).....	231
Figura 86: Ensaio de toxicidade crônica (48 horas) com óvulos fecundados do ouriço do mar <i>Echinometra lucunter</i> (ABNT NBR 15350) expostos às amostras de água e elutriato coletadas nos pontos FRD1 (A), FRD2 (B), CA1 (C) e CA2 (D). A toxicidade é medida pela diferença significativa entre o percentual de larvas desenvolvidas (pluteus) no grupo controle e expostos a diferentes concentrações das amostras ambientais (água e elutriato de sedimento). (*) Indicam diferenças estatisticamente significantes em relação ao controle. O método estatístico usado foi ANOVA de uma via com teste a posteriori de Dunett's ( $p < 0,05$ ).....	232
Figura 87: Mapa com os pontos amostrais para os ensaios e respectiva classificação quanto a toxicidade considerando amostras de água e sedimento (ver Quadro 20) .....	239
Figura 88: Mapa amostral da campanha de monitoramento das praias da região Norte do Espírito Santo. ....	243
Figura 89: Concentração de ferro dissolvido ( $\mu\text{g/L}$ ) nas amostras de água. Os pontos de coleta são apresentados da esquerda para a direita seguindo o sentido Norte-Sul. As barras azuis representam as médias de Fe das amostras de superfície e fundo e a linha em vermelho marca o limite permitido para Fe dissolvido pela legislação ( $300\mu\text{g/L}$ ).....	250
Figura 90: Representação gráfica da PCA realizada para os anfípodos. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1). ....	259
Figura 91: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento praias.....	260
Figura 92: Valores de Fe ( $\text{mg/kg}$ ) no sedimento nos diferentes pontos de coleta. Os dados são apresentados como média $\pm$ erro padrão. ....	260
Figura 93: Valores de Fe ( $\mu\text{g/g}$ ) nos anfípodos nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	261
Figura 94: Representação gráfica da PCA realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1). ....	262
Figura 95: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o	

tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas. ....	263
Figura 96: Valores da concentração de Fe ( $\mu\text{g/g}$ ) nos isópodas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	264
Figura 97: Valores de LPO (nmol MDA/mg proteína) nos isópodas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	264
Figura 98: Representação gráfica da PCA realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1). ....	265
Figura 99: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas. ....	266
Figura 100: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento praias. ....	267
Figura 101: Valores da concentração de Mn ( $\mu\text{g/g}$ ) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	267
Figura 102: Valores da concentração de Hg ( $\mu\text{g/g}$ ) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	268
Figura 103: Valores da concentração de Cr ( $\mu\text{g/g}$ ) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	268
Figura 104: Valores de LPO (nmol MDA/mg proteína) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	269
Figura 105: Valores de MT ( $\mu\text{g MT/mg proteína}$ ) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	269
Figura 106: Representação gráfica da PCA realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1). ....	271
Figura 107: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas. ....	272
Figura 108: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento praias. ....	273

Figura 109: Valores de LPO (nmol MDA/mg proteína) no hepatopâncreas de <i>O. quadrata</i> nos diferentes pontos de coleta. ....	273
Figura 110: Valores de PCO (nmol PC/mg proteína) no músculo de <i>O. quadrata</i> nos diferentes pontos de coleta. ....	274
Figura 111: Valores da concentração de Cu ( $\mu\text{g/g}$ ) no hepatopâncreas de <i>Ocypode quadrata</i> nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	274
Figura 112: Valores da concentração de Hg ( $\mu\text{g/g}$ ) no hepatopâncreas de <i>Ocypode quadrata</i> nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	275
Figura 113: Valores da concentração de Hg ( $\mu\text{g/g}$ ) no músculo de <i>Ocypode quadrata</i> nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média $\pm$ erro padrão. ....	275
Figura 114: Mapa amostral da campanha de monitoramento dos manguezais do Espírito Santo e Sul da Bahia, identificando em verde os pontos de coleta de biota. ....	281
Figura 115: Representação gráfica da Análise de Componentes Principais (PCA) realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1). ....	289
Figura 116: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas. ....	290
Figura 117: Representação gráfica da Análise de Componentes Principais (PCA) realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1). ....	291
Figura 118: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. São mostradas apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ). ....	292
Figura 119: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento do manguezal. ....	293
Figura 120: Sequência química da reação de Fenton. ....	295
Figura 121: Mapa amostral da campanha de monitoramento das aves nas três áreas de coleta no Espírito Santo. ....	301
Figura 122: Rede de captura para aves instalada na primeira campanha do Anexo 1. ....	303

Figura 123: Ave capturada em rede instalada na primeira campanha do Anexo 1.....	304
Figura 124: Base de apoio para triagem, manipulação e coleta de amostras das aves capturadas na primeira campanha do Anexo 1. ....	304
Figura 125: Coleta de amostra de sangue através da punção na veia ulnar de ave capturada durante a primeira campanha do Anexo 1. ....	305
Figura 126: Coleta de amostra de sangue através do corte da unha de ave capturada na primeira campanha do Anexo 1. ....	305
Figura 127: Coleta de amostra de pena de ave capturada na primeira campanha do Anexo 1. ....	306
Figura 128: Coleta, em laboratório, de amostras das aves capturadas na primeira campanha do Anexo 1.....	306
Figura 129: Determinação, em laboratório, do sexo de ave coletada durante a primeira campanha do Anexo 1, através da visualização das gônadas (testículos). ....	307
Figura 130: Exemplo de amostras obtidas, em laboratório, durante a preparação das aves coletadas na primeira campanha Anexo 1. ....	307
Figura 131: Exemplo de amostras obtidas de ave coletada na primeira campanha do Anexo 1 e prontas para serem congeladas. ....	308
Figura 132: Aves taxidermizadas e acondicionadas provisoriamente até serem transportadas para a FURG (Rio Grande, RS), visando o aproveitamento científico e tombamento na Coleção de Aves desta Instituição. ....	308
Figura 133: Aves taxidermizadas e acondicionadas para transporte via terrestre até o Instituto de Ciências Biológicas da FURG (Rio Grande, RS). ....	309
Figura 134: Rede para captura de aves instalada no mangue do Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	311
Figura 135: Mangue com a influência da maré alta no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	312
Figura 136: Rede para captura de ave, fechada devido a maré alta, no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	312
Figura 137: Indivíduo de <i>Actitis macularis</i> , coletado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	313
Figura 138: Indivíduo de <i>Chloroceryle amazona</i> , capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	313

Figura 139: Indivíduo de <i>Conirostrum bicolor</i> , capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	314
Figura 140: Indivíduo de <i>Dendroplex picus</i> , capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	314
Figura 141: Indivíduo de <i>Egretta caerulea</i> capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	315
Figura 142: Indivíduo de <i>Nyctanassa violacea</i> capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES. ....	315
Figura 143: Rede para captura de aves instaladas em ilha inundável próxima da foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	316
Figura 144: Rede para captura de aves instalada em ilha próxima da foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	317
Figura 145: Rede para captura de aves instalada com auxílio de caiaque, na margem do braço/canal do Rio Doce, próximo da foz do Rio Doce em Regência/ES. ....	317
Figura 146: Rede para captura de aves instalada sobre a água no braço/canal do Rio Doce, próximo da foz do Rio Doce em Regência/ES. Indivíduo de <i>Eupetonema macroura</i> capturado. ....	318
Figura 147: Indivíduo de <i>Anthus lustescens</i> , capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	318
Figura 148: Indivíduo de <i>Certhiaxis cinnamomea</i> , capturado no ambiente de estuário próximo da Foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	319
Figura 149: Indivíduo de <i>Crotophaga major</i> , capturado no ambiente de estuário próximo da Foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	319
Figura 150: Indivíduo de <i>Megaceryle torquata</i> , capturado no ambiente de estuário próximo da Foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	320
Figura 151: Indivíduo de <i>Myrmotherula axilaris</i> , capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	320
Figura 152: Indivíduo de <i>Rallus longirostris</i> , espécie coletada no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	321
Figura 153: Indivíduo de <i>Sporophila collaris</i> , capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	321
Figura 154: Indivíduo de <i>Stelgitopterix ruficollis</i> , capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES. ....	322

Figura 155: Indivíduo de <i>Vanellus chilensis</i> , capturado durante a noite no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES.....	322
Figura 156: Instalação das redes na praia de Guriri, próximo da foz do rio São Mateus e APA Conceição da Barra, no município de São Mateus/ES. ....	324
Figura 157: Instalação de redes para capturas de aves na praia de Guriri, próximo da foz do rio São Mateus e APA Conceição da Barra, no município de São Mateus/ES.....	324
Figura 158: Indivíduo de <i>Arenaria interpres</i> , coletado no ambiente litorâneo na praia de Guriri, em São Mateus/ES.....	325
Figura 159: Indivíduo de <i>Thalasseus acutiflavus</i> , capturado no ambiente litorâneo na praia de Guriri, em São Mateus/ES. ....	325

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Medidas dos parâmetros químicos (média $\pm$ erro padrão) analisados na água (superfície e fundo) dos dez pontos amostrados no monitoramento dulcícola. (N – número de amostras analisadas; COD – Carbono Orgânico Dissolvido; * dosagem prevista apenas para a fração Total). .....	39
Tabela 2: Concentração dos principais metais analisados na água (superfície e fundo; total e dissolvido) nos dez pontos amostrados do Rio Doce e estuário. Para cada metal os valores estão apresentados como média $\pm$ erro padrão da média e mediana da concentração ( $\mu\text{g/L}$ ). .....	41
Tabela 3: Concentração dos principais metais analisados no sedimento nos dez pontos amostrados do Rio Doce e estuário. Para cada metal os valores estão apresentados como média $\pm$ erro padrão da média e mediana da concentração (mg/kg de peso seco). .....	43
Tabela 4: Concentração dos metais analisados na água (superfície e fundo) nos dez pontos amostrados do Rio Doce e regiões adjacentes. Para cada metal os valores estão apresentados como mínimo e máximo da concentração ( $\mu\text{g/L}$ ) e estão confrontados com os valores máximos estabelecidos pela resolução do CONAMA 357/2005 para água doce Classe II (convertido para unidade $\mu\text{g/L}$ ). Os valores acima do permitido pela legislação estão realçados em negrito. ....	46
Tabela 5: Concentração dos metais analisados no sedimento nos dez pontos amostrados do Rio Doce e regiões adjacentes. Para cada metal os valores estão apresentados como mínimo e máximo da concentração (mg/kg do peso seco) e estão confrontados com os valores máximos estabelecidos pela resolução do CONAMA 454/2012 para sedimento (mg/kg). .....	47
Tabela 6: Concentração de metais (média $\pm$ erro padrão e mediana; mg/kg de peso úmido) no pool de fitoplâncton e zooplâncton coletados nos dez pontos amostrados no Rio Doce e estuário. ....	52
Tabela 7: Concentração de metais (média $\pm$ erro padrão e mediana; mg/kg de peso úmido) na brânquia, hepatopâncreas e músculo de camarão dulcícola <i>Macrobrachium</i> sp. coletados nos dez pontos amostrados no Rio Doce e estuário. ....	56
Tabela 8: Concentração dos principais metais na brânquia, fígado e músculo (mg/kg de peso úmido) do agrupamento de diversas espécies de peixes dulcícolas coletados na primeira campanha de monitoramento dos dez pontos do Rio Doce e estuário no Espírito Santo, bem como em outros estudos com as mesmas espécies compilados a partir da literatura (Lima et al. 2015a, Paulino et al. 2014b). Os dados obtidos estão expressos como mediana e os valores referenciados na literatura estão expressos como média $\pm$ erro padrão (*) ou valores mínimo e máximo (**). .....	59
Tabela 9: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO) e concentração de metalotioneínas (MT) mensurados em amostras de fito e zooplâncton (pools) coletados na porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacente durante a estação seca (set/2018). Os resultados são expressos em média, erro padrão (EP) (N = 5 – 6 / ponto) e mediana. Em negrito destacam-se as médias mais elevadas encontradas para cada parâmetro biológico. ....	62

Tabela 10: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO), concentração de metalotioneínas (MT), conteúdo de proteínas carboniladas (PCO) e atividade da Na/K ATPase (NKA) mensurados em diferentes tecidos de camarões (hepat. = hepatopâncreas; brânquia; musc. = músculo) do gênero <i>Macrobrachium</i> coletados na porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacente durante a estação seca (set/2018). Os resultados são expressos em média, erro padrão (EP) (N = 6 – 10 / ponto) e mediana. Em negrito destacam-se as médias mais elevadas ou menores encontradas para cada parâmetro biológico. ....	63
Tabela 11: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO), concentração de metalotioneínas (MT), conteúdo de proteínas carboniladas (PCO), atividade da catalase (CAT), atividade da lactato desidrogenase (LDH), atividade da malato-desidrogenase (MDH) e frequência de micronúcleos (MN) mensurados em diferentes tecidos de espécies de peixes coletadas na porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacente durante a estação seca (set/2018). Os resultados são expressos em média ± erro padrão (EP) (N = 9 – 20 / ponto) e mediana. ....	64
Tabela 12: Índices médios de lesões dos órgãos e médias globais das espécies de peixes coletadas no ambiente dulcícola. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) do índice de lesões e número de órgãos (nº) analisados. Médias de lesões acima da média global foram destacadas. ....	67
Tabela 13: Frequência (%) de alterações morfológicas no fígado de peixes coletados nos diferentes pontos amostrais do ambiente dulcícola. Médias de lesões acima da média global foram destacadas. ....	69
Tabela 14: Frequência (%) de alterações morfológicas na brânquia de peixes coletados nos diferentes pontos amostrais do ambiente dulcícola. Médias de lesões acima da média global foram destacadas. ....	70
Tabela 15: Concentração (µg/L) dos metais analisados na água (superfície e fundo/total e dissolvido) nas 25 estações amostradas na Campanha Marinha 1. Para cada metal, os valores estão apresentados como média ± erro padrão e mediana, e estão confrontados com os valores máximos estabelecidos pela resolução do CONAMA 357/2005 para águas salinas (convertido para unidade µg/L). Em vermelho destacam-se os valores (Média) acima do permitido pela legislação vigente. ....	112
Tabela 16: Concentração (mg/kg peso seco) dos metais analisados no sedimento nas 25 estações amostradas na Campanha Marinha 1. Para cada metal, os valores estão apresentados como média ± erro padrão e a mediana. Médias elevadas para cada metal foram destacadas. ....	120
Tabela 17: Concentração de diferentes metais (µg/g de peso úmido) em amostras (Pool) de Fitoplâncton coletados nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana para cada metal analisado (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]). ...	127

Tabela 18: Concentração de diferentes metais ( $\mu\text{g/g}$ de peso úmido) em amostras (Pool) de Zooplâncton coletados nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana para cada metal analisado (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]). ...	128
Tabela 19: Concentração de metais (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]) mensurados nos camarões (média das 2 espécies amostradas) na brânquia, hepatopâncreas e músculo de camarões marinhos coletados nas estações amostradas durante a Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana. ....	133
Tabela 20: Concentração de metais (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]) mensurados nos peixes marinhos (média de todas as espécies amostradas) na brânquia, fígado e músculo coletados nas estações amostradas durante a Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana. Valores médios elevados foram destacados em negrito. ....	138
Tabela 21: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO) e concentração de metalotioneínas (MT) mensurados em amostras de fito e zooplâncton (pools) coletados nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1- estação seca (set/out 2018). Os resultados são expressos em média, $\pm$ erro padrão e mediana. Em negrito destacam-se as médias mais elevadas encontradas para cada parâmetro biológico. ....	143
Tabela 22: Análise em diferentes tecidos (brânquia, hepatopâncreas e músculo), dos biomarcadores de dano oxidativo em lípidios (LPO), níveis de metalotioneína (MT) e níveis de proteínas carboniladas nos camarões coletados em estações amostrais da Campanha Marinha 1. ....	149
Tabela 23: Análise em diferentes tecidos (brânquia, fígado e músculo), dos biomarcadores de dano oxidativo em lípidios (LPO), níveis de metalotioneína (MT) e níveis de proteínas carboniladas e frequência de Micronúcleos (MN) nos peixes marinhos coletados em estações amostrais da Campanha Marinha 1. ....	153
Tabela 24: Valores médios e médias globais da enzima catalase de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) dos valores e número de órgãos ( $n^\circ$ ) analisados. Médias dos valores acima da média global foram destacadas. ....	154
Tabela 25: Valores médios e médias globais da enzima lactato desidrogenase de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) dos valores e número de órgãos ( $n^\circ$ ) analisados. Médias dos valores acima da média global foram destacadas. .	156
Tabela 26: Valores médios e médias globais da enzima malato desidrogenase de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) dos valores e número de órgãos ( $n^\circ$ ) analisados. Médias dos valores acima da média global foram destacadas. .	158

Tabela 27: Índices médios de lesões dos órgãos e médias globais das espécies de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada estação amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) do índice de lesões e número de órgãos (nº) analisados. Médias de lesões acima da média global foram destacadas. ....	163
Tabela 28: Frequência (%) de alterações morfológicas no fígado de peixes coletados em diferentes estações amostrais do ambiente marinho. ....	166
Tabela 29: Frequência (%) de alterações morfológicas nas brânquias de peixes coletados em diferentes estações amostrais do ambiente marinho. ....	167
Tabela 30: Valores de média $\pm$ EP e mediana da concentração de metais na água nos diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praial. Os resultados são expressos em $\mu\text{g/L}$ . ....	245
Tabela 31: Valores de média $\pm$ EP e mediana da concentração de metais no sedimento nos diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praial. Os resultados são expressos em $\text{mg/kg}$ . .	249
Tabela 32: Valores mínimos e máximos de metais encontrados na água em cada ponto amostral. *V.M.P.: Valor máximo permissível para o enquadramento das classes de águas salinas ( $\mu\text{g/L}$ ). Classe 1 - águas que podem ser destinadas: (a) a recreação de contato primário; (b) a proteção das comunidades aquáticas; e (c) a aquicultura e a atividade de pesca .....	251
Tabela 33: Valores de média $\pm$ EP e mediana da concentração de metais em anfípodas, poliquetos e no isópode <i>Excirrolana</i> sp. nos diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praial. Os resultados são expressos em $\text{mg/kg}$ de peso úmido. ....	253
Tabela 34: Valores de média $\pm$ EP e mediana da concentração de metais em brânquias, hepatopâncreas e músculo do caranguejo <i>Ocypode quadrata</i> em diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praial. Os resultados são expressos em $\text{mg/kg}$ peso úmido. ....	255
Tabela 35: Resultados da análise dos biomarcadores (lipoperoxidação, e metalotioneína) em anfípodas, no isópode <i>Excirrolana</i> sp. e em poliquetas. Os resultados são expressos como média $\pm$ EP e mediana. ....	257
Tabela 36: Resultados da análise dos biomarcadores (lipoperoxidação, metalotioneína e proteínas carboniladas) em brânquias (B), hepatopâncreas (H) e músculo (M) de <i>Ocypode quadrata</i> . Os resultados são expressos como média $\pm$ EP e mediana. NA = não se aplica (dosagem não prevista no TR4). NR = dosagem não realizada.....	258
Tabela 37: Tabela mostrando os valores de media $\pm$ EP e mediana das concentrações de metais (Cr, Fe, Mn, Cd, Cu, Zn, Pb, Hg e As) nas brânquias, hepatopâncreas e músculo de <i>U. cordatus</i> , <i>C. guanhamu</i> e <i>G. cruentata</i> nas diversas estações de coleta do monitoramento do manguezal. Os resultados são expressos em $\mu\text{g. g}$ peso úmido <sup>-1</sup> .....	283

Tabela 38: Tabela mostrando os resultados da análise dos biomarcadores (lipoperoxidação - LPO, proteínas carboniladas - PCO e metalotioneína - MT) em brânquias, hepatopâncreas e músculo de *U. Cordatus*, *C. guanhamu* e *G. cruentata*. Os resultados são expressos como Média  $\pm$  EP e mediana. NA – Não se aplica (dosagem não prevista no TR4)..... 287

## LISTA DE QUADROS

Quadro 1: Estações amostrais da campanha dulcícola referente ao Anexo 1. As coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos dez pontos de coleta estão apresentadas em UTM Sirgas 2000. ....	35
Quadro 2: Listagem dos parâmetros físicos da água aferidos in situ e dos seus respectivos resultados nos dez pontos amostrados no Rio Doce (pontos 21 e 22), estuário (ponto 26) e porção dulcícola adjacente (pontos 17 – 20; 23 – 25) no Estado do Espírito Santo. Fonte dos dados: medidor multiparâmetro AKSO AK88. ....	38
Quadro 3: Classificação das alterações histopatológicas do fígado e brânquia quanto ao tipo de lesão e grau de importância de acordo com Bernet e colaboradores (1999). ....	65
Quadro 4: Estações amostrais da Campanha Marinha 1 e 2, referente ao Anexo 1- Ecotoxicologia e posição geográfica (latitude e longitude) das 25 estações amostrais em UTM Sirgas 2000. ....	108
Quadro 5: Parâmetros físico-químicos da água nas estações amostrais marinhas durante a Campanha Marinha 1. ....	110
Quadro 6: Concentração mínima e máxima dos metais em todas as estações amostrais, de acordo com a Tabela 19, na brânquia, fígado e músculo ( $\mu\text{g/g}$ de peso úmido) de camarões coletados na Campanha Marinha 1 comparados com outros estudos em camarões marinhos compilados a partir da literatura. Os dados da literatura estão expressos em valores ( $\mu\text{g/g}$ de peso úmido) mínimos e máximos encontrados. Valores do presente relatório acima dos encontrados na literatura foram destacados. ....	136
Quadro 7: Concentração mínima e máxima dos metais, de acordo com a Tabela 20, na brânquia, fígado e músculo ( $\mu\text{g/g}$ de peso úmido) de peixes marinhos coletados na Campanha Marinha 1 comparados com outros estudos em peixes marinhos compilados a partir da literatura. Os dados da literatura estão expressos em valores ( $\mu\text{g/g}$ de peso úmido) mínimos e máximos encontrados. Valores acima dos encontrados na literatura foram destacados. ....	142
Quadro 8: Porcentagem das amostras de brânquia e fígado, coletados nos diferentes pontos amostrais do ambiente marinho, com destaque para os pontos classificados como acima da média global das enzimas CAT, LDH e MDH. ....	160
Quadro 9: Classificação das alterações histopatológicas do fígado e brânquia quanto ao tipo de lesão e grau de importância de acordo com Bernet et. al (1999). ....	161
Quadro 10: Índices médios de reações dos peixes mais frequentes no ambiente marinho. ....	165
Quadro 11: Identificação dos pontos amostrais no Rio Doce e dados brutos do sequenciamento de DNA. ....	193

Quadro 12: Identificação dos pontos amostrais na foz do Rio Doce e região costeira adjacente, e dados brutos do sequenciamento de DNA. ....	194
Quadro 13: Identificação dos pontos amostrais dos corais na região de Abrolhos e dados brutos do sequenciamento de DNA. ....	196
Quadro 14: Resumo dos organismos e respectivos ensaios de toxicidade aplicados em amostras coletadas no Rio Doce, sua foz e região costeira adjacente. ....	226
Quadro 15: Planilha geral com valores estimados de toxicidade para os ensaios realizados com amostras do Rio Doce, com base na concentração da amostra (%), e referentes à 1a Campanha do Anexo I. ....	228
Quadro 16: Planilha geral com valores estimados de toxicidade para os ensaios realizados com amostras da Foz do Rio Doce e região da Costas das Algas, e referentes à 1a Campanha do Anexo I. ....	229
Quadro 17: Índice de toxicidade de acordo com a resposta (biomarcador) analisada nos ensaios aplicados com amostras da 1a Campanha do Anexo I. O parâmetro mais tóxico é classificado com maior valor que os menos tóxicos. ....	232
Quadro 18: Índice de sensibilidade dos organismos usados nos ensaios de toxicidade aplicados com amostras da 1a Campanha do Anexo I. O maior valor foi atribuído ao nível trófico mais sensível, e o menor valor ao mais tolerante. ....	233
Quadro 19: Classificação da amostra com relação à sua toxicidade. Adaptado de Bulich (1992). ...	233
Quadro 20: Resultado e classificação das amostras de água e sedimento coletadas em diferentes pontos do Rio Doce, sua Foz e APA Costa das Algas e submetidas à ensaios de toxicidade com organismos de diferentes níveis tróficos. Os testes foram realizados com espécies padronizadas e /ou nativas da região. ....	235
Quadro 21: Estações amostrais referente ao subprojeto de monitoramento de praias. Coordenadas geográficas apresentadas em UTM Sirgas 2000. ....	242
Quadro 22: Parâmetros físico-químicos da água aferidos in situ nos dez pontos amostrados no monitoramento praial do Estado do Espírito Santo. Fonte dos dados: medidor multiparâmetro AKSO AK88. ....	243
Quadro 23: Valores de mínimo e máximo (Min - Max) do Fe analisado em anfípodas nos diferentes pontos de coleta do monitoramento praial. Também são mostrados os dados de Min e Max da literatura para ambientes considerados contaminados para simples comparação. Os resultados são expressos em µg/g de peso úmido. ....	261

Quadro 24: Valores médios da concentração de alguns metais analisados nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta do monitoramento praiial. Também são mostrados os dados médios da concentração de metais obtidos da literatura (Said et al., 2017) para simples comparação. Os resultados são expressos em $\mu\text{g/g}$ de peso úmido. ....	270
Quadro 25: Valores médios de Hg disponíveis na literatura, nos tecidos de <i>Ocypode</i> sp. e outros crustáceos, de ambientes contaminados, para simples comparação. Os resultados são expressos em $\mu\text{g/g}$ de peso úmido. ....	276
Quadro 26: Valores mínimos e máximos de Hg e Cu disponíveis na literatura, nos tecidos de <i>Ocypode quadrata</i> e do siri <i>Callinectes danae</i> , para simples comparação. Os resultados são expressos em $\mu\text{g/g}$ de peso úmido. ....	276
Quadro 27: Estações amostrais referente ao monitoramento de manguezais. Coordenadas apresentadas no formato UTM Sirgas 2000. ....	280
Quadro 28: Quadro mostrando os valores de Mínimo e Máximo (Min - Max), a partir das médias da Tabela 37, para os metais (Cr, Fe, Mn) nas brânquias, hepatopâncreas e músculo de <i>U. cordatus</i> e <i>C. guanhamu</i> nas diversas estações de coleta do monitoramento do manguezal. Também são mostrados os valores de Min e Max em estudos publicados para ambientes considerados contaminados para simples comparação. Os resultados são expressos em $\mu\text{g. g}$ peso úmido <sup>-1</sup> . ....	286
Quadro 29: Lista das famílias de aves estuarinas, de manguezais e da região costeira previstas para serem amostradas no monitoramento de contaminantes, com seu respectivo hábito alimentar e exemplo de espécies a serem priorizadas quando presentes na área amostral. ....	302
Quadro 30: Lista dos locais amostrados e respectivos métodos utilizados em cada local, no período de 18/09/2018 a 10/10/2018, durante a realização da primeira campanha do Anexo 1. ....	309
Quadro 31: Lista do esforço amostral para obtenção das amostras de aves através do método de captura com auxílio de redes de captura, em Aracruz/ES, durante a execução da primeira campanha da expedição RRDM/FAURG. ....	311
Quadro 32: Lista do esforço amostral para obtenção das amostras de aves através do método de captura com auxílio de redes de captura, em Regência/ES, durante a execução da primeira campanha do Anexo 1. ....	323
Quadro 33: Lista do esforço amostral para obtenção das amostras de aves através do método de captura com auxílio de redes de captura, em Guriri/ES, durante a execução da primeira campanha do Anexo 1. ....	323
Quadro 34: Concentrações de metais ( $\mu\text{g/g}$ peso úmido) em penas de aves marinhas coletadas antes do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG) e analisadas no âmbito do presente estudo. Os dados são expressos como média e erro padrão (entre parênteses). ....	327

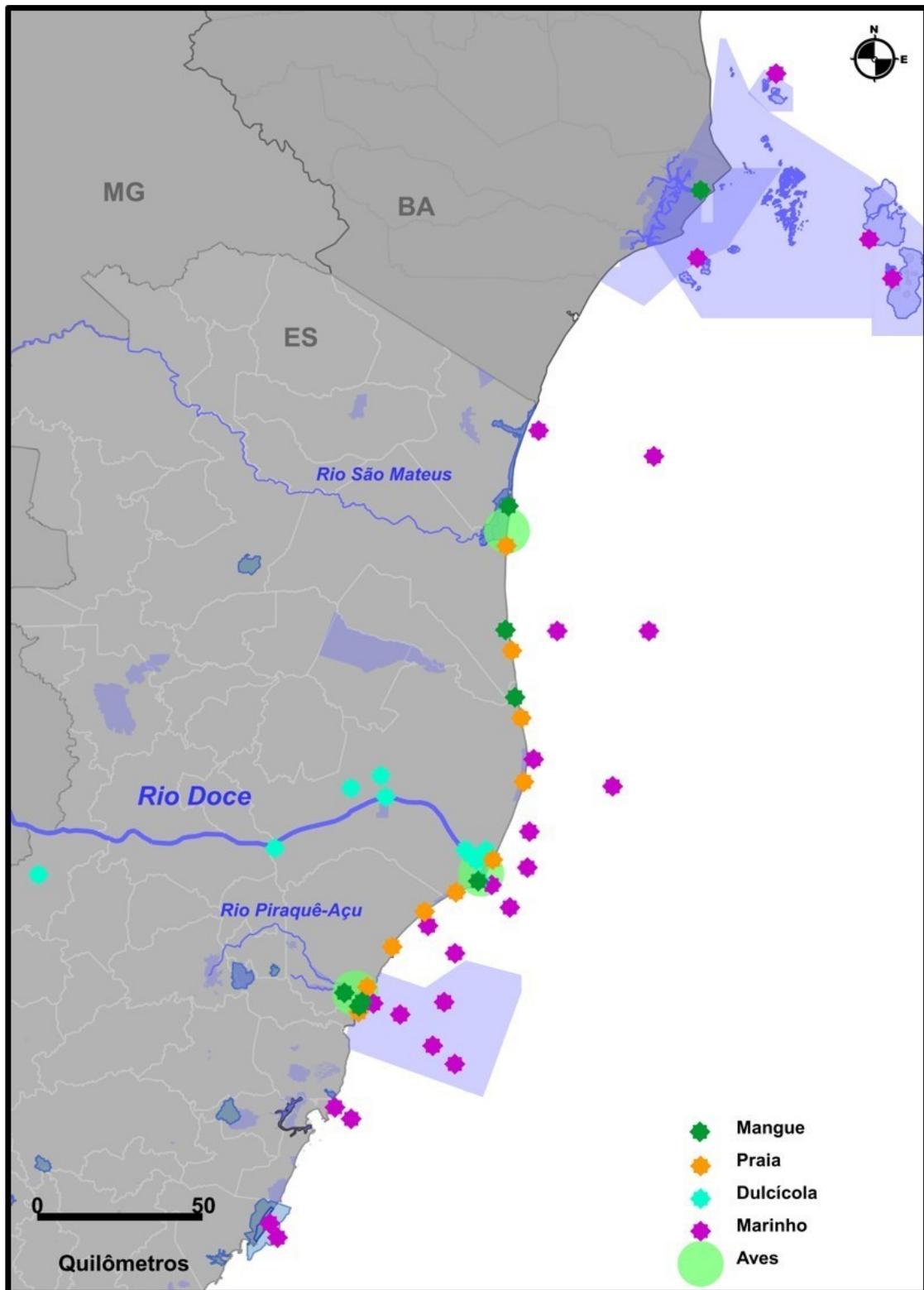
Quadro 35: Concentrações de metais ( $\mu\text{g/g}$  peso úmido) nas penas das aves amostradas nos diferentes ambientes (mangue, estuário e praia), bem como nas penas de aves marinhas coletadas antes do rompimento da barragem (Dados pretéritos: vide Tabela 5). Os dados estão expressos como média e erro padrão (entre parênteses). Letras diferentes indicam valores médios significativamente diferentes entre os diferentes ambientes de amostragem das aves, para cada metal analisado (ANOVA, seguida do teste de Tukey;  $p < 0,05$ ). \*Indica valores médios diferentes entre as penas das aves do presente estudo e aquelas amostradas antes do rompimento da barragem, para cada metal (teste t de Student;  $p < 0,05$ ). ..... 327

Quadro 36: Concentrações de metais ( $\text{mg/L}$ ) no sangue das aves amostradas nos diferentes ambientes (mangue, estuário e praia), bem como em algumas espécies de aves reportadas na literatura pertinente. Os dados estão expressos como média  $\pm$  erro padrão (entre parênteses). Letras diferentes indicam valores médios significativamente diferentes entre os diferentes ambientes de amostragem das aves, para cada metal analisado (ANOVA, seguida do teste de Tukey;  $p < 0,05$ ). ..... 328

## 1 INTRODUÇÃO

O presente documento apresenta as atividades desenvolvidas pelos colaboradores do Anexo 1 – “Monitoramento ecotoxicológico dos impactos causados pela lama oriunda do rompimento da barragem de Mariana (MG) em regiões dulcícolas, estuarinas e marinhas”, durante o primeiro semestre do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática na Área Ambiental I (PMBA). Como estabelecido no Plano de Trabalho, o monitoramento ecotoxicológico está sendo realizado sazonalmente (período seco e período chuvoso). No presente relatório serão descritos os resultados obtidos a partir das análises das amostras de água, sedimento e biota coletadas no período seco (setembro-outubro/2018). Conforme definido no Anexo 1 do TR4 e, posteriormente, na Nota Técnica nº 3/2017/CTBio/DIBIO/ICMBio, as amostras de água, sedimento e biota foram coletadas em diversos pontos de amostragem ao longo de quatro ambientes: dulcícola (Rio Doce), marinho (foz do Rio Doce e região costeira adjacente), praias, e manguezal. Por sua vez, as amostras de aves foram coletadas em três regiões na costa do ES: Regência, Aracruz e Guriri. As áreas de coleta de amostras de água, sedimento e biota nos quatro ambientes descritos acima, bem como de coleta de amostras de aves nas três áreas mencionadas acima, estão apresentadas na Figura 1.

Figura 1: Mapa com os pontos e áreas de coleta de amostras ambientais e biológicas no âmbito do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Cabe ressaltar que as amostras referentes ao período chuvoso (janeiro/fevereiro/2019) também já foram coletadas, encontram-se devidamente armazenadas nos laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande - FURG (Rio Grande, RS), Universidade Federal do Espírito Santo - UFES (São Mateus,

ES) e Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ (Rio de Janeiro, RJ) e serão analisadas a partir de abril/2019. Todas as atividades de campo (período seco e período chuvoso) foram realizadas conforme Autorização para atividades com finalidade científica emitida em 30/08/2018 pelo ICMBio/MMA (no 64261-1), com revalidação prevista para 30/08/2019. As atividades que envolvem captura, coleta e manipulação de vertebrados possuem autorização da Comissão de Ética em Uso Animal (CEUA) da FURG (Certificado no. Pq015/2018).

Para uma melhor apresentação e visualização das atividades realizadas no âmbito do monitoramento realizado pelo Anexo 1, o presente documento está dividido em 7 partes:

Parte 1 – Monitoramento do ambiente dulcícola (Rio Doce)

Parte 2 – Monitoramento do ambiente marinho (foz do Rio Doce e região costeira adjacente)

Parte 3 – Monitoramento da composição da microbiota em amostras de água, sedimento e coral

Parte 4 – Monitoramento da toxicidade de amostras de água e sedimento

Parte 5 – Monitoramento do ambiente praial

Parte 6 – Monitoramento dos manguezais

Parte 7 – Monitoramento de aves

Cada uma das Partes listadas acima apresenta o relatório detalhado das atividades realizadas, conforme Seção 3 do modelo adotado pela Rede Rio Doce Mar (RRDM).

## **2 SUBPROJETO: MONITORAMENTO DO AMBIENTE DULCÍCOLA (RIO DOCE)**

### **2.1 OBJETIVO**

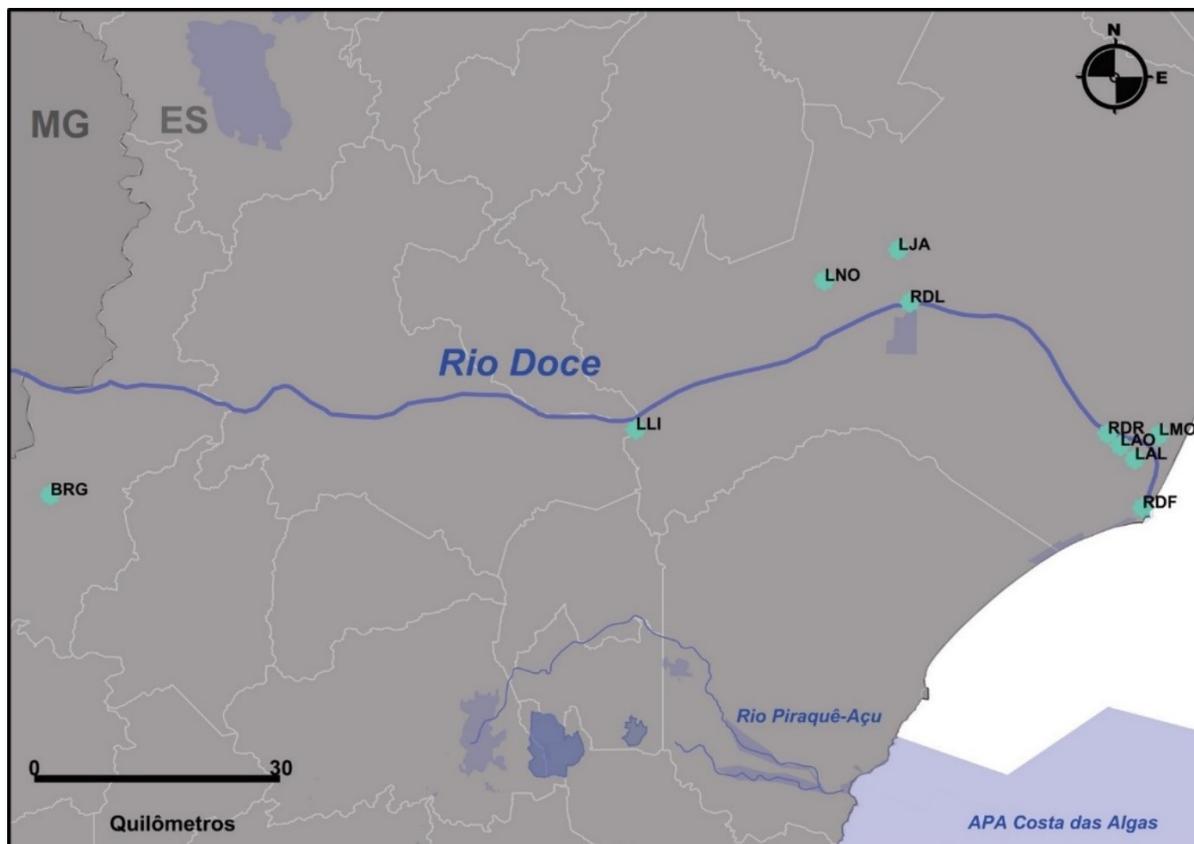
Como objetivo geral o presente subprojeto visa (a) avaliar a concentração de metais na água, no sedimento e em organismos dulcícolas e estuarinos de diferentes níveis da cadeia trófica, incluindo os produtores primários (fitoplâncton), secundários (zooplâncton) e os recursos pesqueiros (peixes e crustáceos); e (b) analisar biomarcadores de exposição e efeito em organismos dulcícolas e estuarinos de diferentes níveis da cadeia trófica.

### **2.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

#### **2.2.1 Área de estudo**

Conforme definido no Anexo I do TR4 o monitoramento dulcícola do presente estudo incorporou a amostragem de dez pontos no decurso do Rio Doce, lagoas adjacentes e Foz do Rio Doce no estado de Espírito Santo (Figura 2) durante o período de seca (setembro/outubro de 2018) e período chuvoso (janeiro/fevereiro de 2019) (primeira e segunda campanha, respectivamente). Entretanto, todos os dados apresentados no presente relatório restringem-se ao executado para as amostras oriundas da primeira campanha. Os detalhamentos dos pontos de coleta, como nome e código da estação amostral e posição geográfica, estão apresentados no Quadro 1 e as imagens representativas de cada ambiente estão reunidas na Figura 3.

Figura 2: Mapa amostral das campanhas de monitoramento ecotoxicológico na porção capixaba do Rio Doce e estuário e lagoas adjacentes, realizadas na estação seca (setembro/outubro de 2018) e na estação chuvosa (janeiro/fevereiro de 2019). A nomenclatura das estações amostrais bem como as respectivas coordenadas geográficas encontram-se descritas na Tabela 1.



Fonte: Autoria própria.

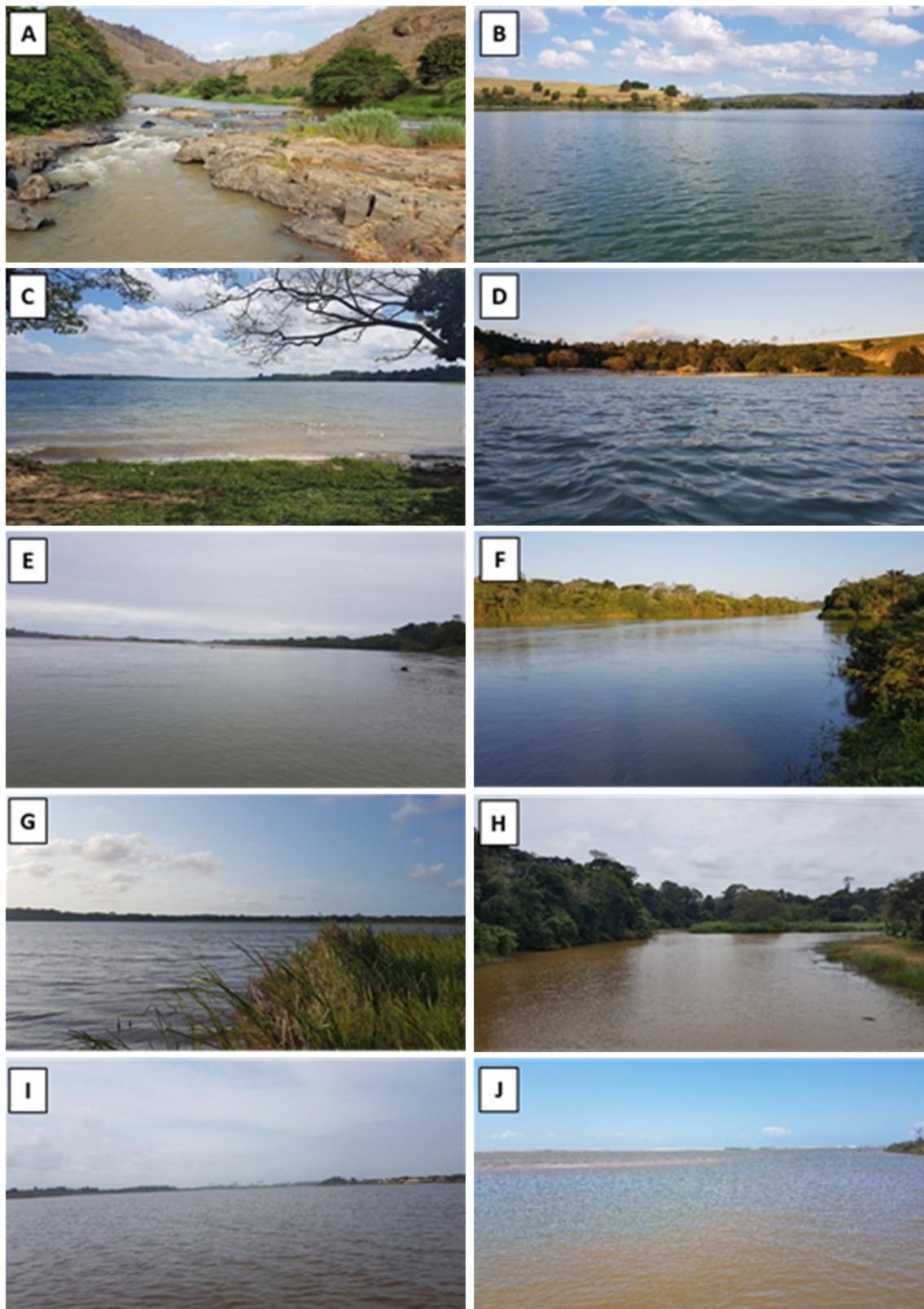
Quadro 1: Estações amostrais da campanha dulcícola referente ao Anexo 1. As coordenadas geográficas (latitude e longitude) dos dez pontos de coleta estão apresentadas em UTM Sirgas 2000.

NOME DA ESTAÇÃO AMOSTRAL	CÓDIGO DA ESTAÇÃO	NORTHING	EASTING
17 - Rio Guandu	BRG	288351,08	7828746,17
18 - Lagoa do Limão	LLI	355688,84	7837447,02
19 - Lagoa Nova	LNO	377287,60	7855827,03
20 - Lagoa Japaranã	LJA	385766,88	7859664,14
21 - Rio Doce	RDL	387144,67	7853249,98
22 - Rio Doce	RDR	410025,62	7837309,00
23 - Lagoa do Areão	LAO	411472,58	7835831,65
24 - Lagoa do Areal	LAL	413154,34	7834176,33
25 - Lagoa Monsaras	LMO	415912,93	7837161,08
26 - Foz do Rio Doce	RDF	414079,86	7828234,12

Fonte: Autoria própria.

Figura 3: Imagens representativas dos pontos de coleta ao longo da porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacentes: Rio Guandu (A); Lagoa do Limão (B); Lagoa Nova (C); Lagoa Juparanã (D); trecho do Rio Doce em Linhares (E); trecho do Rio Doce em Regência (F); Lagoa do Areão (G); Lagoa do Areal (H); Lagoa Monsaras (I) e Foz do Rio Doce (J).

Fotos: Carlos Eduardo Delfino Vieira.



Fonte: Autoria própria.

## 2.2.2 Análise dos parâmetros físicos e químicos e concentração de metais na água e sedimento

O monitoramento do ambiente dulcícola e estuário visou investigar a qualidade da água, do sedimento e da biota. Para sustentar a investigação foram aferidos os parâmetros físicos *in situ* (Quadro 2) e coletadas amostras de água a partir da superfície e do fundo dos dez pontos amostrais propostos inicialmente no plano de trabalho para mensuração dos parâmetros químicos (Tabela 1). Dentre os parâmetros químicos avaliados na água estão: carbono orgânico dissolvido (COD), sulfato, alcalinidade e concentração iônica [cloreto (Cl<sup>-</sup>), magnésio (Mg), sódio (Na), potássio (K) e cálcio (Ca)]. A descrição detalhada das metodologias analíticas de todos os parâmetros apresentados no presente relatório está disponível no Protocolo de Análises de Laboratório do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática na Área Ambiental I (RRDM, 2019).

A determinação da concentração dos metais na água em profundidades distintas, particularmente superfície e fundo, em sua forma total e dissolvida, além da concentração dos metais no sedimento, consistiu na análise dos principais elementos: Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cromo (Cr), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg) e Arsênio (As). Os resultados da quantificação de metais nos compartimentos água e sedimento estão apresentados na Tabela 2 e Tabela 3 respectivamente.

Para fins comparativos apresentaremos os resultados de quantificação de metais nas amostras de água doce (< 0,5 ppt), assim como as medidas dos parâmetros físicos da água, particularmente pH e O<sub>2</sub> dissolvido, confrontados com a resolução 357/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA para águas doces de Classe II. A concentração dos metais no sedimento será comparada com o descrito na legislação vigente (CONAMA 454/2012).

### 2.2.2.1 Principais resultados

O pH da água esteve dentro dos limites de 6,0 a 9,0 estabelecido pela resolução (Quadro 2) em todos os pontos amostrados. No tocante a concentração de O<sub>2</sub> dissolvido na água, a amostragem do ponto 25 – LMO, correspondente a Lagoa Monsaras, foi excepcionalmente inferior (3,9 mg/L O<sub>2</sub>) ao recomendado pela legislação (< 5 mg/L O<sub>2</sub>) (Quadro 2). Todos os outros parâmetros inorgânicos mensurados estão de acordo com o estabelecido na resolução de 357/2005 (Tabela 1).

Quadro 2: Listagem dos parâmetros físicos da água aferidos in situ e dos seus respectivos resultados nos dez pontos amostrados no Rio Doce (pontos 21 e 22), estuário (ponto 26) e porção dulcícola adjacente (pontos 17 – 20; 23 – 25) no Estado do Espírito Santo. Fonte dos dados: medidor multiparâmetro AKSO AK88.

Ponto	Código Ponto	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica (µS/cm)	Salinidade (ppt)	pH	O <sub>2</sub> dissolvido (mg/L)
17	BRG	24,7	71,2	0,04	7,30	7,85
18	LLI	25,7	110,4	0,06	7,05	7,40
19	LNO	27,0	88,5	0,04	7,03	7,90
20	LJA	25,4	85,3	0,04	7,15	7,90
21	RDL	26,4	86,9	0,04	6,45	5,20
22	RDR	28,4	69,0	0,04	7,44	7,80
23	LAO	27,6	86,6	0,05	6,90	6,80
24	LAL	28,7	135	0,07	6,64	6,70
25	LMO	27,2	324	0,17	6,70	3,90
26	RDF	28,6	148	0,08	7,00	7,30

Fonte: Autoria própria.

Tabela 1: Medidas dos parâmetros químicos (média ± erro padrão) analisados na água (superfície e fundo) dos dez pontos amostrados no monitoramento dulcícola. (N – número de amostras analisadas; COD – Carbono Orgânico Dissolvido; \* dosagem prevista apenas para a fração Total).

Amostra	Ponto	N	COD (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Alcalinidade (mg/L HCO <sub>3</sub> )	Cloreto (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)
			Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)
Superfície Total	BRG	3	2,31 ± 0,93	2,33 ± 0,88	36,61 ± 0,00	4,53 ± 1,29	15,14 ± 4,81	8,00 ± 2,08	1,77 ± 0,39	3,77 ± 0,53
Superfície Dissolvido		3	2,29 ± 0,26	*	*	*	11,46 ± 5,57	13,00 ± 0,00	2,43 ± 0,13	6,63 ± 1,67
Fundo Total		3	1,17 ± 0,31	4,67 ± 0,67	36,61 ± 0,00	10,36 ± 3,60	13,72 ± 4,01	11,67 ± 0,88	2,30 ± 0,00	3,23 ± 0,23
Fundo Dissolvido		3	2,89 ± 0,49	*	*	*	5,51 ± 3,51	12,00 ± 0,00	2,30 ± 0,00	2,57 ± 0,87
Superfície Total	LLI	3	3,77 ± 1,17	6,33 ± 0,33	32,54 ± 2,03	10,36 ± 1,71	1,55 ± 0,58	22,33 ± 1,86	3,13 ± 3,30	3,57 ± 0,30
Superfície Dissolvido		3	3,85 ± 0,71	*	*	*	0,72 ± 0,24	24,33 ± 0,67	3,53 ± 0,23	4,67 ± 0,20
Fundo Total		3	3,57 ± 0,24	6,33 ± 0,33	32,54 ± 2,03	9,06 ± 0,65	1,45 ± 0,04	23,33 ± 1,67	3,47 ± 0,23	4,13 ± 0,72
Fundo Dissolvido		3	3,97 ± 1,38	*	*	*	1,14 ± 0,43	18,67 ± 4,84	2,67 ± 0,84	3,80 ± 0,95
Superfície Total	LNO	3	3,05 ± 0,58	6,67 ± 0,33	36,61 ± 0,00	6,43 ± 0,63	2,07 ± 0,84	15,67 ± 0,33	2,70 ± 0,00	1,57 ± 0,59
Superfície Dissolvido		3	2,57 ± 0,42	*	*	*	0,72 ± 0,11	16,00 ± 0,00	2,80 ± 0,10	1,33 ± 0,49
Fundo Total		3	1,54 ± 0,36	6,33 ± 0,33	36,61 ± 0,00	8,38 ± 1,71	0,67 ± 0,25	14,67 ± 0,33	2,70 ± 0,00	1,67 ± 0,49
Fundo Dissolvido		3	1,91 ± 0,31	*	*	*	1,28 ± 0,17	15,33 ± 0,33	2,70 ± 0,00	2,10 ± 0,10
Superfície Total	LJA	3	2,11 ± 0,35	7,00 ± 1,00	32,54 ± 2,03	3,83 ± 1,13	0,72 ± 0,20	19,67 ± 0,67	3,80 ± 0,10	3,67 ± 0,49
Superfície Dissolvido		3	3,42 ± 0,40	0,21 ± 0,02	0,06 ± 0,01	0,06 ± 0,01	0,44 ± 0,17	20,67 ± 0,33	3,80 ± 0,10	3,67 ± 0,33
Fundo Total		3	1,74 ± 0,33	6,33 ± 1,20	32,54 ± 2,03	32,54 ± 2,03	0,36 ± 0,10	18,33 ± 1,20	3,33 ± 0,20	3,80 ± 0,10
Fundo Dissolvido		3	5,10 ± 0,69	*	*	*	0,32 ± 0,17	19,33 ± 0,33	3,80 ± 0,10	3,70 ± 0,10
Superfície Total	RDL	3	2,36 ± 0,72	6,33 ± 0,67	28,48 ± 4,07	5,48 ± 3,18	0,48 ± 0,23	15,67 ± 2,96	3,33 ± 0,67	2,43 ± 1,07
Superfície Dissolvido		3	2,29 ± 1,12	*	*	*	0,38 ± 0,08	18,33 ± 0,33	3,67 ± 0,20	2,53 ± 0,23
Fundo Total		3	3,26 ± 0,08	6,67 ± 1,20	30,51 ± 3,52	10,93 ± 1,71	1,09 ± 0,20	18,33 ± 0,33	3,57 ± 0,13	2,77 ± 0,29
Fundo Dissolvido		3	5,09 ± 0,65	*	*	*	0,55 ± 0,09	18,33 ± 0,88	4,00 ± 0,00	3,00 ± 0,00
Superfície Total	RDR	3	0,99 ± 0,68	7,00 ± 1,00	36,61 ± 0,00	5,18 ± 1,71	31,57 ± 9,84	17,67 ± 0,88	1,90 ± 0,10	3,57 ± 0,43
Superfície Dissolvido		3	1,63 ± 0,24	*	*	*	34,82 ± 17,07	20,33 ± 0,88	2,43 ± 0,13	2,77 ± 0,96
Fundo Total		3	1,40 ± 0,11	5,33 ± 0,33	36,61 ± 0,00	11,27 ± 0,20	26,91 ± 5,69	19,67 ± 0,33	2,30 ± 0,00	2,23 ± 0,62
Fundo Dissolvido		3	2,37 ± 0,14	*	*	*	14,77 ± 4,33	18,33 ± 0,67	2,10 ± 0,10	3,10 ± 1,05
Superfície Total	LAO	3	4,68 ± 2,50	6,67 ± 1,20	24,41 ± 0,00	9,71 ± 4,04	1,18 ± 0,86	18,67 ± 1,86	2,47 ± 0,39	3,90 ± 0,95
Superfície Dissolvido		3	10,76 ± 1,66	*	*	*	2,59 ± 0,04	19,67 ± 1,33	2,57 ± 0,30	3,47 ± 0,39
Fundo Total		3	4,70 ± 2,57	7,67 ± 0,33	22,37 ± 2,03	7,77 ± 0,00	3,68 ± 0,69	14,67 ± 4,49	2,00 ± 0,68	4,13 ± 0,30
Fundo Dissolvido		3	7,50 ± 3,67	*	*	*	1,95 ± 0,27	20,00 ± 0,58	3,10 ± 0,10	4,00 ± 1,02

Amostra	Ponto	N	COD (mg/L)	Sulfato (mg/L)	Alcalinidade (mg/L HCO <sub>3</sub> )	Cloreto (mg/L)	Mg (mg/L)	Na (mg/L)	K (mg/L)	Ca (mg/L)
			Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)	Média (± erro padrão)
Superfície Total	LAL	3	7,80 ± 3,27	9,00 ± 1,73	26,44 ± 2,03	5,18 ± 2,33	92,07 ± 11,03	25,00 ± 0,58	1,67 ± 0,20	1,33 ± 0,52
Superfície Dissolvido		3	13,69 ± 1,00	*	*	*	64,60 ± 6,05	26,33 ± 0,67	1,67 ± 0,20	2,57 ± 0,13
Fundo Total		3	12,63 ± 2,20	9,00 ± 1,16	26,44 ± 2,03	8,41 ± 1,29	69,89 ± 11,94	27,67 ± 0,67	1,70 ± 0,00	3,90 ± 0,10
Fundo Dissolvido		3	10,94 ± 2,14	*	*	*	41,45 ± 4,78	28,00 ± 0,58	1,70 ± 0,00	3,77 ± 0,29
Superfície Total	LMO	3	5,55 ± 0,12	13,00 ± 0,58	56,95 ± 4,07	5,10 ± 1,30	151,67 ± 28,72	47,67 ± 0,88	3,10 ± 0,10	4,10 ± 0,20
Superfície Dissolvido		3	5,35 ± 0,48	*	*	*	1,56 ± 0,44	42,67 ± 6,44	2,77 ± 0,53	3,80 ± 0,49
Fundo Total		3	4,44 ± 0,42	14,00 ± 1,73	61,02 ± 0,00	5,13 ± 0,67	3,35 ± 0,16	48,33 ± 2,33	3,23 ± 0,29	4,57 ± 0,43
Fundo Dissolvido		3	6,24 ± 0,85	*	*	*	2,28 ± 0,49	48,67 ± 1,33	3,30 ± 0,00	4,90 ± 0,20
Superfície Total	RDF	3	1,66 ± 0,13	10,00 ± 0,00	36,61 ± 0,00	9,67 ± 1,93	66,56 ± 1,45	25,00 ± 0,00	2,43 ± 0,13	2,13 ± 0,30
Superfície Dissolvido		3	3,12 ± 0,51	*	*	*	42,88 ± 2,91	20,00 ± 5,03	2,13 ± 0,57	2,00 ± 0,51
Fundo Total		3	1,21 ± 0,49	10,33 ± 0,33	36,61 ± 0,00	7,07 ± 0,63	15,71 ± 2,50	26,67 ± 3,76	2,13 ± 0,30	2,23 ± 0,79
Fundo Dissolvido		3	2,55 ± 0,13	*	*	*	16,01 ± 2,79	30,67 ± 1,45	2,70 ± 0,00	2,67 ± 0,20

Fonte: Autoria própria.

Tabela 2: Concentração dos principais metais analisados na água (superfície e fundo; total e dissolvido) nos dez pontos amostrados do Rio Doce e estuário. Para cada metal os valores estão apresentados como média ± erro padrão da média e mediana da concentração (µg/L).

Amostra de água	Ponto	N	Cr (ug/L)		Cd (ug/L)		Cu (ug/L)		Fe (ug/L)		Mn (ug/L)		Zn (ug/L)		Pb (ug/L)		Hg (ug/L)		As (ug/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Superfície Total	BRG	3	0,04 ± 0,00	0,04	0,23 ± 0,01	0,24	0,06 ± 0,00	0,06	10,90 ± 2,22	9,63	0,40 ± 0,07	0,44	4,50 ± 2,30	2,47	0,10 ± 0,03	0,08	0,10 ± 0,00	0,10	0,71 ± 0,14	0,78
Superfície Dissolvido		3	0,03 ± 0,01	0,03	0,20 ± 0,01	0,20	0,05 ± 0,00	0,05	2,31 ± 0,92	1,57	0,11 ± 0,04	0,15	1,25 ± 0,42	1,28	0,04 ± 0,00	0,04	0,10 ± 0,00	0,10	0,51 ± 0,26	0,46
Fundo Total		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,20 ± 0,02	0,21	0,06 ± 0,01	0,06	16,70 ± 1,25	17,26	4,01 ± 0,75	4,31	1,90 ± 0,41	1,81	0,26 ± 0,07	0,21	0,09 ± 0,00	0,09	0,12 ± 0,02	0,11
Fundo Dissolvido		3	0,02 ± 0,01	0,03	0,18 ± 0,03	0,20	0,03 ± 0,00	0,03	2,05 ± 0,58	1,81	1,16 ± 0,10	1,08	0,69 ± 0,00	0,69	0,09 ± 0,02	0,11	0,08 ± 0,00	0,08	0,37 ± 0,34	0,04
Superfície Total	LLI	3	0,03 ± 0,00	0,03	0,23 ± 0,02	0,24	0,07 ± 0,00	0,07	2,81 ± 0,69	2,99	0,17 ± 0,04	0,14	1,01 ± 0,15	0,99	0,20 ± 0,01	0,22	0,03 ± 0,00	0,03	1,57 ± 0,22	1,47
Superfície Dissolvido		3	0,02 ± 0,01	0,02	0,15 ± 0,03	0,15	0,06 ± 0,00	0,06	0,60 ± 0,26	0,71	0,11 ± 0,01	0,11	0,63 ± 0,00	0,62	0,09 ± 0,02	0,09	0,02 ± 0,00	0,02	0,78 ± 0,07	0,74
Fundo Total		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,20 ± 0,02	0,21	0,06 ± 0,00	0,06	3,28 ± 0,43	2,99	0,44 ± 0,07	0,49	5,67 ± 1,16	4,69	0,19 ± 0,05	0,22	0,12 ± 0,00	0,12	0,62 ± 0,26	0,52
Fundo Dissolvido		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,18 ± 0,02	0,19	0,05 ± 0,00	0,05	0,84 ± 0,39	1,22	0,09 ± 0,01	0,09	1,69 ± 0,39	2,03	0,10 ± 0,00	0,10	0,10 ± 0,00	0,10	0,30 ± 0,05	0,32
Superfície Total	LNO	3	0,08 ± 0,02	0,09	0,30 ± 0,03	0,28	0,90 ± 0,08	0,94	6,12 ± 0,15	6,18	8,29 ± 1,14	8,18	2,53 ± 0,23	2,51	1,49 ± 0,02	1,50	0,09 ± 0,00	0,09	0,43 ± 0,13	0,55
Superfície Dissolvido		3	0,07 ± 0,02	0,08	0,20 ± 0,05	0,23	0,50 ± 0,05	0,55	1,10 ± 0,08	1,10	2,43 ± 0,05	2,47	1,15 ± 0,27	0,96	1,43 ± 0,02	1,44	0,08 ± 0,00	0,08	0,12 ± 0,03	0,11
Fundo Total		3	0,09 ± 0,01	0,09	0,28 ± 0,01	0,27	0,76 ± 0,09	0,84	6,34 ± 0,90	5,85	5,29 ± 1,24	4,69	0,58 ± 0,31	0,43	1,52 ± 0,04	1,54	0,09 ± 0,00	0,09	0,53 ± 0,06	0,58
Fundo Dissolvido		3	0,07 ± 0,01	0,07	0,25 ± 0,00	0,25	0,680 ± 0,06	0,70	4,22 ± 0,34	4,36	2,45 ± 0,14	2,56	0,30 ± 0,13	0,18	1,46 ± 0,06	1,51	0,09 ± 0,00	0,09	0,13 ± 0,09	0,06
Superfície Total	LJA	3	0,03 ± 0,00	0,03	0,21 ± 0,01	0,20	0,08 ± 0,01	0,07	4,23 ± 0,40	4,55	0,09 ± 0,04	0,06	7,63 ± 1,61	9,17	0,12 ± 0,03	0,13	0,15 ± 0,00	0,15	0,62 ± 0,34	0,35
Superfície Dissolvido		3	0,01 ± 0,00	0,01	0,19 ± 0,01	0,20	0,07 ± 0,01	0,07	0,94 ± 0,44	0,82	0,03 ± 0,01	0,03	1,40 ± 0,77	1,45	0,06 ± 0,00	0,06	0,14 ± 0,00	0,14	0,18 ± 0,04	0,16
Fundo Total		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,21 ± 0,03	0,19	0,07 ± 0,00	0,07	10,44 ± 4,71	5,91	0,35 ± 0,12	0,43	2,82 ± 0,94	2,66	0,64 ± 0,05	0,65	0,16 ± 0,00	0,16	0,64 ± 0,22	0,46
Fundo Dissolvido		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,18 ± 0,01	0,17	0,06 ± 0,00	0,06	1,34 ± 0,92	0,69	0,15 ± 0,02	0,17	0,75 ± 0,38	0,39	0,34 ± 0,13	0,34	0,15 ± 0,00	0,15	0,49 ± 0,26	0,28
Superfície Total	RDL	3	0,08 ± 0,01	0,08	0,21 ± 0,01	0,20	0,07 ± 0,00	0,07	11,79 ± 2,84	10,25	0,36 ± 0,03	0,37	0,96 ± 0,33	1,28	0,44 ± 0,05	0,40	0,16 ± 0,00	0,16	0,55 ± 0,13	0,46
Superfície Dissolvido		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,17 ± 0,01	0,16	0,07 ± 0,00	0,07	4,95 ± 0,33	4,81	0,25 ± 0,05	0,21	0,59 ± 0,27	0,50	0,11 ± 0,01	0,12	0,15 ± 0,00	0,16	0,33 ± 0,05	0,36
Fundo Total		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,26 ± 0,03	0,23	0,06 ± 0,01	0,07	15,88 ± 1,29	17,03	0,60 ± 0,02	0,62	1,48 ± 0,45	1,29	0,18 ± 0,01	0,19	0,16 ± 0,00	0,16	1,30 ± 0,10	1,29
Fundo Dissolvido		3	0,02 ± 0,00	0,02	0,18 ± 0,01	0,19	0,06 ± 0,01	0,06	4,01 ± 0,79	3,79	0,55 ± 0,03	0,54	0,55 ± 0,01	0,54	0,09 ± 0,01	0,09	0,14 ± 0,01	0,13	0,63 ± 0,05	0,67
Superfície Total	RDR	3	0,02 ± 0,00	0,02	0,24 ± 0,02	0,25	0,06 ± 0,00	0,07	3,52 ± 0,53	3,80	0,87 ± 0,06	0,84	3,22 ± 0,57	3,40	0,07 ± 0,01	0,07	0,09 ± 0,00	0,09	1,07 ± 0,29	1,35
Superfície Dissolvido		3	0,02 ± 0,00	0,01	0,21 ± 0,02	0,20	0,05 ± 0,01	0,04	1,04 ± 0,48	1,26	0,46 ± 0,06	0,41	1,53 ± 0,73	1,76	0,04 ± 0,001	0,04	0,07 ± 0,00	0,07	0,25 ± 0,03	0,24
Fundo Total		3	0,04 ± 0,00	0,03	0,27 ± 0,03	0,25	0,07 ± 0,00	0,07	7,72 ± 1,37	6,44	0,80 ± 0,01	0,81	0,59 ± 0,04	0,63	0,14 ± 0,02	0,14	0,10 ± 0,00	0,10	0,69 ± 0,02	0,69

Amostra de água	Ponto	N	Cr (ug/L)		Cd (ug/L)		Cu (ug/L)		Fe (ug/L)		Mn (ug/L)		Zn (ug/L)		Pb (ug/L)		Hg (ug/L)		As (ug/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Fundo Dissolvido		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,19 ± 0,02	0,18	0,06 ± 0,00	0,06	1,77 ± 0,66	1,69	0,66 ± 0,02	0,65	0,27 ± 0,00	0,27	0,09 ± 0,01	0,09	0,08 ± 0,00	0,08	0,46 ± 0,13	0,43
Superfície Total	LAO	3	0,03 ± 0,00	0,03	0,55 ± 0,29	0,31	0,06 ± 0,00	0,06	36,93 ± 6,46	39,62	0,40 ± 0,10	0,45	3,32 ± 0,78	4,08	0,07 ± 0,02	0,06	0,14 ± 0,02	0,14	0,97 ± 0,44	1,24
Superfície Dissolvido		3	0,02 ± 0,00	0,02	0,16 ± 0,08	0,23	0,06 ± 0,00	0,06	19,66 ± 2,00	20,35	0,22 ± 0,06	0,20	1,90 ± 0,38	1,57	0,04 ± 0,01	0,04	0,12 ± 0,00	0,12	0,28 ± 0,23	0,08
Fundo Total		3	0,03 ± 0,01	0,03	0,25 ± 0,02	0,23	0,05 ± 0,01	0,06	41,86 ± 6,38	44,86	0,41 ± 0,08	0,42	5,06 ± 0,44	5,19	0,27 ± 0,13	0,16	0,07 ± 0,01	0,06	0,90 ± 0,19	0,78
Fundo Dissolvido		3	0,02 ± 0,00	0,02	0,19 ± 0,03	0,18	0,05 ± 0,01	0,05	25,95 ± 2,04	27,65	0,29 ± 0,04	0,28	3,34 ± 0,19	3,45	0,10 ± 0,01	0,10	0,04 ± 0,00	0,04	0,53 ± 0,04	0,53
Superfície Total	LAL	3	0,02 ± 0,00	0,02	0,21 ± 0,03	0,17	0,07 ± 0,00	0,07	89,36 ± 1,44	89,42	1,37 ± 0,17	1,45	4,16 ± 0,29	4,34	0,18 ± 0,12	0,07	0,13 ± 0,05	0,09	1,22 ± 0,36	1,35
Superfície Dissolvido		3	0,02 ± 0,01	0,01	0,15 ± 0,01	0,15	0,06 ± 0,00	0,06	30,51 ± 4,50	30,51	0,73 ± 0,10	0,69	0,70 ± 0,02	0,71	0,02 ± 0,01	0,02	0,04 ± 0,00	0,04	0,24 ± 0,23	0,02
Fundo Total		3	0,02 ± 0,00	0,02	0,17 ± 0,03	0,19	0,05 ± 0,01	0,06	101,75 ± 11,66	94,33	1,90 ± 0,67	1,49	2,55 ± 1,16	1,46	0,08 ± 0,03	0,09	0,03 ± 0,00	0,04	0,62 ± 0,06	0,56
Fundo Dissolvido		3	0,01 ± 0,00	0,01	0,12 ± 0,02	0,10	0,03 ± 0,00	0,03	32,02 ± 4,60	27,90	0,82 ± 0,03	0,82	1,62 ± 1,39	0,26	0,04 ± 0,01	0,04	0,03 ± 0,00	0,03	0,52 ± 0,04	0,50
Superfície Total	LMO	3	0,03 ± 0,00	0,03	0,19 ± 0,01	0,20	0,07 ± 0,00	0,07	77,10 ± 3,81	74,13	0,22 ± 0,04	0,25	1,53 ± 0,38	1,81	0,24 ± 0,10	0,22	0,08 ± 0,00	0,08	0,74 ± 0,25	0,60
Superfície Dissolvido		3	0,02 ± 0,01	0,01	0,12 ± 0,00	0,11	0,07 ± 0,00	0,06	4,52 ± 0,42	4,82	0,10 ± 0,01	0,10	0,90 ± 0,19	1,04	0,06 ± 0,00	0,06	0,08 ± 0,00	0,08	0,21 ± 0,08	0,22
Fundo Total		3	0,08 ± 0,00	0,07	0,99 ± 0,14	0,93	0,78 ± 0,14	0,76	3,84 ± 0,92	4,53	187,20 ± 25,06	181,20	1,52 ± 0,44	1,24	1,50 ± 0,01	1,49	0,09 ± 0,00	0,09	0,81 ± 0,09	0,75
Fundo Dissolvido		3	0,06 ± 0,02	0,06	0,46 ± 0,16	0,32	0,38 ± 0,11	0,33	1,07 ± 0,01	1,07	107,27 ± 0,88	107,60	0,83 ± 0,03	0,85	1,38 ± 0,07	1,41	0,08 ± 0,00	0,08	0,26 ± 0,10	0,20
Superfície Total	RDF	3	0,12 ± 0,01	0,13	0,23 ± 0,02	0,23	0,06 ± 0,01	0,06	15,11 ± 0,96	15,25	0,52 ± 0,04	0,50	2,61 ± 0,27	2,87	0,24 ± 0,06	0,28	0,17 ± 0,00	0,17	0,68 ± 0,24	0,83
Superfície Dissolvido		3	0,05 ± 0,01	0,03	0,21 ± 0,01	0,21	0,05 ± 0,01	0,05	1,80 ± 0,76	1,99	0,43 ± 0,01	0,42	0,51 ± 0,31	0,43	0,08 ± 0,02	0,09	0,14 ± 0,00	0,14	0,34 ± 0,17	0,45
Fundo Total		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,19 ± 0,02	0,19	0,07 ± 0,00	0,07	1,47 ± 0,05	1,46	0,40 ± 0,12	0,35	2,26 ± 0,82	2,11	0,17 ± 0,04	0,19	0,08 ± 0,00	0,08	0,67 ± 0,06	0,63
Fundo Dissolvido		3	0,03 ± 0,00	0,03	0,15 ± 0,02	0,14	0,06 ± 0,00	0,06	1,23 ± 0,09	1,28	0,25 ± 0,04	0,22	1,29 ± 0,79	0,97	0,12 ± 0,01	0,13	0,07 ± 0,00	0,07	0,24 ± 0,06	0,27

Fonte: Autoria própria.

Tabela 3: Concentração dos principais metais analisados no sedimento nos dez pontos amostrados do Rio Doce e estuário. Para cada metal os valores estão apresentados como média  $\pm$  erro padrão da média e mediana da concentração (mg/kg de peso seco).

Ponto	Código Ponto	N	Cr		Cd		Cu		Fe		Mn		Zn		Pb		Hg		As					
			Mg/kg peso seco																					
			Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana		
Amostra sedimento	17	BRG	4	2,49 $\pm$ 1,07	1,60	0,01 $\pm$ 0,00	0,00	0,55 $\pm$ 0,17	0,55	61,13 $\pm$ 7,58	59,72	62,24 $\pm$ 26,18	39,69	3,30 $\pm$ 1,76	1,83	0,48 $\pm$ 0,24	0,27	0,01 $\pm$ 0,00	0,00	0,002 $\pm$ 0,00	0,002			
	18	LLI	4	11,85 $\pm$ 3,10	9,73	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	2,74 $\pm$ 0,62	2,31	166,60 $\pm$ 65,77	116,80	236,10 $\pm$ 98,75	180,2	11,89 $\pm$ 2,57	12,42	1,70 $\pm$ 0,57	1,24	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	0,04 $\pm$ 0,02	0,02			
	19	LNO	4	5,65 $\pm$ 1,55	4,80	0,01 $\pm$ 0,00	0,00	1,50 $\pm$ 0,70	1,13	129,80 $\pm$ 20,01	146,90	168,02 $\pm$ 70,04	109,5	4,66 $\pm$ 1,82	3,28	0,54 $\pm$ 0,10	0,46	0,02 $\pm$ 0,01	0,02	0,01 $\pm$ 0,00	0,01			
	20	LJA	4	1,87 $\pm$ 0,37	1,77	0,002 $\pm$ 0,00	0,002	0,90 $\pm$ 0,62	0,32	56,38 $\pm$ 5,67	57,64	44,08 $\pm$ 13,64	32,72	1,67 $\pm$ 0,37	1,66	0,48 $\pm$ 0,18	0,34	0,004 $\pm$ 0,00	0,004	0,01 $\pm$ 0,00	0,01			
	21	RDL	4	22,56 $\pm$ 1,14	23,05	0,02 $\pm$ 0,00	0,02	5,96 $\pm$ 5,96	4,80	326,90 $\pm$ 50,03	319,00	649,50 $\pm$ 58,98	664,7	17,09 $\pm$ 0,98	17,46	6,03 $\pm$ 0,50	5,96	0,05 $\pm$ 0,01	0,05	0,25 $\pm$ 0,06	0,22			
	22	RDR	4	6,00 $\pm$ 2,12	5,90	0,002 $\pm$ 0,00	0,002	0,89 $\pm$ 0,36	0,77	37,05 $\pm$ 16,29	16,62	37,78 $\pm$ 24,81	16,62	2,89 $\pm$ 0,85	2,49	0,66 $\pm$ 0,23	0,61	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	0,02 $\pm$ 0,01	0,02			
	23	LAO	4	26,14 $\pm$ 3,89	25,84	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	5,90 $\pm$ 0,84	6,42	130,50 $\pm$ 27,26	121,50	271,10 $\pm$ 46,60	261,2	10,44 $\pm$ 1,84	10,19	3,40 $\pm$ 0,80	2,93	0,03 $\pm$ 0,00	0,02	0,02 $\pm$ 0,01	0,01			
	24	LAL	4	12,35 $\pm$ 5,31	7,71	0,01 $\pm$ 0,01	0,01	1,25 $\pm$ 0,58	0,79	88,94 $\pm$ 54,50	41,95	103,90 $\pm$ 58,75	53,08	12,42 $\pm$ 3,71	10,24	0,29 $\pm$ 0,13	0,19	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	0,08 $\pm$ 0,07	0,01			
	25	LMO	4	3,24 $\pm$ 0,26	3,10	0,14 $\pm$ 0,13	0,01	0,51 $\pm$ 0,09	0,51	82,52 $\pm$ 8,98	79,52	69,01 $\pm$ 5,96	72,86	2,48 $\pm$ 0,18	2,48	0,38 $\pm$ 0,02	0,38	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	0,04 $\pm$ 0,01	0,05			
	26	RDF	4	1,08 $\pm$ 5,32	2,77	0,002 $\pm$ 0,00	0,002	0,59 $\pm$ 0,16	0,53	60,71 $\pm$ 5,13	57,68	75,81 $\pm$ 3,71	76,47	1,92 $\pm$ 0,13	1,85	0,39 $\pm$ 0,09	0,43	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	0,02 $\pm$ 0,01	0,02			

Fonte: Autoria própria

Com base nos resultados obtidos nas análises das amostras de água doce provenientes do Rio Doce no estado do Espírito Santo foi realizada a modelagem ecotoxicológica dos dados, visando à previsão da biodisponibilidade e toxicidade de metais em ambientes dulcícolas. Esta modelagem foi realizada utilizando-se a versão mais recente do Modelo do Ligante Biótico - BLM (Freshwater & Marine version 3.16.2.41; HYDROQUAL, 1999). Para tal, foram considerados os resultados das análises de pH, temperatura, concentrações de íon ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$  e  $\text{SO}_4^{2-}$ ), carbono orgânico dissolvido (amostra filtrada), e alcalinidade total (amostra não filtrada).

Os resultados da modelagem utilizando o BLM indicaram que o ponto de amostragem localizado na Lagoa Monsarás (LMO) foi o que apresentou a maior concentração do íon livre, a forma dissolvida considerada mais tóxica para a biota aquática, considerando-se os quatro metais calibrados no âmbito do BLM (Cu, Cd, Pb e Zn). Além deste ponto amostral, outros pontos, tais como aqueles localizados no Rio Doce (RDF, RDR e RDL), especialmente os pontos mais próximos à foz do Rio Doce (RDF e RDR), bem como aquele situado na Lagoa Nova (LNO), apresentaram também concentrações elevadas dos íons metálicos livres. Por sua vez, pontos de amostragem localizados nas demais lagoas capixabas (LAO, LJA e LLI), de uma forma geral, apresentaram as menores concentrações dos íons metálicos livres. Por fim, o ponto localizado no Rio Baixo Guandu (BRG), afluente do Rio Doce, apresentou concentrações intermediárias dos íons metálicos livres.

Dados pretéritos que incorporam a apreciação da concentração de metais na água do Rio Doce nos oferecem respaldo para avaliarmos o cenário atual no que tange a abundância e a dinâmica temporal dos metais elencados neste relatório, visto que tais resultados estão intrinsecamente associados com o efeito da sazonalidade. Naturalmente a comparação e possíveis conclusões sobre a qualidade da água embasaram-se também nos limites estabelecidos na legislação ambiental brasileira para a concentração de metais na água e sedimento.

Os resultados das análises decorrentes da amostragem da primeira campanha dulcícola sucedida em 2018 pela RRDM foram confrontados com dados apresentados em relatórios de monitoramentos anteriores, a fim de avaliar a dinâmica dos metais em relação ao tempo transcorrido. A comparação entre os dados gerados com dados obtidos de estudos realizados pelo Grupo Independente para Avaliação de Impacto Ambiental (GIAIA) e pelo Laboratório de Ictiologia Aplicada da Universidade de Vila Velha, realizados entre 2015 e 2016, para pontos coincidentes no estado do ES, como os do Rio Guandu, Rio Doce Linhares, Rio Doce Regência e Foz do Rio Doce, e pontos não coincidentes, como do Rio Doce em Colatina, estão sumarizados abaixo:

O nível de Ferro (Fe) e Manganês (Mn) total alcançaram concentrações de 9.900 e 3.610  $\mu\text{g/L}$ , respectivamente, logo após a chegada dos rejeitos no Rio Doce em Colatina – ES em 2015 (Análise da água avaliada e fornecida pelo Laboratório de Ictiologia Aplicada da Universidade de Vila Velha). Entre 2015 e 2016, os metais Cádmio (Cd), Manganês (Mn) e Arsênio (As) estiveram em níveis elevados nas amostras de água do ponto do Rio Doce em Linhares e Regência, e também na Foz do

Rio Doce, com concentrações de 2 a 7 vezes maiores do que a permitida pela legislação CONAMA 357/2005 (Relatório apresentado pelo GIAIA).

A concentração dos metais Cádmiio (Cd), Manganês (Mn) e Arsênio (As) estiveram elevadas na água do rio Doce após o rompimento da barragem quando comparado aos valores permitidos pela legislação (Dados extraídos do relatório apresentado pelo GIAIA). De maneira geral, de acordo com os valores obtidos a partir das amostras coletadas em setembro de 2018 que compõem os dados do presente relatório, a concentração destes metais na água decresceu e encontra-se em níveis abaixo do valor permitido pela resolução CONAMA, com exceção de algumas amostras de água coletadas em LMO, que apresentaram concentrações de Mn cerca de 2,3 x superior ao limite preconizado pela legislação e de algumas amostras coletadas em LAO e LMO com concentrações de Cd um pouco acima da legislação (Tabela 4).

Os valores para concentração de todos os outros metais quantificados na água, obtidos a partir de análises pretéritas a este relatório e também dos dados obtidos na primeira coleta dos dez pontos monitorados no período de seca (set/out de 2018), esteve dentro dos limites permitidos pela legislação brasileira (Tabela 4).

A concentração de todos os metais quantificados nas amostras de sedimento oriundos da coleta durante a estação seca (2018) está em conformidade com a concentração estabelecida pela resolução CONAMA 454/2012, exceto ferro (Fe) e manganês (Mn) que não estão na listagem da legislação e, portanto, não há limite definido (Tabela 5).

Especificamente no sedimento amostrado no ponto do Rio Doce em Regência (RDR) e Foz do Rio Doce (RDF), comparando-se os valores da concentração dos metais Fe, Mn, As, Cr, Pb, Cd e Cu obtidos a partir dos dados do presente relatório com os valores encontrados no sedimento em monitoramentos anteriores (antes do rompimento da barragem em 2014 e logo após o rompimento em 2015) observa-se um aumento significativo na concentração desses metais (Bianchini, dados não publicados, FURG, Rio Grande, RS).

A concentração de metais encontrada na água de um dado local é um parâmetro efêmero dentro do contexto aqui avaliado no que diz respeito aos impactos sobre a biodiversidade. A dinâmica dos diferentes metais em rios com forte vazão, tal qual o Rio Doce, lagoas e estuários segue vias diferentes. Fatores externos como a precipitação e o volume de entrada da água na calha principal do rio variam muito entre estações de seca e estações chuvosas (Oliveira e Quaresma, 2017), e tais fatores estão intimamente relacionados com a disponibilização e possíveis associações entre metais na água e sedimento. Em regiões estuarinas essas características podem ser somadas a frequência e duração da inundação do solo, do aporte de água doce no ecossistema e alterações climáticas (Queiroz et al., 2018). Embora a concentração de todos os metais avaliados esteve abaixo dos limites da legislação brasileira tanto na água quanto no sedimento, inúmeros fatores podem alterar a disponibilização desses metais. O efeito do tempo transcorrido desde o rompimento da barragem no ambiente e a contribuição antrópica devem ser considerados quando tratamos da avaliação do impacto deste evento.

Tabela 4: Concentração dos metais analisados na água (superfície e fundo) nos dez pontos amostrados do Rio Doce e regiões adjacentes. Para cada metal os valores estão apresentados como mínimo e máximo da concentração ( $\mu\text{g/L}$ ) e estão confrontados com os valores máximos estabelecidos pela resolução do CONAMA 357/2005 para água doce Classe II (convertido para unidade  $\mu\text{g/L}$ ). Os valores acima do permitido pela legislação estão realçados em negrito.

Metais	Valor permitido CONAMA 357/2005 ( $\mu\text{g/L}$ )	Concentração dos metais ( $\mu\text{g/L}$ ) na água amostrada na porção dulcícola									
		BRG	LLI	LNO	LJA	RDL	RDR	LAO	LAL	LMO	RDF
<b>Cr (total)</b>	50	0,02 - 0,04	0,03 - 0,04	0,04 - 0,10	0,02 - 0,04	0,03 - 0,10	0,02 - 0,04	0,02 - 0,03	0,02 - 0,03	0,03 - 0,08	0,03 - 0,13
<b>Fe (dissolvido)</b>	300	1,19 - 4,14	0,06 - 1,25	0,96 - 4,73	0,18 - 3,15	2,77 - 5,58	0,13 - 2,95	15,91 - 28,32	22,71 - 41,21	1,07 - 5,05	0,40 - 3,00
<b>Mn (total)</b>	100	0,28 - 5,13	0,12 - 0,52	3,50 - 10,31	0,04 - 0,50	0,31 - 0,63	0,78 - 0,99	0,21 - 0,54	1,00 - 3,22	0,14 - <b>233,30</b>	0,22 - 0,62
<b>Cd (total)</b>	1	0,15 - 0,24	0,16 - 0,25	0,26 - 0,35	0,18 - 0,26	0,20 - 0,33	0,20 - 0,32	0,22 - <b>1,13</b>	0,12 - 0,27	0,18 - <b>1,26</b>	0,16 - 0,26
<b>Cu (dissolvido)</b>	9	0,03 - 0,05	0,05 - 0,07	0,39 - 0,78	0,06 - 0,08	0,04 - 0,07	0,04 - 0,07	0,03 - 0,06	0,02 - 0,06	0,06 - 0,60	0,04 - 0,07
<b>Zn (total)</b>	180	1,25 - 9,09	0,77 - 7,98	0,14 - 2,93	1,28 - 9,29	0,30 - 2,33	0,52 - 4,11	1,76 - 5,74	1,34 - 4,86	0,78 - 2,37	0,92 - 3,75
<b>Pb (total)</b>	10	0,06 - 0,40	0,10 - 0,26	1,44 - 1,58	0,07 - 0,72	0,17 - 0,54	0,06 - 0,18	0,04 - 0,54	0,03 - 0,42	0,08 - 1,51	0,10 - 0,32
<b>Hg (total)</b>	0,2	0,08 - 0,10	0,03 - 0,12	0,09 - 0,09	0,15 - 0,16	0,15 - 0,17	0,08 - 0,10	0,05 - 0,14	0,03 - <b>0,22</b>	0,08 - 0,09	0,08 - 0,17
<b>As (total)</b>	10	0,09 - 1,89	0,23 - 1,98	0,18 - 0,59	0,21 - 1,30	0,37 - 1,48	0,50 - 1,37	0,12 - 1,57	0,54 - 1,77	0,39 - 1,22	0,22 - 0,99

Fonte: Autoria própria.

Tabela 5: Concentração dos metais analisados no sedimento nos dez pontos amostrados do Rio Doce e regiões adjacentes. Para cada metal os valores estão apresentados como mínimo e máximo da concentração (mg/kg do peso seco) e estão confrontados com os valores máximos estabelecidos pela resolução do CONAMA 454/2012 para sedimento (mg/kg).

Metais	Valor permitido CONAMA 454/2012 (mg/kg)		Concentração de metais (mg/kg peso seco) no sedimento amostrado									
	Nível 1	Nível 2	BRG	LLI	LNO	LJA	RDL	RDR	LAO	LAL	LMO	RDF
Cr (total)	37,3	90	1,10 - 5,67	7,13 - 20,83	2,98 - 10,01	1,15 - 2,80	19,39 - 24,75	2,29 - 9,93	17,68 - 35,20	5,83 - 28,17	0,82 - 3,96	2,30 - 6,91
Fe (dissolvido)	-	-	46,96 - 78,11	73,29 - 359,36	70,13 - 155,34	41,50 - 68,72	214,11 - 455,33	7,38 - 68,30	75,88 - 203,33	21,10 - 250,78	67,43 - 103,62	52,03 - 75,45
Mn (total)	-	-	29,33 - 140,26	78,63 - 505,62	76,29 - 376,71	26,25 - 86,65	492,42 - 776,17	6,42 - 111,46	171,10 - 391,05	29,97 - 279,37	52,14 - 78,19	67,01 - 83,30
Cd (total)	0,6	3,5	0,002 - 0,02	0,0004 - 0,02	0,0005 - 0,008	0,002 - 0,003	0,02 - 0,03	0,0001 - 0,003	0,003 - 0,01	0,001 - 0,02	0,004 - 0,54	0,001 - 0,003
Cu (dissolvido)	35,7	197	0,21 - 0,88	1,78 - 4,55	0,41 - 3,33	0,18 - 2,76	3,30 - 10,93	0,30 - 1,74	3,57 - 7,19	0,44 - 2,96	0,35 - 0,66	0,28 - 1,03
Zn (total)	123	315	1,10 - 8,50	5,50 - 17,21	2,03 - 10,03	0,89 - 2,45	14,38 - 19,04	1,51 - 5,09	6,40 - 15,00	6,40 - 22,81	2,08 - 2,88	1,70 - 2,29
Pb (total)	35	91,3	0,19 - 1,19	0,92 - 3,40	0,40 - 0,84	0,23 - 0,99	4,97 - 7,24	0,22 - 1,21	2,03 - 5,69	0,11 - 0,66	0,34 - 0,41	0,13 - 0,52
Hg (total)	0,17	0,486	0,0003 - 0,001	0,001 - 0,01	0,001 - 0,003	0,0003 - 0,001	0,004 - 0,01	0,0003 - 0,001	0,002 - 0,003	0,001 - 0,01	0,001 - 0,001	0,001 - 0,001
As (total)	5,9	17	0,001 - 0,01	0,02 - 0,11	0,003 - 0,02	0,004 - 0,008	0,16 - 0,42	0,01 - 0,03	0,003 - 0,05	0,002 - 0,28	0,02 - 0,07	0,01 - 0,04

Fonte: Autoria própria.

### 2.2.3 Concentração de metais na biota

As análises de concentração dos metais na biota, de modo geral, refletem uma resposta mais clara do comportamento dos metais mensurados nos pontos amostrados ao longo da escala temporal do monitoramento desde o rompimento da barragem. Uma apreciação cautelosa dos dados de bioacumulação nas espécies dulcícolas foi executada a fim de clarificar as relações encontradas entre causa e efeito com biomarcadores na seção subsequente.

O monitoramento dulcícola abarcou espécies representantes de diferentes níveis tróficos como já mencionado, podendo dividi-los em três subgrupos principais: (i) coleta de *pool* de fitoplâncton e zooplâncton; (ii) coleta de espécies de camarão do gênero *Macrobrachium*, discriminando os principais tecidos para análise, tais como brânquia, hepatopâncreas e músculo; (iii) coleta de diferentes espécies de peixes, considerando diferentes hábitos alimentares, e retirando os principais tecidos para análise de metal, como brânquia, fígado e músculo. A

Figura 4 reúne imagens dos principais organismos coletados durante o monitoramento ecotoxicológico na estação seca (set/2018) na porção capixaba do Rio Doce, sua Foz e áreas adjacentes. Os dados individuais das análises químicas e de biomarcadores na biota podem ser acessados na Planilha de Dados Brutos. A coleta de girinos e de larvas de quironomídeos prevista no Plano de Trabalho (TR4) durante a primeira campanha não foi contemplada em sua totalidade e em todas as estações amostrais. Como os dados são incipientes, não serão apresentados no presente relatório, uma vez que estes organismos não ocorreram em todos os pontos da malha amostral pela sua baixa abundância no período seco do ano. Na segunda campanha (período chuvoso), um maior número de girinos pôde ser coletado, assim como larvas de quironomídeos em todas as estações amostrais previstas.

Figura 4: Fotos das espécies coletadas ao longo da porção capixaba da bacia do Rio Doce, estuário e áreas adjacentes durante monitoramento ecotoxicológico realizado na estação seca (set/2018). A = cascudo (*Hypostomus* sp.); B = tucunaré (*Cichla* sp.); C = mandi-amarelo (*Pimelodus maculatus*); D= curimatá (*Prochilodus vimboides*); E = bagre cumbaca (*Trachelyopterus striatulus*); F = lambari-do-rabo-amarelo (*Astyanax* sp.); G= traíra (*Hoplias malabaricus*), H= acará (*Geophagus brasiliensis*); I = pacu manchado (*Metynnis maculatus*); J= cascudo chinelo (*Loricariichthys castaneus*); K= piranha vermelha (*Pygocentrus nattereri*); L= caçari (*Genidens genidens*); M = carapeba (*Eucinostomus* sp.); N = peixe-galo (*Selene vomer*); O= tamboatá (*Hoplosternum litoralle*); P= ticupá (*Pomadasys ramosus*); Q = espécie de girino; R = *Macrobrachium acanthurus*; S= *M. jelskii*; e T = *M. amazonicum*.



Fonte: Autoria própria.

### 2.2.3.1 Principais resultados

Um padrão no acúmulo dos metais Cromo (Cr), Cádmio (Cd) e Zinco (Zn) foi observado em todas as espécies representantes dos diferentes níveis tróficos: uma maior concentração desses metais no fitoplâncton e zooplâncton, na brânquia e no hepatopâncreas de camarão, na brânquia e fígado de peixe. Este padrão foi evidente nos indivíduos coletados no ponto do Rio Doce em Regência (RDR) quando comparado aos outros pontos. Embora a concentração para os mesmos metais também tenha sido maior no músculo de camarão e peixe no ponto RDR, essa diferença foi mais sutil do que o observado na brânquia e no hepatopâncreas (Figura 5).

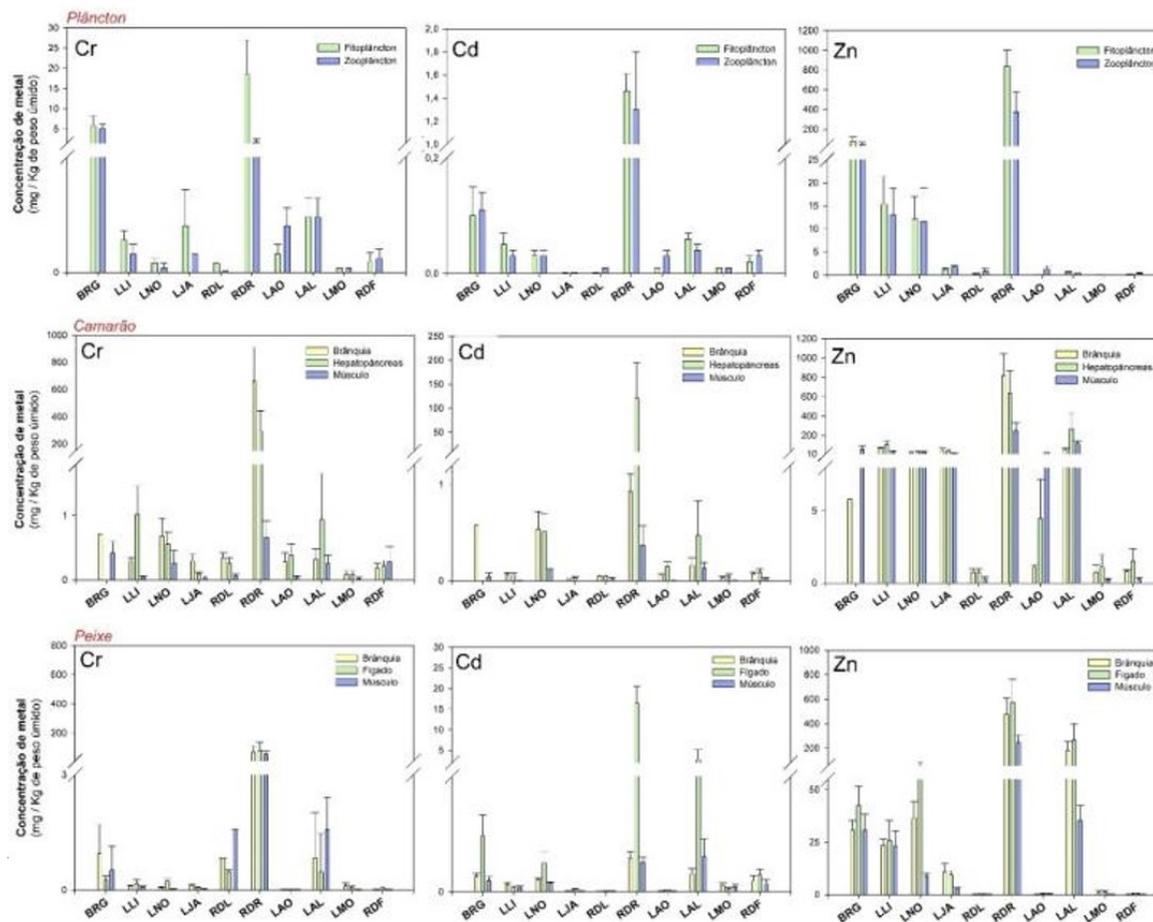
A bioacumulação de Ferro (Fe) no zooplâncton e em todos os tecidos de camarão foi marcadamente maior no ponto da Foz do Rio Doce (RDF) comparada as demais estações amostrais (ver Tabela 6 e Tabela 7).

### **Fitoplâncton e Zooplâncton**

Ao compararmos a concentração de Ferro acumulado no zooplâncton com dados obtidos aos amostrados antes do rompimento da barragem na Foz do Rio Doce, observamos que a concentração de Ferro nas amostras coletadas na campanha de setembro de 2018 foi aproximadamente 60 vezes superior à concentração encontrada nos organismos coletados em novembro de 2015, de acordo com os resultados apresentados no Relatório Técnico-Científico - FURG/ICMBio (Bianchini, 2019), indicando um nítido aumento na bioacumulação deste metal, dentro da escala temporal. A concentração de Fe no zooplâncton foi de aproximadamente 917 mg/kg de peso úmido enquanto que dados anteriores revelaram 15,55 mg/kg de peso úmido coletados na região da Foz (Bianchini, 2019).

Para os metais que se demonstraram mais abundantes no zooplâncton coletado no ponto do Rio Doce em Regência, altos níveis de Chumbo, Cromo, Cobre e Arsênio foram encontrados quando comparados aos valores pretéritos da Foz no Rio Doce (Bianchini, 2019). A concentração de Cromo e Cádmio, metais que tiveram aumento sobressaltados em ambos níveis tróficos, foi de 1,75 e 1,3 mg/kg de peso úmido, respectivamente, nas amostras de zooplâncton coletadas na primeira campanha do presente monitoramento, enquanto que a concentração de Cromo e Cádmio no zooplâncton amostrado anteriormente ao rompimento da barragem esteve em 0,15 e 0,0011 mg/kg de peso úmido, respectivamente.

Figura 5: Concentração de Cromo (Cr), Cádmiio (Cd) e Zinco (Zn) (mg/kg de peso úmido) em Fitoplâncton; Zooplâncton; brânquia, hepatopâncreas e músculo de camarão; e brânquia, fígado e músculo de peixe nos dez pontos amostrados na campanha de monitoramento dulcícola. Destaque para o ponto no Rio Doce em Regência (RDR) que apresentou a maior concentração desses metais nos três subgrupos avaliados. Os dados estão apresentados como média  $\pm$  erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

Tabela 6: Concentração de metais (média ± erro padrão e mediana; mg/kg de peso úmido) no pool de fitoplâncton e zooplâncton coletados nos dez pontos amostrados no Rio Doce e estuário.

Espécie	Ponto	Código Ponto	N	Cr		Cd		Cu		Fe		Mn		Zn		Pb		Hg		As			
				mg / kg peso úmido																			
				Média (± erro padrão)	Mediana																		
Fitoplâncton	17	BRG	7	5,75 ± 2,39	4,24	0,10 ± 0,05	0,04	2,95 ± 0,77	2,45	166,25 ± 76,30	55,99	554,63 ± 275,93	47,20	76,93 ± 44,74	47,03	0,08 ± 0,03	0,06	0,01 ± 0,01	0,05	0,09 ± 0,05	0,05		
	18	LLI	5	0,07 ± 0,02	0,08	0,05 ± 0,02	0,05	0,39 ± 0,16	0,32	300,70 ± 157,70	181,71	1,36 ± 0,73	0,28	15,37 ± 6,06	10,91	0,30 ± 0,20	0,04	0,002 ± 0,00	0,02	0,02 ± 0,00	0,03		
	19	LNO	5	0,02 ± 0,01	0,02	0,03 ± 0,01	0,03	0,58 ± 0,06	0,50	78,38 ± 31,27	43,42	1,39 ± 0,18	1,43	12,16 ± 4,88	7,63	0,10 ± 0,04	0,05	0,02 ± 0,00	0,22	0,15 ± 0,13	0,01		
	20	LJA	4	0,10 ± 0,08	0,02	0,001 ± 0,00	0,00	0,34 ± 0,02	0,34	6,44 ± 2,69	5,56	0,45 ± 0,29	0,27	1,20 ± 0,38	1,03	0,07 ± 0,04	0,03	0,004 ± 0,00	0,03	0,04 ± 0,03	0,02		
	21	RDL	5	0,002 ± 0,00	0,00	0,01 ± 0,00	0,01	0,11 ± 0,06	0,08	0,35 ± 0,16	0,16	1,01 ± 0,35	0,75	0,27 ± 0,15	0,14	0,01 ± 0,00	0,02	0,01 ± 0,00	0,04	0,02 ± 0,01	0,02		
	22	RDR	5	18,41 ± 8,67	13,02	1,46 ± 0,15	1,44	3,80 ± 3,58	0,23	5,37 ± 4,41	0,84	0,034 ± 0,01	0,02	834,91 ± 165,34	724,49	0,03 ± 0,01	0,02	0,003 ± 0,00	0,03	0,02 ± 0,01	0,00		
	23	LAO	5	0,04 ± 0,02	0,03	0,01 ± 0,00	0,01	0,06 ± 0,01	0,06	9,99 ± 2,41	7,445	0,08 ± 0,02	0,08	0,11 ± 0,02	0,11	0,02 ± 0,01	0,01	0,004 ± 0,00	0,04	0,03 ± 0,01	0,02		
	24	LAL	5	0,12 ± 0,04	0,10	0,06 ± 0,01	0,07	0,36 ± 0,10	0,25	258,42 ± 42,31	285,40	4,48 ± 0,58	3,82	0,60 ± 0,09	0,70	0,10 ± 0,03	0,08	0,01 ± 0,00	0,04	0,05 ± 0,02	0,04		
	25	LMO	5	0,01 ± 0,00	0,01	0,01 ± 0,00	0,01	0,73 ± 0,33	0,65	5,26 ± 2,37	2,98	0,07 ± 0,02	0,05	0,10 ± 0,03	0,07	0,01 ± 0,01	0,01	0,003 ± 0,00	0,02	0,03 ± 0,01	0,04		
	26	RDF	5	0,02 ± 0,02	0,01	0,02 ± 0,01	0,01	0,04 ± 0,02	0,01	6,72 ± 4,00	5,39	0,23 ± 0,09	0,20	0,11 ± 0,04	0,10	0,02 ± 0,01	0,00	0,003 ± 0,00	0,03	0,04 ± 0,01	0,04		
Zooplâncton	17	BRG	5	5,15 ± 1,05	5,66	0,11 ± 0,03	0,1	2,28 ± 0,69	2,27	123,56 ± 37,25	121,02	124,65 ± 62,34	95,88	46,76 ± 18,05	31,28	0,07 ± 0,04	0,04	0,01 ± 0,00	0,04	0,19 ± 0,14	0,01		
	18	LLI	5	0,04 ± 0,02	0,04	0,03 ± 0,01	0,02	0,29 ± 0,16	0,15	27,06 ± 7,66	20,01	1,03 ± 0,52	0,50	13,02 ± 5,72	5,89	0,20 ± 0,18	0,02	0,002 ± 0,00	0,02	0,01 ± 0,00	0,01		
	19	LNO	5	0,01 ± 0,01	0,02	0,03 ± 0,01	0,02	0,12 ± 0,01	0,12	9,00 ± 1,17	8,26	1,38 ± 0,13	1,50	11,60 ± 7,32	4,26	0,02 ± 0,01	0,01	0,02 ± 0,00	0,19	0,04 ± 0,02	0,05		
	20	LJA	4	0,04 ± 0,00	0,04	0,002 ± 0,00	0,00	0,16 ± 0,05	0,18	6,51 ± 1,36	5,69	0,34 ± 0,06	0,35	1,78 ± 0,27	1,87	0,05 ± 0,01	0,05	0,01 ± 0,00	0,05	0,01 ± 0,01	0,01		
	21	RDL	5	0,003 ± 0,00	0,00	0,01 ± 0,00	0,01	0,04 ± 0,02	0,03	0,54 ± 0,31	0,27	0,89 ± 0,15	0,85	0,78 ± 0,64	0,18	0,02 ± 0,00	0,01	0,004 ± 0,00	0,04	0,03 ± 0,02	0,02		
	22	RDR	5	1,75 ± 0,71	0,60	1,30 ± 0,50	0,87	1,81 ± 1,17	0,18	1,30 ± 0,28	1,60	0,27 ± 0,12	0,12	373,81 ± 202,32	93,42	0,043 ± 0,02	0,02	0,003 ± 0,00	0,03	0,10 ± 0,03	0,08		
	23	LAO	5	0,10 ± 0,04	0,06	0,03 ± 0,01	0,03	2,26 ± 1,2	1,14	17,18 ± 4,17	18,61	0,15 ± 0,03	0,13	1,33 ± 0,70	0,6	0,03 ± 0,02	0,01	0,01 ± 0,00	0,11	0,07 ± 0,03	0,07		
	24	LAL	5	0,12 ± 0,04	0,10	0,04 ± 0,01	0,04	0,59 ± 0,22	0,29	666,53 ± 496,17	209,41	3,14 ± 0,73	3,43	0,40 ± 0,05	0,35	0,25 ± 0,21	0,03	0,004 ± 0,00	0,04	0,34 ± 0,27	0,11		

Espécie	Ponto	Código Ponto	N	Cr		Cd		Cu		Fe		Mn		Zn		Pb		Hg		As					
				mg / kg peso úmido																					
				Média (± erro padrão)	Mediana																				
	25	LMO	5	0,01 ± 0,00	0,01	0,01 ± 0,00	0,01	0,49 ± 0,32	0,07	4,57 ± 0,89	4,24	0,05 ± 0,03	0,03	0,08 ± 0,02	0,09	0,004 ± 0,00	0,00	0,003 ± 0,00	0,02	0,02 ± 0,00	0,02				
	26	RDF	4	0,03 ± 0,02	0,02	0,03 ± 0,01	0,02	0,16 ± 0,08	0,10	917,16 ± 326,67	718,11	0,07 ± 0,02	0,08	0,40 ± 0,21	0,27	0,061 ± 0,04	0,03	0,004 ± 0,00	0,024	0,20 ± 0,15	0,05				

Fonte: Autoria própria.

### **Macrobrachium sp. (Camarão dulcícola)**

De modo geral, o acúmulo dos metais avaliados nas espécies de camarão é marcadamente maior no tecido branquial e hepatopâncreas do que no músculo (Tabela 7). Abaixo, subdividimos os metais e confrontamos aos dados descritos na literatura para acumulação dos metais coincidentes em espécies representantes da família Palaemonidae, que constitui a mesma família dos camarões dulcícolas do gênero *Macrobrachium* coletados no presente relatório, devido à ausência de dados pretéritos de bioacumulação de metais em camarões do Rio Doce:

**Cromo:** exclusivamente no ponto referente ao Rio Doce em Regência (RDR), a concentração de Cr encontrada na brânquia e no hepatopâncreas foi aproximadamente 100 e 50 vezes maior respectivamente, do que a concentração mais alta mensurada no cefalotórax de *Palaemonetes argentinus* provenientes de ambientes antropizados (Bertrand et al., 2018). Deve-se considerar que para *P. argentinus* no estudo acima citado a concentração é dada em relação ao peso seco do animal (Bertrand et al., 2018), e a concentração mensurada no presente relatório é relativa ao peso úmido da amostra. A concentração no músculo esteve próxima a encontrada em *P. argentinus* (Bertrand et al., 2018) em todos os pontos amostrados.

**Cádmio:** no ponto do Rio Doce em Regência (RDR), a concentração no hepatopâncreas esteve acima da encontrada no cefalotórax de *P. argentinus* em 240 vezes. Na brânquia o valor encontrado foi 2 vezes maior do que o encontrado em *P. argentinus* (Bertrand et al., 2018). As concentrações de Cádmio estiveram acima na maioria dos tecidos e na maioria dos pontos quando comparado ao mensurado no indivíduo inteiro de *Macrobrachium macrobrachium* (Ezemonye et al., 2019).

**Cobre:** a concentração esteve abaixo da concentração encontrada em *P. argentinus* em todos os pontos amostrados (Bertrand et al. 2018). No entanto foi maior do que a mensurada em *M. macrobrachium* (Ezemonye et al., 2019) exceto nos pontos LLI e LMO.

**Ferro:** na brânquia e no hepatopâncreas dos camarões coletados no estuário da Foz do Rio Doce (RDF) a concentração foi 2 e 3 vezes maior, respectivamente, do que a concentração encontrada no cefalotórax em *P. argentinus* (Bertrand et al., 2018).

**Manganês:** a concentração encontrada em todos os tecidos esteve abaixo da encontrada em *P. argentinus* (Bertrand et al., 2018).

**Zinco:** os maiores valores encontrados foram na brânquia e hepatopâncreas no ponto do Rio Doce em Regência (RDR), seguido pelo encontrado na Lagoa do Areal (LAL). Comparando-os aos valores estimados na literatura, a concentração na brânquia, no hepatopâncreas e no músculo foi maior nos animais coletados no Rio quando comparado aos valores estimados no cefalotórax de *P. argentinus* (Bertrand et al., 2015; 2018) e de *Macrobrachium macrobrachium* (Ezemonye et al., 2019).

**Chumbo:** a concentração mensurada de todos os tecidos em todos os pontos esteve abaixo da comparada ao de *P. argentinus* (Bertrand et al., 2018).

**Mercúrio:** os níveis estiveram abaixo das concentrações encontradas em *P. argentinus* (Bertrand et al., 2016), em *M. depressimanum* e em *M. jelskii* (Galvão et al., 2018).

**Arsênio:** em todos os pontos a concentração encontrada em todos os tecidos esteve abaixo da encontrada em *P. argentinus* (Bertrand et al., 2016).

Tabela 7: Concentração de metais (média ± erro padrão e mediana; mg/kg de peso úmido) na brânquia, hepatopâncreas e músculo de camarão dulcícola *Macrobrachium* sp. coletados nos dez pontos amostrados no Rio Doce e estuário.

Espécie	Ponto	Código Ponto	N	Tecido	Cr		Cd		Cu		Fe		Mn		Zn		Pb		Hg		As					
					mg / kg peso úmido																					
					Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana
Camarão dulcícola	17	BRG	1	Brânquia	0,36		0,58		0,99		175,25		3,84		5,79		0,39		0,02		0,02					
			4	Músculo	0,21 ± 0,09	0,19	0,04 ± 0,04	0,03	1,10 ± 0,71	0,57	8,74 ± 4,57	4,64	0,23 ± 0,10	0,22	61,52 ± 31,27	45,37	0,53 ± 0,27	0,52	0,002 ± 0,00	0,01	0,05 ± 0,04	0,03				
	18	LLI	2	Brânquia	0,15 ± 0,02	0,15	0,07 ± 0,01	0,07	0,67 ± 0,43	0,67	2,26 ± 0,67	2,26	0,72 ± 0,14	0,72	67,30 ± 10,13	67,30	0,03 ± 0,03	0,03	0,01 ± 0,00	0,11	0,06					
			7	Hepatopâncreas	0,51 ± 0,22	0,22	0,06 ± 0,02	0,04	0,29 ± 0,03	0,26	90,28 ± 22,18	63,90	0,31 ± 0,10	0,32	107,49 ± 38,12	92,06	0,10 ± 0,04	0,04	0,01 ± 0,00	0,04	0,06 ± 0,02	0,04				
			7	Músculo	0,02 ± 0,01	0,02	0,01 ± 0,00	0,01	0,08 ± 0,02	0,08	5,35 ± 1,02	5,73	0,07 ± 0,03	0,04	29,60 ± 14,38	12,85	0,03 ± 0,02	0,00	0,001 ± 0,00	0,01	0,09 ± 0,01	0,09				
	19	LNO	5	Brânquia	0,34 ± 0,14	0,15	0,54 ± 0,18	0,39	11,19 ± 3,02	7,15	20,39 ± 9,36	14,61	2,12 ± 0,48	2,07	27,86 ± 10,35	32,17	0,49 ± 0,14	0,37	0,06 ± 0,01	0,63	0,08 ± 0,04	0,05				
			5	Hepatopâncreas	0,28 ± 0,09	0,21	0,51 ± 0,19	0,42	44,30 ± 36,86	6,39	21,65 ± 7,33	15,89	4,25 ± 1,53	3,60	33,52 ± 13,57	23,77	0,52 ± 0,17	0,46	0,09 ± 0,04	0,80	0,13 ± 0,06	0,11				
			5	Músculo	0,13 ± 0,10	0,04	0,11 ± 0,01	0,11	1,22 ± 0,38	1,17	1,88 ± 0,67	1,43	1,53 ± 1,42	0,13	24,73 ± 7,51	24,20	0,07 ± 0,01	0,07	0,02 ± 0,00	0,21	0,08 ± 0,02	0,09				
	20	LJA	6	Brânquia	0,15 ± 0,05	0,11	0,02 ± 0,00	0,02	39,75 ± 8,79	33,27	197,63 ± 71,34	126,03	2,17 ± 0,45	2,40	46,59 ± 17,57	26,19	0,17 ± 0,13	0,02	0,01 ± 0,00	0,11	0,32 ± 0,21	0,11				
			6	Hepatopâncreas	0,05 ± 0,01	0,04	0,03 ± 0,01	0,03	21,59 ± 4,00	20,37	144,71 ± 42,97	135,18	2,05 ± 0,61	1,46	40,40 ± 23,04	18,48	0,10 ± 0,07	0,03	0,01 ± 0,00	0,08	0,60 ± 0,53	0,07				
			6	Músculo	0,02 ± 0,00	0,02	0,003 ± 0,00	0,00	2,13 ± 0,49	2,24	11,30 ± 3,64	9,35	0,58 ± 0,11	0,55	13,59 ± 6,75	9,07	0,004 ± 0,00	0,00	0,002 ± 0,00	0,01	0,06 ± 0,03	0,03				
	21	RDL	6	Brânquia	0,17 ± 0,04	0,13	0,05 ± 0,01	0,04	1,3 ± 1,05	0,18	10,72 ± 3,24	10,55	11,79 ± 3,56	11,60	0,73 ± 0,25	0,69	0,13 ± 0,03	0,14	0,03 ± 0,00	0,24	0,14 ± 0,03	0,14				
			9	Hepatopâncreas	0,13 ± 0,04	0,08	0,05 ± 0,01	0,05	1,29 ± 0,46	0,77	5,96 ± 2,53	5,01	6,55 ± 2,79	5,51	0,74 ± 0,21	0,50	0,13 ± 0,05	0,14	0,03 ± 0,01	0,24	0,10 ± 0,03	0,07				
			9	Músculo	0,03 ± 0,02	0,02	0,02 ± 0,01	0,01	1,04 ± 0,97	0,03	1,73 ± 0,84	1,19	1,90 ± 0,92	1,31	0,27 ± 0,16	0,09	0,04 ± 0,02	0,02	0,01 ± 0,01	0,04	0,02 ± 0,01	0,01				
	22	RDR	6	Brânquia	660,58 ± 251,23	433,92	0,93 ± 0,18	0,91	4,95 ± 3,54	0,41	1,21 ± 0,68	0,22	0,88 ± 0,47	0,53	820,38 ± 218,71	760,07	0,13 ± 0,03	0,11	0,01 ± 0,00	0,12	0,49 ± 0,35	0,11				
7			Hepatopâncreas	294,11 ± 148,44	54,57	121,75 ± 72,64	59,16	0,75 ± 0,50	0,23	1,47 ± 0,52	1,07	0,58 ± 0,30	0,33	636,18 ± 234,71	670,39	0,08 ± 0,02	0,07	0,01 ± 0,00	0,09	0,26 ± 0,09	0,12					
6			Músculo	0,33 ± 0,13	0,34	0,37 ± 0,20	0,17	0,07 ± 0,02	0,07	0,12 ± 0,07	0,05	0,09 ± 0,02	0,08	250,41 ± 81,24	341,44	0,03 ± 0,01	0,02	0,002 ± 0,00	0,02	0,03 ± 0,01	0,03					

Espécie	Ponto	Código Ponto	N	Tecido	Cr		Cd		Cu		Fe		Mn		Zn		Pb		Hg		As					
					mg / kg peso úmido																					
					Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana		
	23	LAO	6	Brânquia	0,14 ± 0,07	0,10	0,06 ± 0,01	0,06	3,62 ± 2,36	0,39	36,55 ± 8,46	34,43	0,34 ± 0,09	0,30	1,11 ± 0,16	1,08	0,06 ± 0,02	0,04	0,02 ± 0,00	0,23	0,20 ± 0,05	0,18				
			6	Hepatopâncreas	0,19 ± 0,09	0,13	0,15 ± 0,05	0,104	21,77 ± 16,94	6,56	89,40 ± 28,53	56,65	0,51 ± 0,13	0,43	4,49 ± 2,70	1,65	0,13 ± 0,05	0,09	0,06 ± 0,03	0,31	0,53 ± 0,25	0,28				
			6	Músculo	0,02 ± 0,01	0,02	0,01 ± 0,00	0,01	0,86 ± 0,55	0,09	12,45 ± 4,35	10,23	0,07 ± 0,02	0,06	0,23 ± 0,04	0,22	0,01 ± 0,00	0,01	0,01 ± 0,00	0,04	0,03 ± 0,01	0,02				
	24	LAL	2	Brânquia	0,16 ± 0,08	0,16	0,16 ± 0,08	0,16	56,90 ± 4,12	56,90	45,40 ± 13,54	45,40	7,61 ± 1,08	7,61	60,50 ± 3,99	60,50	0,32 ± 0,01	0,32	0,01 ± 0,00	0,05	0,23 ± 0,12	0,23				
			2	Hepatopâncreas	0,47 ± 0,36	0,47	0,47 ± 0,36	0,47	56,32 ± 38,12	56,32	289,99 ± 167,40	289,99	14,53 ± 8,03	14,53	268,25 ± 157,46	268,25	0,10 ± 0,02	0,10	0,01 ± 0,00	0,06	0,06 ± 0,01	0,06				
			4	Músculo	0,13 ± 0,06	0,12	0,13 ± 0,06	0,12	4,75 ± 0,43	4,98	8,18 ± 2,79	5,78	3,19 ± 2,59	0,65	114,73 ± 27,26	96,27	0,05 ± 0,03	0,03	0,01 ± 0,00	0,02	0,18 ± 0,11	0,11				
	25	LMO	2	Brânquia	0,04 ± 0,03	0,04	0,03 ± 0,02	0,03	0,24 ± 0,20	0,24	49,05 ± 25,55	49,05	0,13 ± 0,02	0,13	0,75 ± 0,48	0,75	0,06 ± 0,06	0,06	0,02 ± 0,01	0,16	0,12 ± 0,07	0,12				
			2	Hepatopâncreas	0,04 ± 0,03	0,04	0,04 ± 0,03	0,04	0,34 ± 0,31	0,34	111,26 ± 87,63	111,26	0,07 ± 0,05	0,06	1,11 ± 0,83	1,11	0,08 ± 0,02	0,08	0,02 ± 0,02	0,24	0,34 ± 0,30	0,34				
			2	Músculo	0,01 ± 0,01	0,01	0,01 ± 0,00	0,01	0,12 ± 0,01	0,14	24,02 ± 2,06	24,02	0,02 ± 0,00	0,02	0,23 ± 0,08	0,23	0,004 ± 0,00	0,00	0,004 ± 0,00	0,04	0,04 ± 0,01	0,04				
26	RDF	7	Brânquia	0,09 ± 0,04	0,05	0,07 ± 0,02	0,06	3,59 ± 2,23	0,93	801,39 ± 172,06	924,25	0,39 ± 0,12	0,34	0,80 ± 0,10	0,84	0,05 ± 0,02	0,03	0,01 ± 0,00	0,12	0,16 ± 0,04	0,14					
		8	Hepatopâncreas	0,11 ± 0,04	0,06	0,09 ± 0,03	0,05	1,74 ± 0,75	0,88	1167,65 ± 268,73	1204,98	1,14 ± 0,63	0,6	1,54 ± 0,86	0,73	0,09 ± 0,03	0,09	0,02 ± 0,01	0,11	0,29 ± 0,19	0,07					
		8	Músculo	0,14 ± 0,12	0,02	0,02 ± 0,01	0,01	1,02 ± 0,56	0,35	45,21 ± 10,55	36,62	0,12 ± 0,05	0,07	0,26 ± 0,12	0,15	0,06 ± 0,06	0,00	0,01 ± 0,00	0,02	0,04 ± 0,02	0,01					

Fonte: Autoria própria.

### Peixes dulcícolas

Assim como nas amostras de fitoplâncton e zooplâncton, e diferentes tecidos de camarão, a concentração de Cromo, Cádmio e Zinco foram maiores nos agrupamentos de espécies de peixe coletados no ponto do Rio Doce em Regência (RDR). A comparação com dados obtidos da concentração de Cr, Cd e Fe no músculo de peixes coletados em campanhas anteriores ao rompimento da barragem em pontos amostrados entre o Rio Doce em Regência e a Foz do Rio Doce (pontos de coleta próximos aos executados no presente relatório) revelou um aumento da concentração dos metais Cr e Cd no ponto do Rio Doce em Regência. A concentração de Ferro foi elevada em todos os pontos, especialmente no ponto da Foz do Rio Doce. Os valores anteriores ao rompimento da barragem foram de 0,06 mg/kg do peso úmido de Cr, valores abaixo do limite de detecção para Cd, e de Fe 13,91 mg/kg do peso úmido no músculo dos peixes (Bianchini, 2019).

De modo geral a concentração de Cr e Cd nos tecidos isolados dos peixes foram maiores em todos os pontos quando comparados ao referenciado pela literatura atual (Paulino et al., 2014; Lima et al., 2015) para as mesmas espécies utilizadas e agrupadas neste estudo. Com destaque para o ponto RDR, em que a concentração de todos os metais estiveram acima do encontrado na literatura (Tabela 8).

**Zinco:** o acúmulo acompanhou a concentração de Cr e Cd, e foi evidente nas brânquias, fígado e músculo dos peixes coletados em RDR, seguido por alta concentração nos peixes coletados em LAL. Quando confrontado com os dados da literatura (Paulino et al., 2014; Lima et al., 2015) para mesmas espécies coincidentes com algumas espécies de peixe tratadas nesse relatório, as amostras oriundas dos pontos BRG, LLI, LNO, LJA, RDR e LAL apresentaram maior concentração de zinco em ambos os tecidos (Tabela 8).

**Ferro:** a concentração nos peixes amostrados no presente relatório foi maior do que a comparada com a encontrada na literatura para a espécie *P. maculatus* (mandi amarelo) (Paulino et al., 2014) na maioria dos tecidos e em quase todos os pontos amostrados, principalmente na Foz do Rio Doce (RDF), nas Lagoas situadas próximas ao ponto da Foz e em Baixo Guandu. No entanto, a elevada concentração na brânquia acompanhada de elevada concentração no fígado dos peixes coletados foi apenas encontrada nos peixes da Foz do Rio Doce e em Baixo Guandu (Tabela 8).

Tabela 8: Concentração dos principais metais na brânquia, fígado e músculo (mg/kg de peso úmido) do agrupamento de diversas espécies de peixes dulcícolas coletados na primeira campanha de monitoramento dos dez pontos do Rio Doce e estuário no Espírito Santo, bem como em outros estudos com as mesmas espécies compilados a partir da literatura (Lima et al. 2015a, Paulino et al. 2014b). Os dados obtidos estão expressos como mediana e os valores referenciados na literatura estão expressos como média  $\pm$  erro padrão (\*) ou valores mínimo e máximo (\*\*).

Espécie	Ponto	Código Ponto	N	Tecido	Cr	Cd	Zn	Fe
					mg/kg de peso úmido			
					Mediana	Mediana	Mediana	Mediana
Peixe dulcícola	17	BRG	20	Brânquia	0,10	0,09	28,30	47,30
			19	Fígado	0,10	0,13	37,07	103,78
			15	Músculo	0,08	0,09	15,83	18,55
	18	LLI	14	Brânquia	0,08	0,03	21,34	19,22
			10	Fígado	0,03	0,05	17,37	64,09
			9	Músculo	0,03	0,01	19,46	9,00
	19	LNO	19	Brânquia	0,04	0,09	34,65	16,09
			11	Fígado	0,04	0,07	10,10	5,27
			18	Músculo	0,02	0,07	7,48	1,62
	20	LJA	15	Brânquia	0,09	0,01	3,85	10,04
			20	Fígado	0,02	0,02	6,20	15,17
			21	Músculo	0,03	0,01	1,87	8,97
	21	RDL	6	Brânquia	0,01	0,00	0,10	0,35
			13	Fígado	0,02	0,01	0,34	0,62
			10	Músculo	0,01	0,01	0,24	0,39
	22	RDR	11	Brânquia	4,13	0,29	372,83	4,70
			11	Fígado	0,19	0,09	69,90	77,13
			6	Músculo	19,68	0,25	249,29	1,26
	23	LAO	6	Brânquia	0,01	0,01	0,23	68,45
			6	Fígado	0,01	0,01	0,19	37,73
			6	Músculo	0,01	0,01	0,16	17,97
	24	LAL	2	Brânquia	0,19	0,09	69,90	77,13
			2	Fígado	0,04	0,11	127,84	12,01
			4	Músculo	0,08	0,08	26,45	9,08
	25	LMO	2	Brânquia	0,01	0,03	0,20	23,34
			2	Fígado	0,01	0,03	0,20	8,10
2			Músculo	0,01	0,02	0,10	15,40	
26	RDF	7	Brânquia	0,02	0,02	0,23	42,04	

Espécie	Ponto	Código Ponto	N	Tecido	Cr	Cd	Zn	Fe
					mg/kg de peso úmido			
					Mediana	Mediana	Mediana	Mediana
			8	Fígado	0,01	0,04	0,34	182,32
			8	Músculo	0,01	0,02	0,10	8,93
<i>A. bimaculatus</i> <sup>a</sup>			2	Músculo	0,009 ± 0,006*	0,007 ± 0,002*	0,433 ± 0,04*	-
<i>Astyanax sp.</i> <sup>a</sup>			2	Músculo	0,002 ± 0,001*	0,007 ± 0,002*	0,999 ± 0,12*	-
<i>Hoplias malabaricus</i> <sup>a</sup>			8	Músculo	0,026 ± 0,01*	0,033 ± 0,005*	0,286 ± 0,17*	-
<i>Pygocentrus nattereri</i> <sup>a</sup>			12	Músculo	0,053 ± 0,007*	0,046 ± 0,001*	0,182 ± 0,07*	-
<i>Pimelodus maculatus</i> <sup>b</sup>			15	Brânquia	0,4 - 1,3**	-	5,45 - 17,25**	6,1 - 19,7**
			15	Fígado	0,1 - 1,0**	-	0,02 - 17,6**	2,1 - 34,8**

Fonte: Autoria própria.

\*Valores representados pela média ± erro padrão da média

\*\*Valores de mínimo e máximo da concentração encontrada

#### 2.2.4 Análise de biomarcadores

A Tabela 9 reúne os resultados dos biomarcadores mensurados no fitoplâncton e zooplâncton coletados durante a primeira campanha de monitoramento ecotoxicológico da porção capixaba do rio Doce, estuário e áreas adjacentes. A Tabela 10 reúne os resultados dos biomarcadores mensurados até o momento nas espécies de camarão, enquanto a Tabela 11 sumariza os resultados de biomarcadores mensurados nas espécies de peixe, com exceção das análises histológicas que serão apresentados na sessão subsequente. Cabe ressaltar, que os resultados das análises de biomarcadores não contemplam neste relatório a análise de danos no DNA (sítios AP) e biomarcadores de desregulação endócrina (vitelogenina e proteína da zona radiata), uma vez que estas análises demandaram um maior período de tempo para sua padronização, execução e interpretação, e poranto, serão devidamente apresentadas e discutidas no relatório final.

##### 2.2.4.1 Síntese dos resultados de biomarcadores:

No fitoplâncton, maiores níveis de dano oxidativo (Lipoperoxidação - LPO) foram observados nos organismos coletados em RDL e RDR. As amostras de fitoplâncton coletadas em RDF apresentaram um maior conteúdo de metalotioneínas (MT) comparado aquelas dos demais locais.

As amostras de zooplâncton provenientes de RDR apresentaram maiores valores médios de LPO e MT em relação às demais amostras provenientes de outros locais investigados.

No que tange aos camarões, os maiores níveis de dano lipídico (LPO) no hepatopâncreas foram encontrados nos espécimes coletado em LNO, seguido por LJA, LMO, RDL e RDR. Já nas brânquias, o maior nível de dano foi encontrado nos animais da foz do Rio Doce (RDF). Maiores valores médios de danos em proteínas (Oxidação de proteínas carboniladas - PCO) e conteúdo de metalotioneínas (MT) foram encontrados para os camarões coletados na Lagoa Monsarás (LMO). Por sua vez, a atividade da Na/K ATPase branquial (NKA) mostrou-se menor nos animais de RDR e RDL em comparação aos demais locais.

Para os peixes, os resultados que mais se destacaram foram o aumento de dano lipídico nos animais coletados em RDR e RDF, em relação aos demais. Os maiores valores médios no conteúdo de MT no fígado foram encontrados nos animais coletados em RDR e LAL, seguido de RDL e LAO. Com relação à catalase (CAT) um aumento na atividade desta enzima de defesa antioxidante tanto na brânquia quanto no fígado foi evidenciado em RDL e LMO. Os peixes coletados em RDL também apresentaram o menor valor médio na atividade da enzima lactato –desidrogenase (LDH), e em contrapartida, a maior atividade da malato-desidrogenase (MDH) no fígado.

Tabela 9: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO) e concentração de metalotioneínas (MT) mensurados em amostras de fito e zooplâncton (pools) coletados na porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacente durante a estação seca (set/2018). Os resultados são expressos em média, erro padrão (EP) (N = 5 – 6 / ponto) e mediana. Em negrito destacam-se as médias mais elevadas encontradas para cada parâmetro biológico.

Ponto	Fitoplâncton						Zooplâncton					
	LPO (nmol MDA / mg prot.)			MT ((µg MT / mg prot.)			LPO (nmol MDA / mg prot.)			MT ((µg MT / mg prot.)		
	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana
BRG	5,64	0,99	6,61	33,73	4,06	36,51	2,22	0,52	1,73	7,56	1,16	8,43
LLI	5,24	0,59	5,33	26,18	2,34	26,18	4,12	1,27	3,13	8,98	3,19	6,13
LNO	8,67	1,15	8,75	24,33	3,6	26,7	2,14	0,4	1,79	7,47	1,3	6,99
LJA	4,51	1,33	3,88	27,27	5,6	27,22	2,82	0,64	2,69	9,4	0,96	9,64
RDL	<b>24,21</b>	6,04	26,6	19,02	1,25	18,24	1,29	0,17	1,12	11,75	0,54	8,3
RDR	<b>22,44</b>	12,9	31,26	27,97	3,95	23,13	<b>6,74</b>	1,17	6,16	<b>44,47</b>	11,16	30,79
LAO	3,13	1,12	1,67	21,03	2,13	23,35	1,36	0,65	0,7	11,03	0,76	7,04
LAL	2,13	0,69	1,76	19,15	1,95	20,27	1,02	0,17	0,48	11,2	0,06	6,49
LMO	0,97	0,19	1,06	19,25	10,36	20,11	1,27	0,57	0,49	6,63	1,96	8,92
RDF	<b>37</b>	13,58	31,44	<b>40,06</b>	7,16	35,99	4,22	1,07	5,09	8,07	2,84	5,69

Fonte: Autoria própria.

Tabela 10: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO), concentração de metalotioneínas (MT), conteúdo de proteínas carboniladas (PCO) e atividade da Na/K ATPase (NKA) mensurados em diferentes tecidos de camarões (hepat. = hepatopâncreas; brânquia; musc. = músculo) do gênero *Macrobrachium* coletados na porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacente durante a estação seca (set/2018). Os resultados são expressos em média, erro padrão (EP) (N = 6 – 10 / ponto) e mediana. Em negrito destacam-se as médias mais elevadas ou menores encontradas para cada parâmetro biológico.

Ponto	Camarão														
	LPO hepat. (nmol MDA / mg prot.)			LPO brânquia (µg MT / mg prot.)			PCO musc. (nmol MDA / mg prot.)			MT (µg MT / mg prot.)			NKA (µmoles de Pi / mg prot. / h)		
	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana
BRG	4,52	2,12	1,71	0,89	0,18	0,88	11,17	0,78	10,89	2,23	0,89	1,6	2,37	0,36	1,83
LLI	11,62	0,79	11,12	0,78	0,18	0,98	13,7	1,99	10,98	2,67	0,52	2,59	2,95	0,55	2,63
LNO	<b>14,62</b>	1,19	14,2	1,15	0,18	1,35	9,03	0,74	7,48	2,63	0,64	2,65	7,48	2,29	6,5
LJA	14,09	0,98	13,32	2,55	1,23	1,11	6,38	0,94	4,55	2,84	0,26	2,56	7,58	1,18	6,05
RDL	12,31	2,42	13,87	0,49	0,27	0,21	7,79	0,54	7,21	11,7	1,49	11,9	<b>1,83</b>	0,24	1,58
RDR	11,52	2,15	7,21	0,89	0,22	0,54	6,68	0,71	7,49	6,12	1,76	8,27	3,88	0,75	4,08
LAO	10,2	1,74	8,18	1,05	0,29	0,69	6,06	0,97	5,88	6,81	1,4	7,05	3,07	0,45	2,58
LAL	6,48	1,5	5,26	0,79	0,2	0,79	4,4	0,63	3,97	3,45	0,36	3,7	3,19	0,39	2,81
LMO	13,05	2,42	13,68	1,6	0,35	1,6	<b>16,06</b>	4	9,36	<b>15,02</b>	5,86	11,17	3,68	0,8	2,18
RDF	2,93	0,99	1,9	<b>3,02</b>	0,67	3,09	4,19	0,55	3,53	10,45	1,6	8,19	<b>1,92</b>	0,7	1,58

Fonte: Autoria própria.

Tabela 11: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO), concentração de metalotioneínas (MT), conteúdo de proteínas carboniladas (PCO), atividade da catalase (CAT), atividade da lactato desidrogenase (LDH), atividade da malato-desidrogenase (MDH) e frequência de micronúcleos (MN) mensurados em diferentes tecidos de espécies de peixes coletadas na porção capixaba do Rio Doce, estuário e áreas adjacente durante a estação seca (set/2018). Os resultados são expressos em média  $\pm$  erro padrão (EP) (N = 9 – 20 / ponto) e mediana.

		Peixes*										
BRG		LPO (fígado)	MT (fígado)	PCO (músculo)	CAT (fígado)	CAT (brânquia)	LDH (fígado)	LDH (brânquia)	MDH (fígado)	MDH (brânquia)	MN	
BRG	Média $\pm$ EP	0,77 $\pm$ 0,05	1,51 $\pm$ 0,17	31,98 $\pm$ 3,77	1,92 $\pm$ 0,21	0,25 $\pm$ 0,03	0,27 $\pm$ 0,07	0,43 $\pm$ 0,05	0,76 $\pm$ 0,07	0,65 $\pm$ 0,08	1,58 $\pm$ 0,35	
	Mediana	0,69	1,21	30,86	1,54	0,20	0,09	0,30	0,65	0,42	1,16	
LLI	Média $\pm$ EP	0,78 $\pm$ 0,05	1,46 $\pm$ 0,26	22,16 $\pm$ 3,05	1,29 $\pm$ 0,13	0,14 $\pm$ 0,01	0,07 $\pm$ 0,01	0,53 $\pm$ 0,05	0,57 $\pm$ 0,04	0,65 $\pm$ 0,06	1,00 $\pm$ 0,29	
	Mediana	0,8	1,64	18,21	1,34	0,14	0,07	0,49	0,60	0,61	1,00	
LNO	Média $\pm$ EP	0,76 $\pm$ 0,04	1,28 $\pm$ 0,18	23,71 $\pm$ 2,66	1,44 $\pm$ 0,18	0,13 $\pm$ 0,02	0,29 $\pm$ 0,08	0,47 $\pm$ 0,06	1,25 $\pm$ 0,16	0,47 $\pm$ 0,04	0,71 $\pm$ 0,18	
	Mediana	0,77	1,09	23,65	1,37	0,15	0,16	0,46	1,16	0,45	1,00	
LJA	Média $\pm$ EP	1,59 $\pm$ 0,19	1,77 $\pm$ 0,21	13,56 $\pm$ 1,73	1,38 $\pm$ 0,19	0,13 $\pm$ 0,02	0,11 $\pm$ 0,02	0,52 $\pm$ 0,04	1,50 $\pm$ 0,14	0,71 $\pm$ 0,12	0,77 $\pm$ 0,23	
	Mediana	1,25	1,46	8,23	1,29	0,10	0,07	0,52	1,54	0,60	0,00	
RDL	Média $\pm$ EP	2,11 $\pm$ 0,15	2,05 $\pm$ 0,18	10,36 $\pm$ 1,13	3,34 $\pm$ 0,57	0,39 $\pm$ 0,13	0,03 $\pm$ 0,01	0,29 $\pm$ 0,08	2,08 $\pm$ 0,40	1,05 $\pm$ 0,29	1,00 $\pm$ 0,24	
	Mediana	1,9	1,85	8,02	2,81	0,25	0,02	0,10	1,85	0,64	1,00	
RDR	Média $\pm$ EP	1,29 $\pm$ 0,15	2,1 $\pm$ 0,21	12,03 $\pm$ 1,7	2,92 $\pm$ 0,27	0,11 $\pm$ 0,01	0,41 $\pm$ 0,18	0,34 $\pm$ 0,05	1,63 $\pm$ 0,12	0,50 $\pm$ 0,04	1,18 $\pm$ 0,53	
	Mediana	1,09	2,32	9	3,16	0,10	0,11	0,36	1,60	0,53	0,00	
LAO	Média $\pm$ EP	1,68 $\pm$ 0,16	1,97 $\pm$ 0,21	6,63 $\pm$ 1,68	2,56 $\pm$ 0,43	0,12 $\pm$ 0,01	0,07 $\pm$ 0,02	0,44 $\pm$ 0,14	1,98 $\pm$ 0,28	0,71 $\pm$ 0,08	0,43 $\pm$ 0,1	
	Mediana	1,4	1,81	7,74	2,68	0,11	0,08	0,35	1,68	0,69	0,00	
LAL	Média $\pm$ EP	1,45 $\pm$ 0,1	2,1 $\pm$ 0,2	6,48 $\pm$ 0,88	1,90 $\pm$ 0,36	0,16 $\pm$ 0,02	0,26 $\pm$ 0,12	0,47 $\pm$ 0,06	1,55 $\pm$ 0,28	0,59 $\pm$ 0,06	0,30 $\pm$ 0,1	
	Mediana	1,2	2,28	5,14	1,42	0,13	0,11	0,40	1,25	0,52	0,00	
LMO	Média $\pm$ EP	1,8 $\pm$ 0,32	1,35 $\pm$ 0,23	9,03 $\pm$ 1,14	3,49 $\pm$ 0,40	0,41 $\pm$ 0,05	0,10 $\pm$ 0,04	0,24 $\pm$ 0,04	1,71 $\pm$ 0,40	0,52 $\pm$ 0,08	0,36 $\pm$ 0,23	
	Mediana	1,45	1,05	8,4	3,37	0,42	0,07	0,18	1,45	0,48	0,00	
RDF	Média $\pm$ EP	1,93 $\pm$ 0,18	1,8 $\pm$ 0,26	14,6 $\pm$ 3,51	2,30 $\pm$ 0,26	0,22 $\pm$ 0,01	0,39 $\pm$ 0,14	0,37 $\pm$ 0,04	1,46 $\pm$ 0,15	0,63 $\pm$ 0,05	0,47 $\pm$ 0,2	
	Mediana	1,77	1,5	9,57	2,14	0,22	0,08	0,33	1,59	0,65	0,00	

Fonte: Autoria própria.

\*(N total = 152 [20 - BRG ; 9 - LLI; 20 - LNO; 18 - LJA; 11 - RDR; 11 - RDL; 11 - LAO; 20 - LAL; 11 - LMO e 17 - RDL])

LPO - lipoperoxidação (nmol MDA / mg proteína)

MT - conteúdo de metalotioneínas ( $\mu$ g. MT / mg proteína)

PCO - conteúdo de proteínas carboniladas ( $\mu$ g. MT / mg proteína)

CAT- atividade da catalase (U / mg proteína)

LDH - atividade da lactato-desidrogenase (U / mg proteína)

MDH - atividade da malato-desidrogenase (U / mg proteína)

MN - frequência de micronúcleos (‰)

## 2.2.5 Análises histopatológicas

As alterações de fígado e brânquia foram determinadas de acordo com o método proposto por Bernet e colaboradores (1999). Esse método baseia-se na relevância patológica e na extensão das lesões observadas nos órgãos analisados. As alterações foram classificadas em cinco padrões de reação e cada lesão possui um grau de importância (Quadro 3).

Quadro 3: Classificação das alterações histopatológicas do fígado e brânquia quanto ao tipo de lesão e grau de importância de acordo com Bernet e colaboradores (1999).

Alterações histopatológicas hepáticas e branquial	Grau importância
<b>1. Distúrbios Circulatórios</b>	I
Aneurisma	I
Congestão	I
Hemorragia	
<b>2. Mudanças Regressivas</b>	I
Alterações citoplasmáticas	I
Inclusões citoplasmáticas	I
Descamação do epitélio	I
Deslocamento da lamela primária	I
Fusão das lamelas secundárias	I
Alterações nucleares	II
Atrofia	II
Necrose	III
<b>3. Mudanças Progressivas</b>	
Hipertrofia	II
Hiperplasia das células interlamelares	I
<b>4. Inflamação</b>	
Centro melanomacrófago	I
Infiltração de leucócitos	II
<b>5. Tumor</b>	
Benigno	II
Maligno	III

Fonte: Autoria própria.

O Índice do Órgão ( $I_{org}$ ) representa o grau de dano apresentado pelo órgão e foi calculado pela fórmula:  $I_{org} = \sum_{rp} \sum_{alt} (a \times w)$ , onde: rp = padrão de reação, alt = alteração, a = extensão da lesão e w = grau de importância. Já o Índice de Reação ( $I_{rp}$ ) avalia a gravidade das alterações identificadas e foi obtido pelo somatório do produto da multiplicação do tamanho da lesão pela relevância patológica ( $I_{rp} = \sum_{alt} (a \times w)$ , onde rp = padrão de reação, alt = alteração, a = extensão da lesão e w = grau de importância).

Para cada parâmetro morfológico avaliado foram calculados os valores médios em cada órgão de todos os indivíduos da mesma espécie, em cada ponto amostral do ambiente dulcícola. Os valores médios de cada parâmetro, de cada ponto, foram comparados com a média global, sendo essa a média de cada parâmetro da mesma espécie em todos os pontos do mesmo ambiente (dulcícola ou marinho). Desta avaliação foram identificadas as espécies com índices médios acima e abaixo da média global. Com a classificação proposta pode-se perceber, para cada espécie, o contraste entre os pontos com maiores e menores valores médios em relação à média global.

De modo geral, os peixes amostrados na porção capixaba do rio Doce apresentaram pelo menos um dos órgãos estudados com altos índices médios de lesão (Tabela 12). A espécie *Sphoeroides* sp. (baiacu) apresentou o maior índice global de lesão nas brânquias (43,7), enquanto que o *Hoplosternum littorale* (tamboatá) e o *Prochilodus vimboides* (curimba) apresentaram os maiores índices globais de lesões no fígado (38), seguido da *Metynnis maculatus* (pacu-manchado) com índice global de 36,9.

Algumas espécies apresentaram índices de lesões acima da média global em ambos os órgãos avaliados nos diversos pontos amostrais do ambiente dulcícola, com destaque para o ponto 17-BRG (Baixo Rio Guandu) a espécie *Geophagus* sp. (acará); ponto 19-LNO (Lagoa Nova) as espécies *Cichla* sp. (tucunaré), *Astyanax bimaculatus* (lambari) e *Serrasalmus* sp. (piranha); ponto 21-RDL (Rio Doce, Linhares) as espécies *Cichla* sp. (tucunaré) e *Hoplias* sp. (traíra); ponto 23-LAR (Lagoa do Areão) a espécie *Cichla* sp. (tucunaré) e no ponto 24-LAL (Lagoa do Areal) a espécie *Loricariichthys castaneus* (cascudo chinelo).

A ocorrência de altos índices de lesões, tanto na brânquia quanto no fígado, pode indicar que as condições ambientais nesses pontos estão comprometidas, uma vez que as características histopatológicas de órgãos-alvos refletem/indicam condições ambientais específicas e representam tanto a intensidade quanto o tempo de exposição dos organismos às alterações do ambiente (Macedo-Veiga et al., 2013; Ameer et al., 2015).

Os animais coletados no ponto 22-RDR (Rio Doce, Regência) apresentaram índices de lesões no fígado abaixo da média global, entretanto os índices de lesões das brânquias das espécies *Cichla* sp. (tucunaré) e *Tracheolypterus striatulus* (bagre cumbaca) ficaram acima da média global. As brânquias estão em contato permanente com a água e representam um importante órgão-alvo para poluentes dispersos na coluna d'água. Esse órgão é essencial nas trocas gasosas e regulação osmótica. Portanto, alterações morfológicas nas brânquias podem representar estratégias adaptativas para manutenção de algumas funções fisiológicas ou um biomarcador para avaliar exposições agudas ou crônicas aos contaminantes presentes na água ou sedimento (Winkaler et al., 2001; Tkatcheva et al., 2004).

No ponto 26-RDF (Foz do rio Doce) índices de lesões acima da média foram verificados no fígado de duas (bagre *Trachelyopterus striatulus* e carapeba *Eucinostomus* sp.) das seis espécies amostradas. As características hidrodinâmicas e sedimentológicas da foz variam de acordo com comportamento das ondas, ventos, marés e mistura da água doce com a marinha. Assim, as espécies de fundo (bagre e carapeba) estão mais expostas aos poluentes que são assimilados em decorrência de seus hábitos alimentares e revolvimento do sedimento que concentra os poluentes precipitados na zona de mistura da água doce do rio com a marinha, junto à foz.

Tabela 12: Índices médios de lesões dos órgãos e médias globais das espécies de peixes coletadas no ambiente dulcícola. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) do índice de lesões e número de órgãos (n°) analisados. Médias de lesões acima da média global foram destacadas.

		<i>Cichla</i> sp. (tucunaré)	<i>Hypostomus</i> <i>affinis</i> (cascudo)	<i>Pimelodus</i> <i>maculatus</i> (mandi)	<i>Prochilodus</i> <i>lineatus</i> (curimbatá)	<i>Hoplias</i> sp. (traíra)	<i>Geophagus</i> sp. (acará)	<i>Astyanax</i> <i>bimaculatus</i> (lambari)	<i>Serrasalminus</i> sp. (piranha)	<i>Pygocentrus</i> sp. (piranha)	<i>Hoplosternum</i> <i>litorale</i> (tambaqui)	<i>Trachelyopterus</i> <i>striatulus</i> (bagre)	<i>Loricariichthys</i> <i>castaneus</i> (Cascudo chinelo)	<i>Pomadasys</i> <i>ramosus</i> (Ticupá)	<i>Eucinostomus</i> s. (carapeba)	<i>Sphaeroides</i> sp. (baiacu)	<i>Selene vomer</i> (Peixe-galo)	<i>Bardiella ronchus</i> (cabeçadura)
	n° total de tecidos (Brq)	13	2	7	1	10	13	20	18	11	1	15	11	1	2	3	3	2
	n° total de tecidos (Fig)	13	2	9	1	11	13	14	17	12	1	15	11	1	3	3	3	2
	Média global entre pontos (Brq)	21,1	5,5	14,7	17,0	27,0	20,8	36,1	23,2	23,4	10,0	21,1	21,8	14,0	10,0	43,7	10,7	30,0
	Média global entre pontos (Fig)	24,0	24,5	32,2	38,0	32,6	33,3	33,8	36,9	31,2	38,0	33,1	32,7	34,0	33,8	29,3	28,7	18,0
17 - BRG	(Brq) média ± DP (n°)					68 ± 0 (1)	26,5 ± 19,5 (6)	25,7 ± 20,4 (6)				16,3 ± 5,8 (6)						
	(Fig) média ± DP (n°)					20 ± 0 (1)	37,8 ± 3,8 (6)	37,7 ± 13,9 (3)				39,7 ± 7,4 (6)						
18 - LLI	(Brq) média ± DP (n°)					8 ± 4,2 (2)	24 ± 0 (1)		20,5 ± 16,7 (6)									
	(Fig) média ± DP (n°)					59,5 ± 3,5 (2)	31 ± 4,2 (2)		34,7 ± 11,4 (6)									
19 - LNO	(Brq) média ± DP (n°)	34 ± 0 (1)		18 ± 8,1 (4)				46,4 ± 17,1 (5)	35 ± 8,5 (5)									
	(Fig) média ± DP (n°)	44 ± 0 (1)		25,2 ± 11,5 (6)				38,3 ± 10,4 (4)	41 ± 18,1 (5)									
20 - LJA	(Brq) média ± DP (n°)	17,7 ± 9,9 (3)				38 ± 0 (1)		42 ± 14 (4)		29,6 ± 15,4 (5)								
	(Fig) média ± DP (n°)	10,7 ± 6,7 (3)				26 ± 0 (1)		25 ± 19,9 (4)		29,8 ± 17,7 (6)								
21 - RDL	(Brq) média ± DP (n°)	28 ± 27,7 (3)			17 ± 0 (1)	36 ± 0 (1)							11,8 ± 5,1 (5)					
	(Fig) média ± DP (n°)	30,5 ± 14,8 (2)			38 ± 0 (1)	36 ± 0 (1)							32,2 ± 8,1 (6)					
22 - RDR	(Brq) média ± DP (n°)	23 ± 0 (1)	5,5 ± 2,1 (2)	11,3 ± 4 (3)		8 ± 0 (1)					10 ± 0 (1)	29,3 ± 20,7 (3)						
	(Fig) média ± DP (n°)	19 ± 0 (1)	24,5 ± 9,2 (2)	26,3 ± 10,1 (3)		15 ± 0 (1)					38 ± 0 (1)	25,3 ± 4,7 (3)						
	(Brq) média ± DP (n°)	24 ± 8,3 (5)								17,2 ± 6,9 (6)								

		<i>Cichla</i> sp. (tucunaré)	<i>Hypostomus</i> <i>affinis</i> (cascudo)	<i>Pimelodus</i> <i>maculatus</i> (mandi)	<i>Prochilodus</i> <i>lineatus</i> (curimbatá)	<i>Hoplias</i> sp. (traira)	<i>Geophagus</i> sp. (acará)	<i>Astyanax</i> <i>bimaculatus</i> (lambari)	<i>Serrasalmus</i> sp. (piranha)	<i>Pygocentrus</i> sp. (piranha)	<i>Hoplosternum</i> <i>litorale</i> (tambaqui)	<i>Trachelyopterus</i> <i>striatulus</i> (bagre)	<i>Loricariichthys</i> <i>castaneus</i> (Cascudo chinelo)	<i>Pomadasys</i> <i>ramosus</i> (Ticupá)	<i>Eucinostomus</i> s. (carapeba)	<i>Sphaeroides</i> sp. (baiaçu)	<i>Selene vomer</i> (Peixe-galo)	<i>Bardiella ronchus</i> (cabeçadura)
<b>23 - LAR</b>	(Fig) média ± DP (n°)	33,8 ± 6,5 (5)		45 ± 0 (1)		24 ± 0 (1)				32,5 ± 14,8 (6)								
<b>24 - LAL</b>	(Brq) média ± DP (n°)					14 ± 5 (3)		30,4 ± 9,8 (5)	28,3 ± 14,1 (6)				31,8 ± 14,7 (6)					
	(Fig) média ± DP (n°)					37 ± 20,1 (3)		34,3 ± 7,5 (3)	30,8 ± 15,7 (5)				33,2 ± 15,2 (5)					
<b>25 - LMO</b>	(Brq) média ± DP (n°)	0 ± 0 (1)				18 ± 0 (1)	11,8 ± 5 (6)		9 ± 0 (1)						12 ± 0 (1)			
	(Fig) média ± DP (n°)	6 ± 0 (1)				43 ± 0 (1)	31,2 ± 8,2 (5)		41 ± 0 (1)						32,5 ± 10,6 (2)			
<b>26 - RDF</b>	(Brq) média ± DP (n°)											17,5 ± 14,7 (6)	14 ± 0 (1)	8 ± 0 (1)	43,7 ± 19,7 (3)	10,7 ± 5,7 (3)	30 ± 11,3 (3)	
	(Fig) média ± DP (n°)										34,2 ± 9,3 (6)	34 ± 0 (1)	35 ± 0 (1)	29,3 ± 5 (3)	28,7 ± 14 (3)	18 ± 8,5 (2)		

Fonte: Autoria própria.

As alterações histopatológicas mais frequentes encontradas nos fígados dos peixes analisados dos ambientes dulcícolas (Tabela 13) foram: necrose, infiltrado inflamatório, congestão de vaso, alterações nucleares, hemorragia, alterações citoplasmáticas (vacuolização e esteatose), hipertrofia dos hepatócitos, parasitas, centro de melanomacrófagos, inclusões citoplasmáticas, atrofia, tumores benigno e maligno. Nas brânquias foram identificadas as seguintes lesões mais frequentes no ambiente dulcícola (Tabela 14): aneurisma, descamação do epitélio, deslocamento da lamela primária, fusão das lamelas secundárias, atrofia da lamela primária, atrofia da lamela secundária, necrose, hipertrofia da célula de muco, hiperplasia das células interlamelares, infiltrado inflamatório, tumores benignos e malignos. Estas patologias parecem constituir uma resposta comum em peixes de ambientes aquáticos degradados ou em testes em laboratório onde se utiliza metais e agrotóxicos (Gundersen et al., 2000; Paris-Palácios et al., 2000; Schwaiger, 2001).

Tabela 13: Frequência (%) de alterações morfológicas no fígado de peixes coletados nos diferentes pontos amostrais do ambiente dulcícola. Médias de lesões acima da média global foram destacadas.

Lesões hepáticas (%)	Pontos Amostrais Dulcícola										Média
	17BRG	18LLI	19LNO	20LJA	14LAL	22RDR	26RDF	23LAR	25LMO	21RDL	
<b>Distúrbios Circulatórios</b>											
Hemorragia	<b>40</b>	30	28	18	<b>41</b>	<b>36</b>	35	31	30	<b>60</b>	35
Congestão	65	70	<b>72</b>	<b>76</b>	65	45	59	<b>92</b>	70	<b>80</b>	70
<b>Mudanças Regressivas</b>											
Alterações citoplasmáticas	30	30	11	<b>47</b>	29	<b>64</b>	<b>76</b>	<b>54</b>	40	<b>50</b>	43
Inclusões citoplasmáticas	10	10	<b>39</b>	6	<b>29</b>	9	12	<b>54</b>	<b>30</b>	10	21
Alterações nucleares	55	<b>70</b>	44	47	<b>65</b>	55	<b>76</b>	<b>77</b>	60	50	60
Atrofia	10	<b>20</b>	<b>17</b>	<b>41</b>	<b>18</b>	0	0	8	0	10	12
Necrose	<b>80</b>	<b>90</b>	67	53	65	64	<b>82</b>	69	<b>90</b>	<b>90</b>	75
<b>Mudanças Progressivas</b>											
Hipertrofia dos hepatócitos	<b>50</b>	<b>50</b>	<b>56</b>	35	24	18	35	31	<b>50</b>	<b>60</b>	41
<b>Inflamação</b>											
Centro de melanomacrófagos	<b>35</b>	0	<b>28</b>	6	<b>29</b>	<b>36</b>	<b>41</b>	8	20	0	20
Infiltrado de leucócitos	45	<b>90</b>	<b>61</b>	35	41	45	<b>76</b>	<b>92</b>	<b>80</b>	0	57
<b>Tumor</b>											
Benigno	<b>20</b>	<b>10</b>	0	0	0	0	0	0	<b>10</b>	<b>10</b>	5
Maligno	0	<b>20</b>	<b>6</b>	0	<b>12</b>	0	0	0	0	0	4
<b>Parasitas</b>	5	<b>60</b>	<b>39</b>	<b>35</b>	24	27	6	<b>61</b>	10	30	30

Fonte: Autoria própria.

Tabela 14: Frequência (%) de alterações morfológicas na brânquia de peixes coletados nos diferentes pontos amostrais do ambiente dulcícola. Médias de lesões acima da média global foram destacadas.

Lesões Branquiais (%)	Pontos Amostrais Dulcícola										
	17BRG	18LLI	19LNO	20LJA	14LAL	22RDR	26RDF	23LAR	25LMO	21RDL	Média
<b>Distúrbios Circulatórios</b>											
Aneurisma	45	56	<b>65</b>	23	<b>57</b>	<b>73</b>	47	<b>75</b>	<b>70</b>	<b>70</b>	58
<b>Mudanças Regressivas</b>											
Descamação de epitélio	60	33	41	<b>77</b>	<b>76</b>	18	<b>88</b>	<b>75</b>	60	<b>70</b>	60
Deslocamento da lamela primária	0	0	6	8	5	9	<b>12</b>	<b>17</b>	20	10	9
Fusão da Lamela secundária	20	22	<b>53</b>	23	<b>67</b>	9	29	8	<b>40</b>	20	29
Atrofia da Lamela primária	<b>20</b>	11	<b>41</b>	<b>31</b>	<b>29</b>	9	12	8	0	0	16
Atrofia da Lamela secundária	<b>30</b>	0	<b>53</b>	<b>23</b>	<b>24</b>	18	<b>35</b>	17	0	10	21
Necrose	<b>35</b>	<b>33</b>	<b>76</b>	<b>54</b>	<b>33</b>	18	23	8	0	10	29
<b>Mudanças Progressivas</b>											
Hipertrofia da célula de muco	<b>40</b>	<b>22</b>	6	8	19	<b>27</b>	<b>23</b>	<b>42</b>	0	10	20
Hiperplasia das células interlamelares	55	<b>78</b>	53	<b>77</b>	48	<b>73</b>	47	<b>92</b>	40	60	62
<b>Inflamação</b>											
Infiltração	30	22	<b>41</b>	<b>69</b>	<b>52</b>	18	35	33	<b>50</b>	30	38
<b>Tumor</b>											
Benigno	<b>5</b>	0	0	0	<b>5</b>	0	<b>12</b>	<b>8</b>	0	<b>10</b>	4
Maligno	0	0	0	0	<b>9</b>	0	0	0	0	0	1
<b>Parasita</b>	<b>40</b>	22	0	<b>31</b>	0	9	<b>35</b>	<b>50</b>	20	10	22

Fonte: Autoria própria.

A necrose hepática (Figura 6A), lesão mais frequente no ambiente dulcícola (Tabela 13), é caracterizada pelo processo de morte celular ou tecidual, causada por lesões nucleares e citoplasmáticas irreversíveis, seguidas pela perda dos limites celulares e pela a reabsorção por células fagocíticas (Thomson, 1978). Assim, é classificada como lesão de grau de importância III, considerada uma lesão severa e irreversível (Bernet et al., 1999).

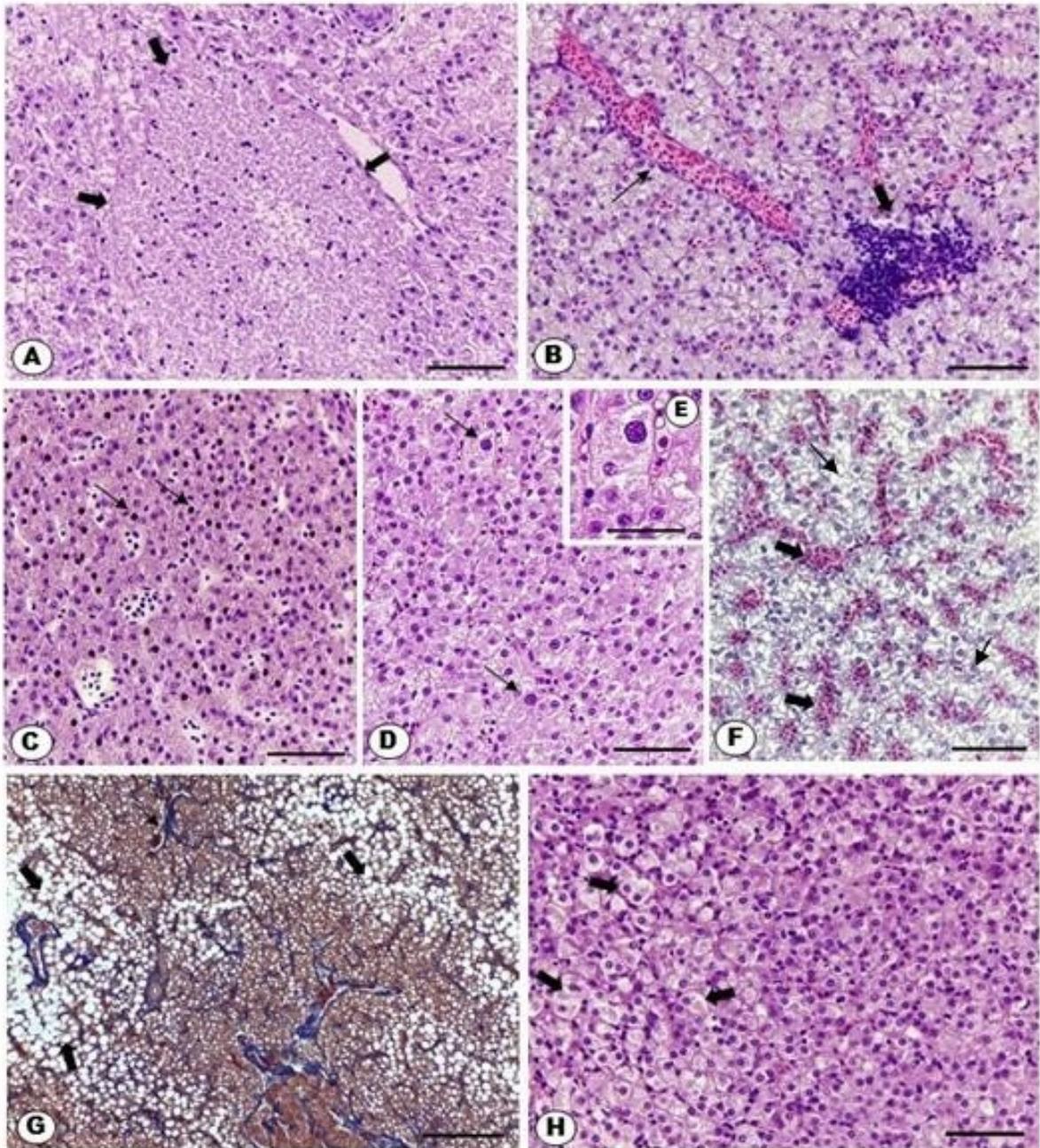
A congestão de vasos sanguíneos hepáticos (Figura 6A), segunda lesão mais frequente no ambiente dulcícola (Tabela 14), pode sugerir de um processo de adaptação que leva ao aumento do fluxo sanguíneo no tecido, facilitando o transporte de macrófagos para as regiões danificadas, além de melhorar a oxigenação destas áreas, ou ainda, indicar um mecanismo auxiliar na desintoxicação. Assim, a congestão de vasos e a presença dos melanomacrófagos (Figura 7C) podem ser consideradas indicadores de estresse em peixes decorrente da presença de agentes químicos no ambiente (ANDERSON & ZEEMAN, 1995). Já o infiltrado inflamatório (Figura 6B) está associado com a migração

de leucócitos para o meio extracelular através da corrente sanguínea, a fim de combater um possível processo inflamatório, sendo classificado como lesão de grau de importância II (Bernet et al., 1999).

Alterações nucleares (Figura 6C, D e E) são decorrentes de mudanças no formato do núcleo e na estrutura da cromatina. São classificadas como lesão de grau de importância II, podendo ocasionar redução ou perda de função do órgão. As alterações citoplasmáticas foram identificadas como esteatose hepática (Figura 6G) e vacuolização (Figura 6F e 5G). As inclusões citoplasmáticas (Figura 7D), caracterizadas pelo acúmulo de substâncias derivadas dos processos degenerativos no interior das células, também foram observadas no fígado dos animais dulcícolas e marinhos.

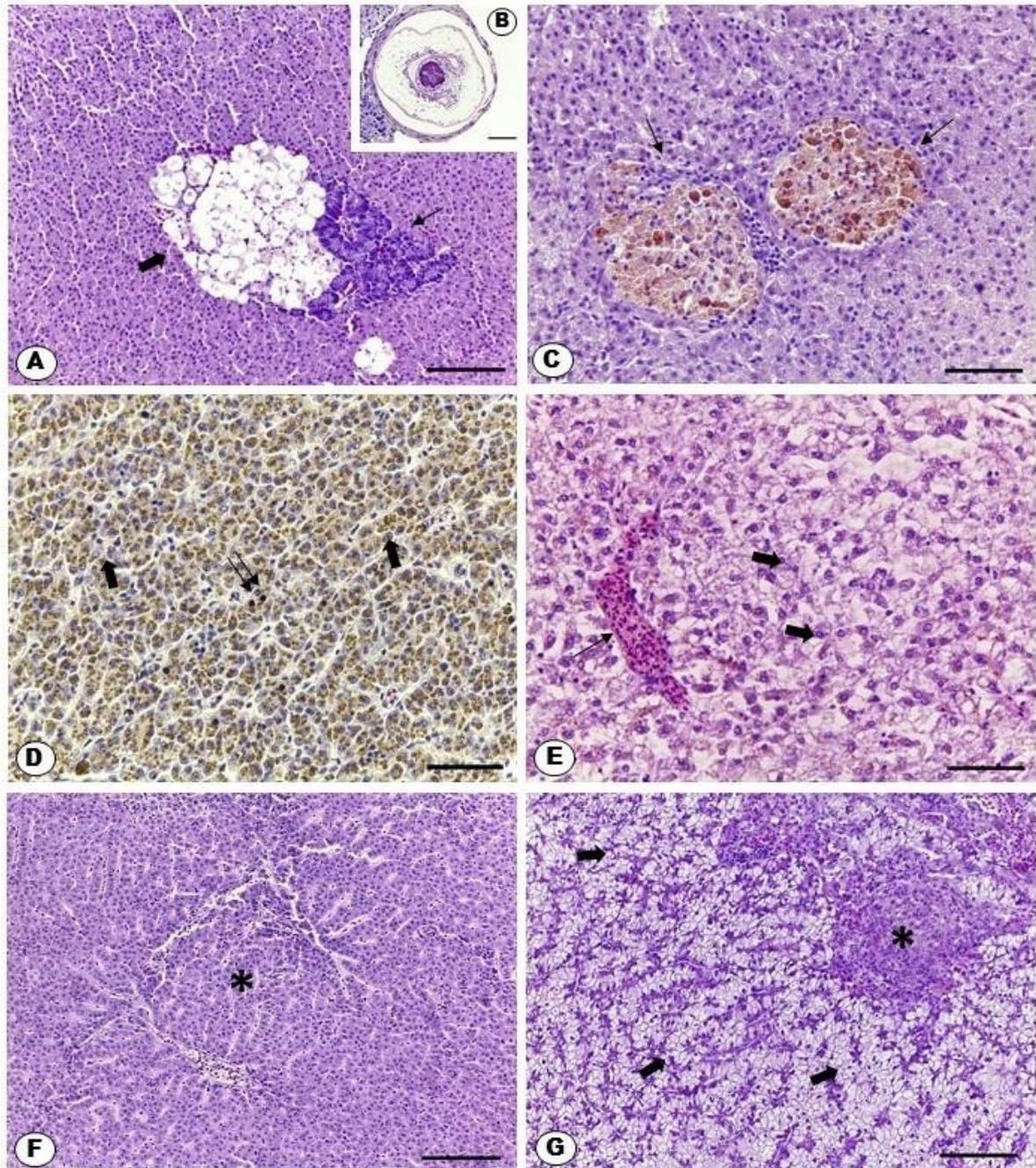
A hipertrofia de hepatócitos (Figura 6H) é caracterizada pelo aumento do volume destas células (Thomson, 1978). Já a atrofia (Figura 7E) é a redução no número ou volume das células ou volume extracelular. Ambas alterações refletem o estado funcional do fígado e são notavelmente diferentes em estados hiper ou hipofuncionais. A hipertrofia celular ou nuclear indica a grande atividade da célula em decorrência da presença de algum composto químico ou ausência de alguma substância (Meyer & Hendricks, 1985; Hinton et al., 1992; Hinton & Hibiya, 1995) e pode resultar em necrose (Fanta et al., 2003; Takashima & Hibiya, 1995). Foi observada a presença de tumores em baixa frequência em algumas espécies coletadas no Rio Doce. Os tumores benignos (Figura 7F) apresentam células diferenciadas, porém parecidas com as normais, que substituem ou deslocam o tecido original, enquanto os tumores malignos (Figura 7G) possuem células pouco diferenciadas, de rápida multiplicação, que invadem e destroem os tecidos. As lesões neoplásicas são consideradas alterações graves e irreversíveis (grau de importância III) e estão correlacionadas com exposições crônicas a poluentes (Bernet et al., 1999; Liebel et al., 2013).

Figura 6: Alterações morfológicas no fígado dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A: necrose (seta grossa); B: Infiltrado inflamatório (seta grossa) e congestão de vaso sanguíneo (seta fina); C, D e E: Alteração nuclear (seta fina); F: Hemorragia (seta grossa) e vacuolização (seta fina); G: Esteatose (seta grossa) e fibrose (seta fina); H: Hipertrófia dos hepatócitos (seta grossa). Coloração: Hematoxilina & Eosina (A, B, C, D, E, F e H); Tricrômio de Mallory (G). Barras: 25  $\mu\text{m}$  = E; 50  $\mu\text{m}$  = A, B, C, D, F e H; 100  $\mu\text{m}$  = G.



Fonte: Autoria própria.

Figura 7: Lesões hepáticas dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A e B: Parasita (seta grossa) e hepatopâncreas (seta fina); C: Centro de melanomacróforo; D: Alteração nuclear (seta fina) e inclusões citoplasmáticas (seta grossa); E: Congestão de vaso sanguíneo (seta fina) e atrofia nuclear (seta grossa); F: Tumor benigno (asterisco); G: Tumor maligno (asterisco) e vacuolização (seta grossa). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: 25  $\mu\text{m}$  = B; 50  $\mu\text{m}$  = C, D, E; 100  $\mu\text{m}$  = A, F e G.



Fonte: Autoria própria.

A morfologia das brânquias dos peixes dos ambientes dulcícola apresentou estruturas similares já descritas na literatura para os peixes teleósteos. O aneurisma nas lamelas secundárias (Figura 8A), alteração mais frequente nas brânquias dos animais (Tabela 14), resulta no acúmulo de eritrócitos e morte das células dos pilares, levando a perda da integridade estrutural da lamela. Pode estar

associado a traumas físicos e químicos em resposta aguda a agentes estressores ambientais (Lopes et al., 2005; Liebel et al., 2013).

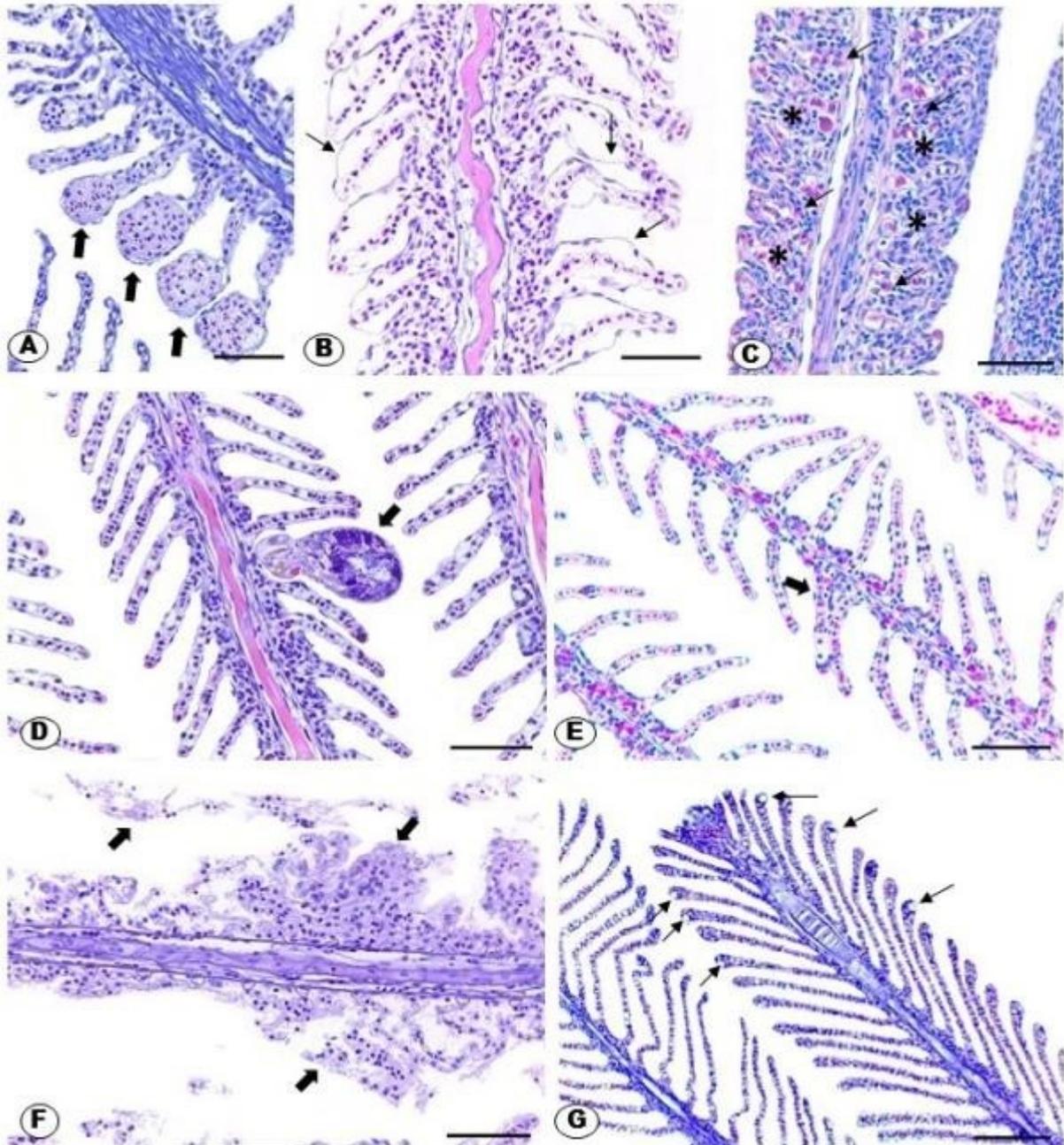
Foram observados deslocamento (Figura 8B), descamação (Figura 8B) e hiperplasia no epitélio lamelar (Figura 8C). Essas lesões podem ser desencadeadas por estresse químico, causando disfunção respiratória por afetar as trocas gasosas devido à redução da superfície do epitélio respiratório e também provocar distúrbios osmorregulatórios (Campos, 2007; Zeni, 2016).

A presença células leucocitárias nas lamelas (Figura 8C), lesão de grau de importância II, sugere a ocorrência de processo inflamatório no tecido branquial (Bernet et al., 1999; Campos, 2007; Zeni, 2016). No epitélio lamelar secundário foram observadas áreas necrosadas (Figura 8F). A necrose afeta o órgão de forma severa e irreversível. A hipertrofia das células de muco (Figura 8G) pode indicar que está ocorrendo hipersecreção de muco na tentativa de proteger as brânquias de agentes tóxicos, podendo levar à redução funcional ou perda de função do órgão. Santos (2009) e Lopes e colaboradores (2005) associam infiltrado inflamatório, necrose e hipertrofia das células de muco à presença de metais pesados e poluentes orgânicos.

A infestação parasitária (Figura 8D) observada no tecido branquial dos peixes pode ser uma resposta a estímulos estressores do ambiente e pode desencadear futuras infecções secundárias, embora esse órgão possua mecanismos de defesa parasitária (Zanolo & Yamamura, 2006). A atrofia do epitélio lamelar (lamela primária e secundária) (Figura 9A), classificada com grau de importância II, caracteriza-se pela diminuição do número e/ou volume extracelular. Essa alteração está associada à presença de parasitas que podem causar atrofia compressiva das brânquias (Thatcher & Brites-Neto, 1994; Bernet et al., 1999). Foram encontrados tumores benignos (Figura 9C) e malignos (Figura 9D) nas brânquias dos peixes dulcícolas, ambos em baixa frequência.

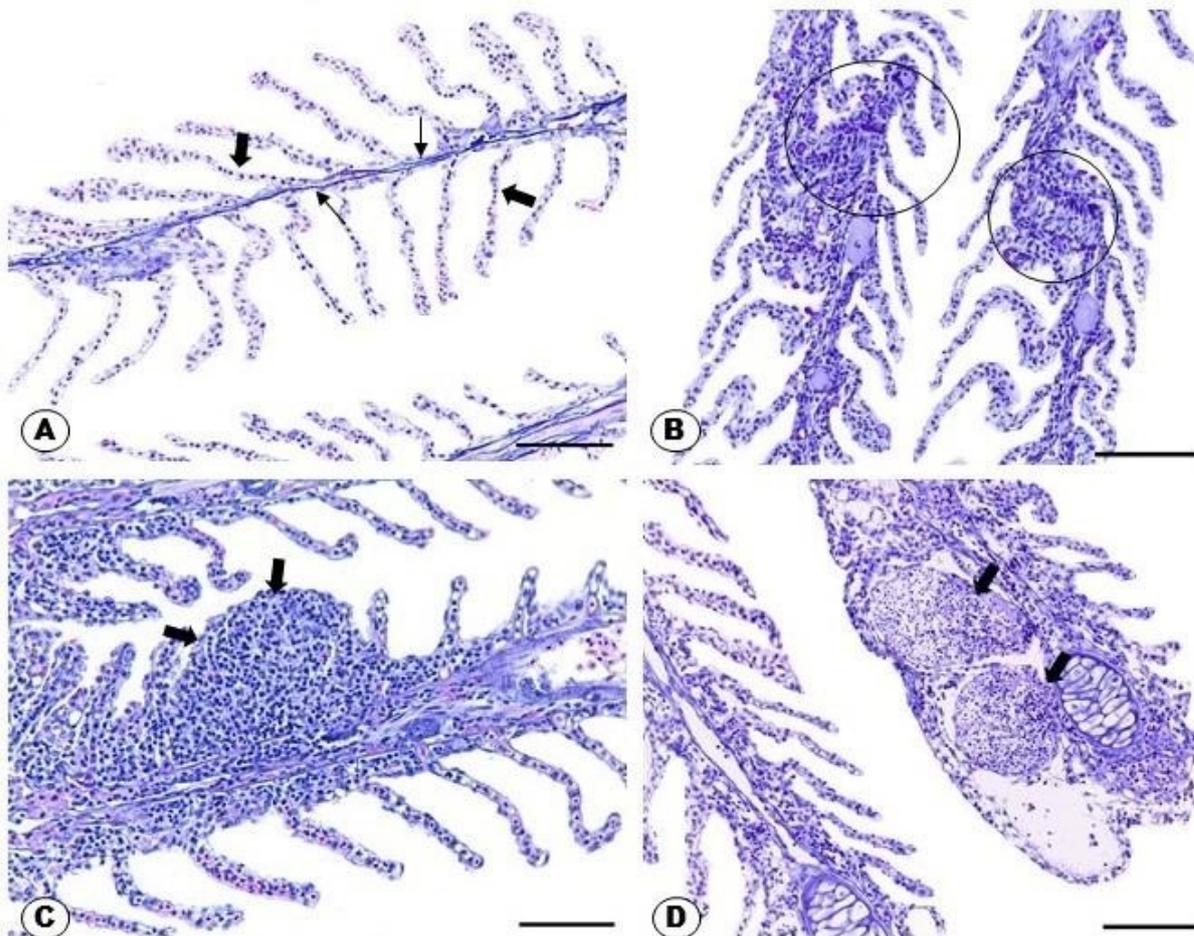
As alterações morfológicas encontradas em brânquia e fígado de peixes coletados na bacia do Rio Doce corroboram com os estudos realizados em ambientes aquáticos degradados ou em laboratório utilizando metais e agrotóxicos, e parecem constituir uma resposta comum em peixes (Gundersen et al., 2000; Paris-Palácios et al., 2000; Schwaiger, 2001; Thophon et al., 2003; Oliveira-Ribeiro et al., 2005; Liebel et al., 2013; Macedo- Veiga et al., 2013; Ameur et al., 2015). Nos pontos amostrais do ambiente dulcícola (17-BRG (Baixo Rio Guandu), 19-LNO (Lagoa Nova), 21-RDL (Rio Doce, Linhares), 23-LAR (Lagoa do Areão) e 24-LAL (Lagoa do Areal) foram identificados altos índices de lesões em ambos os órgãos avaliados. Assim, percebe-se que a metodologia analítica e os procedimentos executados foram capazes de detectar impactos nos órgãos analisados.

Figura 8: Lesões encontradas nas brânquias dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A: Aneurisma nas lamelas secundárias (seta grossa); B: Descamação do Epitélio Branquial (seta fina); C: Hiperplasia total das lamelas secundárias (asterisco) e infiltração de leucócitos (seta fina); D: Parasita (seta grossa); E: Fusão das lamelas secundárias (seta grossa); F: Necrose do tecido branquial (seta grossa); G: Hiperplasia das células de muco (seta fina). Coloração: Hematoxilina & Eosina. Barra: 50  $\mu$ m = B e G; 100  $\mu$ m = A, C, D E, F.



Fonte: Autoria própria.

Figura 9: Alterações morfológicas nas brânquias dos peixes coletados nos ambientes dulcícola e marinho. A: Atrofia da lamela primária (seta fina) e secundária (seta grossa); B: Deslocamento da lamela primária (circulo); C: Tumor benigno (seta grossa); D: Tumor maligno (seta grossa). Coloração: Hematoxila & Eosina. Barra: 50 µm = D; 100 µm = A, B e C.



Fonte: Autoria própria.

### 2.2.6 Análise integrada dos resultados

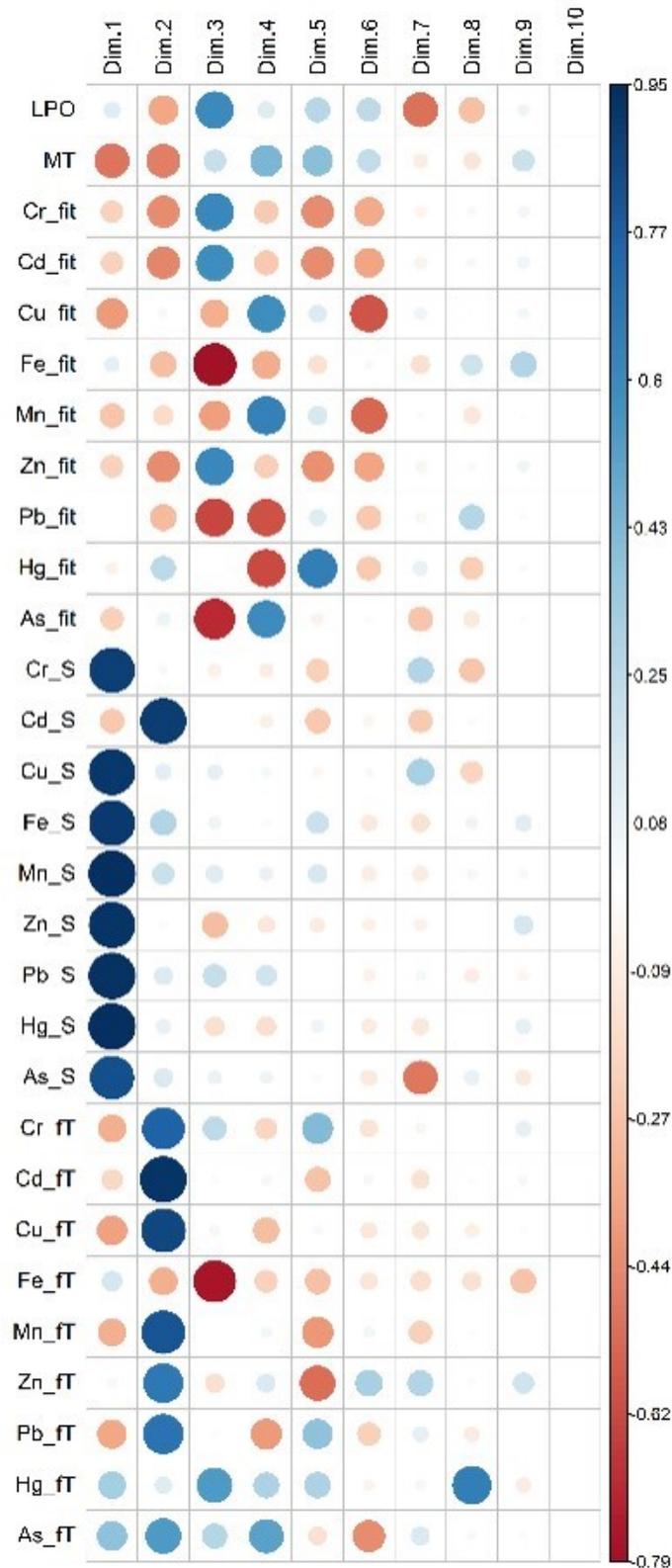
A fim de verificar as possíveis correlações dos dados de bioacumulação de metais e respostas de biomarcadores nos diferentes organismos com os dados abióticos, especialmente as concentrações de metais na água e no sedimento das diferentes estações de monitoramento, os resultados foram correlacionados entre si por meio de uma análise de correlação de Pearson, e em uma visão global, os resultados foram integrados e interpretados por meio de uma análise de componentes principais (PCA) desenvolvida no software R (*R Studio*). Para facilitar a visualização e interpretação dos resultados, as análises multivariadas foram aplicadas de forma isolada nos diferentes níveis da cadeia biológica, sendo agrupados em fitoplâncton (plâncton de 60 – 200 µm), zooplâncton (plâncton de 200 – 500 µm), camarões (espécimes do gênero *Macrobrachium*) e peixes (os resultados individuais de cada espécie de peixe por estação de coleta podem ser acessados na tabela de Dados Brutos).

#### 2.2.6.1 Fitoplâncton

Os resultados da PCA para o fitoplâncton são apresentados na Figura 10. Os dois primeiros componentes da PCA (PC1 e PC2) representaram 50,5% da variância total; por outro lado, os outros componentes foram negligenciados porque não forneceram informações adicionais significativas. O primeiro componente (Dim1 [horizontal]) explicou 28,4% da variabilidade total e neste primeiro componente é possível visualizar um agrupamento de todos os metais analisados no sedimento com exceção do Cd. Na Figura 11 pode-se visualizar melhor quais as variáveis mais importantes para a determinação do componente 1. Os metais Fe, Mn, Cr, Cu, Zn, As, Pb e Hg no sedimento foram as variáveis melhor associadas positivamente com o eixo 1 (Dim1) e associadas entre si, indicando que as concentrações ambientais destes metais seguem um padrão de distribuição entre os diferentes locais investigados. O segundo componente (Dim2 [vertical]) explicou 22,1% da variabilidade total e na parte positiva, observa-se uma forte correlação entre as concentrações dos metais presentes na água, enquanto que na parte negativa observa-se uma forte associação entre as concentrações corporais de Cd, Cr e Zn com o conteúdo de metalotioneínas (MT) e entre as concentrações de Fe na água (Fe\_FT) e no plâncton (Fe\_fit) com os níveis de lipoperoxidação (LPO). Numa perspectiva de interpretação espacial dos resultados, no *biplot* representado na Figura 12 podemos observar que a comunidade fitoplanctônica presente em RDR, RDF, LAL, LJA e BRG são as que apresentam maiores níveis dos metais acima mencionados e, por conseguinte, uma resposta mais evidente dos biomarcadores de dano lipídico (LPO) e de exposição (MT). A Figura 13 representa todas as correlações par a par entre todas as variáveis analisadas, evidenciando as correlações positivas entre os feitos biológicos com as concentrações corporais de determinados metais.



Figura 11: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas na comunidade fitoplanctônica com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 12: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas e abióticas e das estações amostrais ao longo da porção capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]).

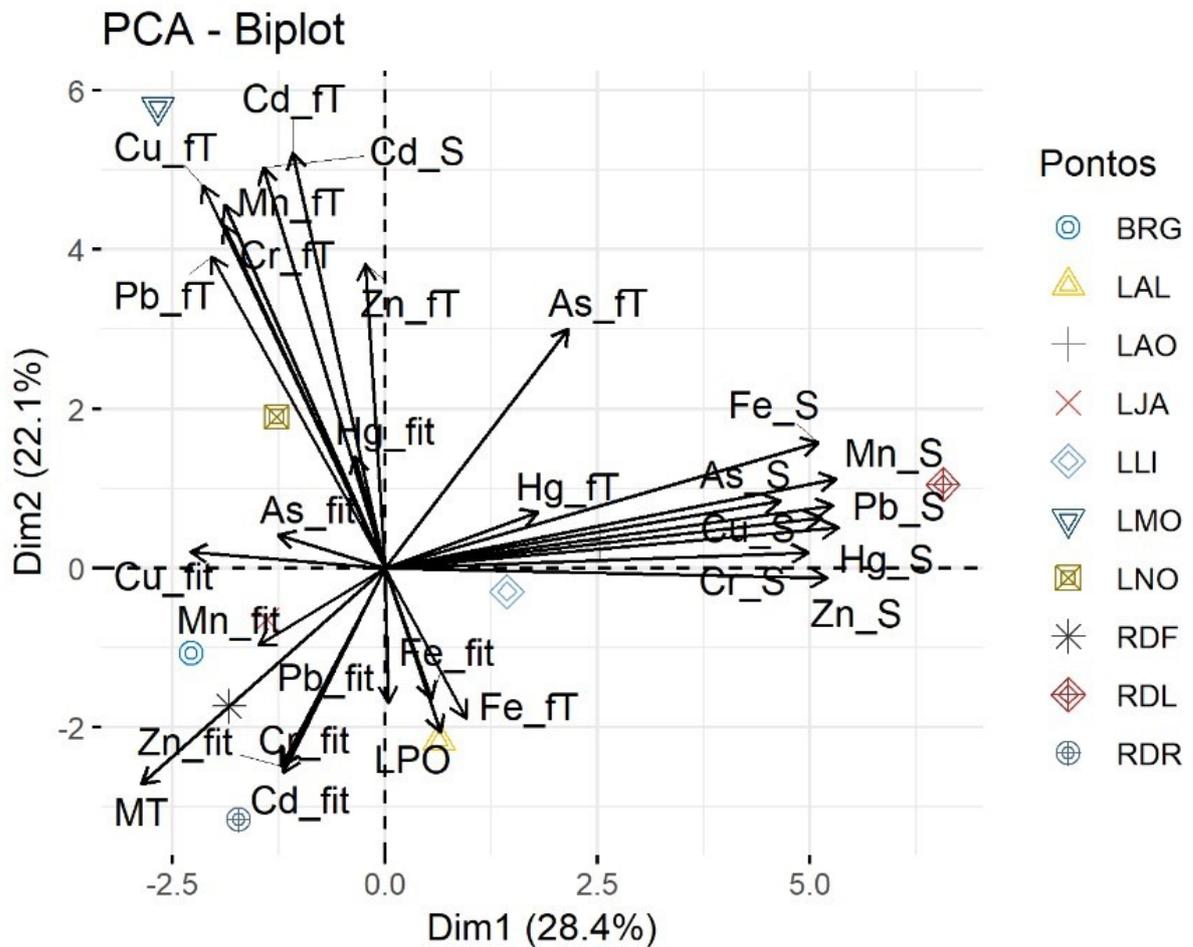
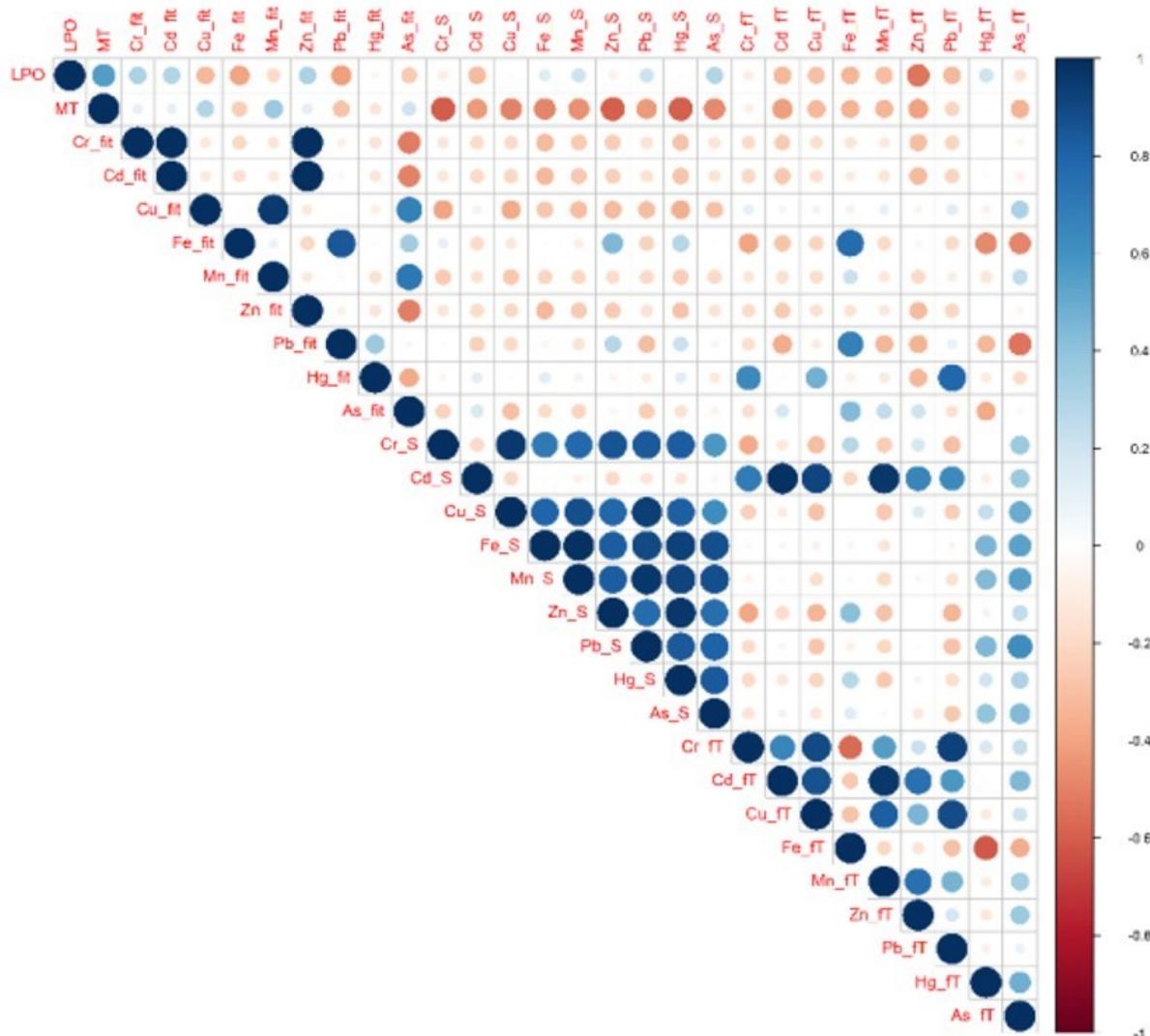


Figura 13: Representação gráfica de correlações par a par entre as variáveis abióticas (concentrações de metais na água e sedimento) e biológicas (biomarcadores e concentrações de metais nos organismos) mensuradas na comunidade fitoplanctônica coletada ao longo da porção capixaba do Rio Doce (set/2018). Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0,05$ ) são mostradas na figura.



Fonte: Autoria própria.

Desta maneira, segue a síntese dos resultados e conclusões para o fitoplâncton:

As concentrações de metais na água não estão correlacionadas diretamente com as concentrações de metais no sedimento, o que pode indicar um alto hidrodinamismo nos locais de coleta, enquanto o sedimento representa melhor um histórico de contaminação crônica do local;

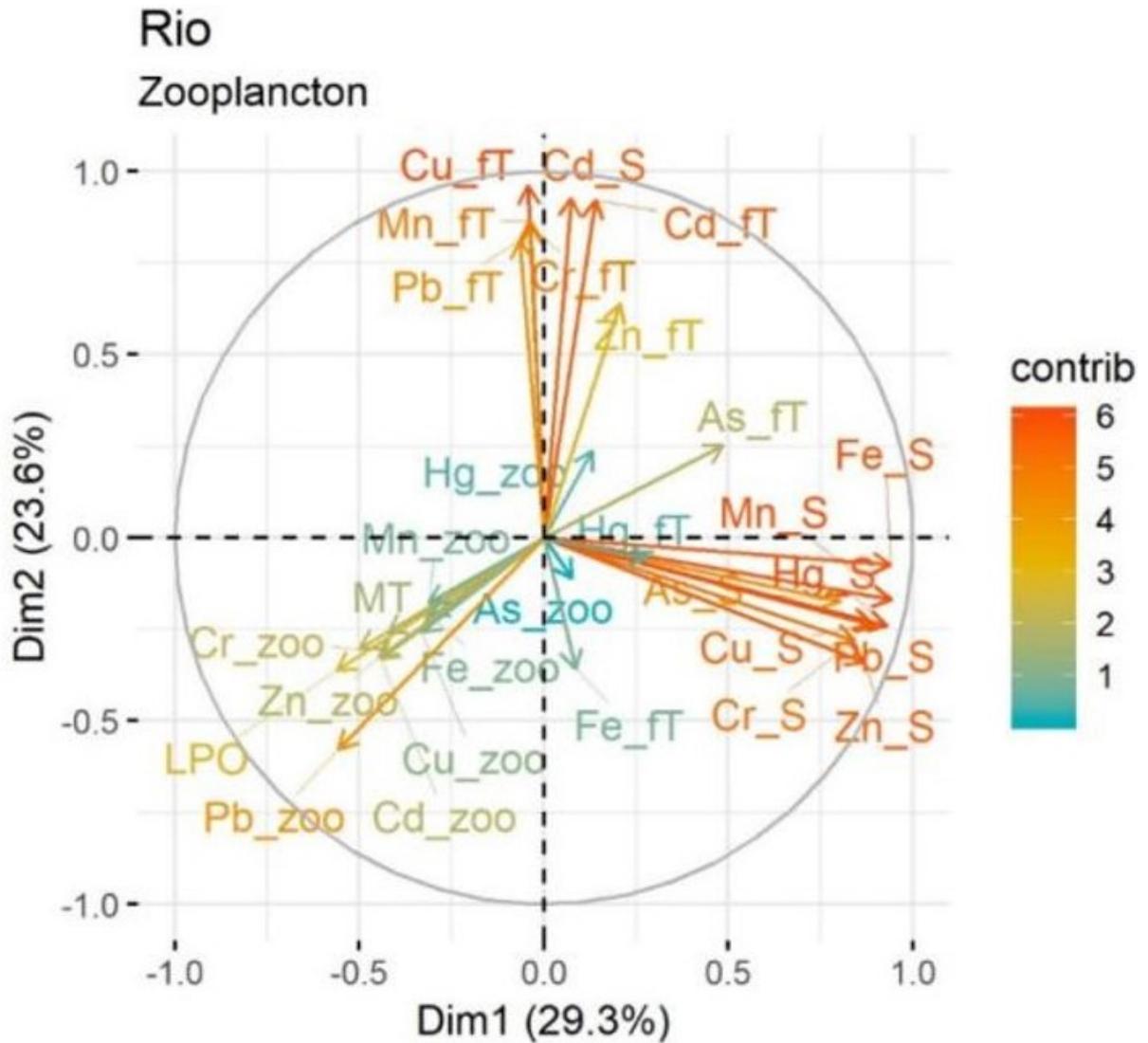
A bioacumulação de metais no fitoplâncton não reflete claramente os níveis de metais na água e no sedimento naquele momento da coleta, mas, todavia, o acúmulo destes metais reflete uma situação de exposição temporal e crônica àquele ambiente específico;

O aumento no conteúdo de metalotioneínas (MT) e nos níveis de lipoperoxidação (LPO) estão associados ao aumento das concentrações corporais de Cr, Cd, Zn, Fe e Mn no fitoplâncton.

#### 2.2.6.2 Zooplâncton

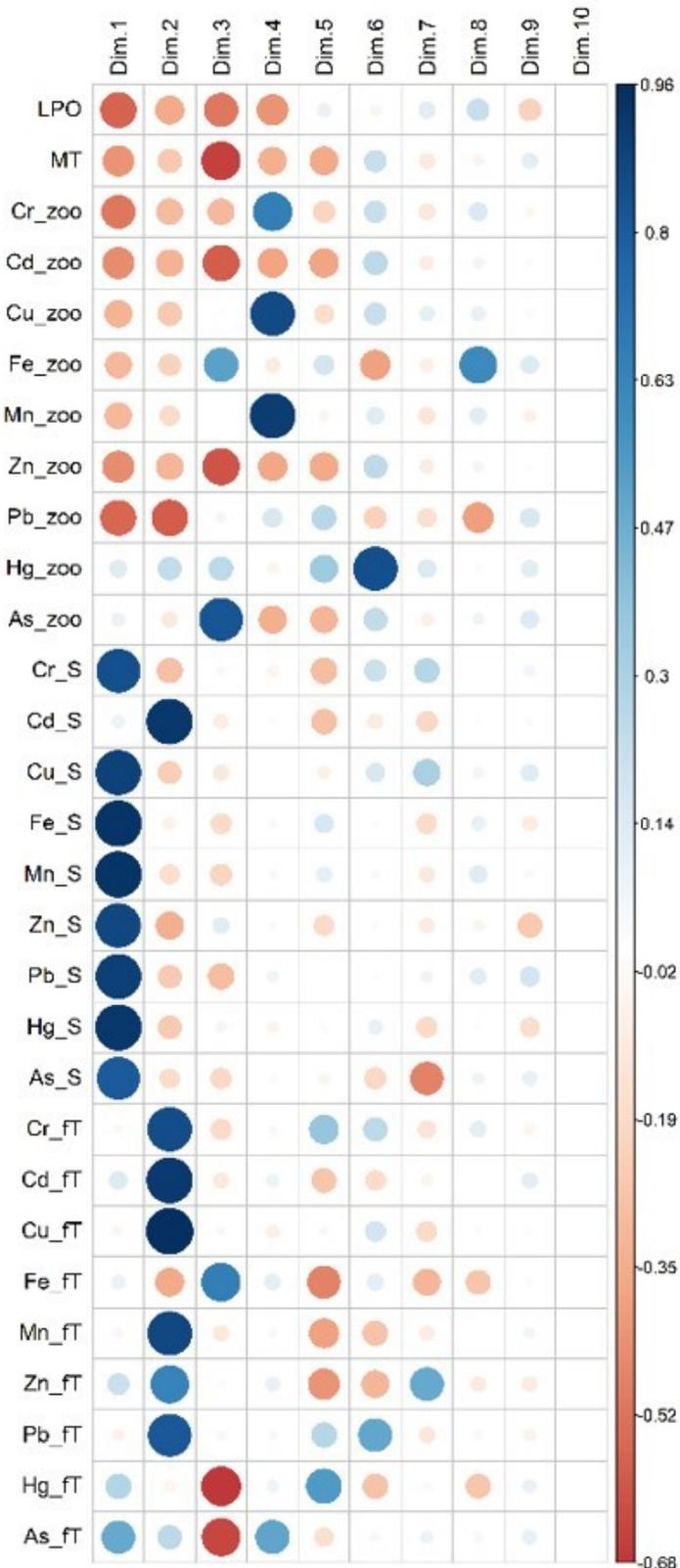
Os resultados da PCA para o zooplâncton são representados na Figura 14. Os dois primeiros componentes da PCA (Dim1 e Dim2) representaram 52,9% da variância total; enquanto os outros eixos foram negligenciados porque não forneceram informações adicionais significativas. O primeiro componente (Dim1 - horizontal) explicou 29,3% da variabilidade total e neste primeiro componente, tal qual os resultados para fitoplâncton é possível agrupar os metais presentes no sedimento daqueles presentes na água das estações de coleta. Na Figura 15 podem ser visualizadas quais as variáveis mais importantes para a determinação do componente 1. O segundo componente (Dim.2 [vertical]) explicou 23,6% da variabilidade total e na parte positiva, observa-se uma forte correlação positiva entre as concentrações de metais presentes na água, enquanto na parte negativa, observa-se uma alta correlação entre os níveis de lipoperoxidação (LPO) e concentração corporal de metalotioneína (MT) com os níveis corporais de Cr, Cd, Zn, Fe, Cu e Mn, indicando uma correlação positiva destes efeitos biológicos associadas com a o aumento destes metais no organismo. Todavia, as concentrações de metais nos organismos parecem não refletir muito claramente os níveis desses metais na água e no sedimento dos locais de coleta. Cabe ressaltar que os ambientes aquáticos são bastante dinâmicos e as coletas de amostras de água durante a campanha de inverno representam apenas um retrato do ambiente naquele momento em que se procedeu a coleta da amostra. A bioacumulação, por sua vez, reflete um histórico de contaminação do local ao longo do tempo e pode indicar um aumento nos níveis de determinados metais naquele ambiente em momentos pretéritos. Numa perspectiva de interpretação espacial dos resultados, no *biplo*t da Figura 16 podemos observar que a comunidade zooplanctônica presente em RDR, RDF e BRG são as que apresentaram maiores níveis dos metais acima mencionados e, por conseguinte, uma resposta mais evidente dos biomarcadores de dano lipídico (LPO) e de exposição (MT). A Figura 17 representa as correlações par a par entre todas as variáveis analisadas, evidenciando as correlações positivas entre os efeitos biológicos com as concentrações corporais de determinados metais.

Figura 14: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água de fundo (fT), no sedimento (S) e no zooplâncton (zoo) e biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (MT) nos organismos. A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal.



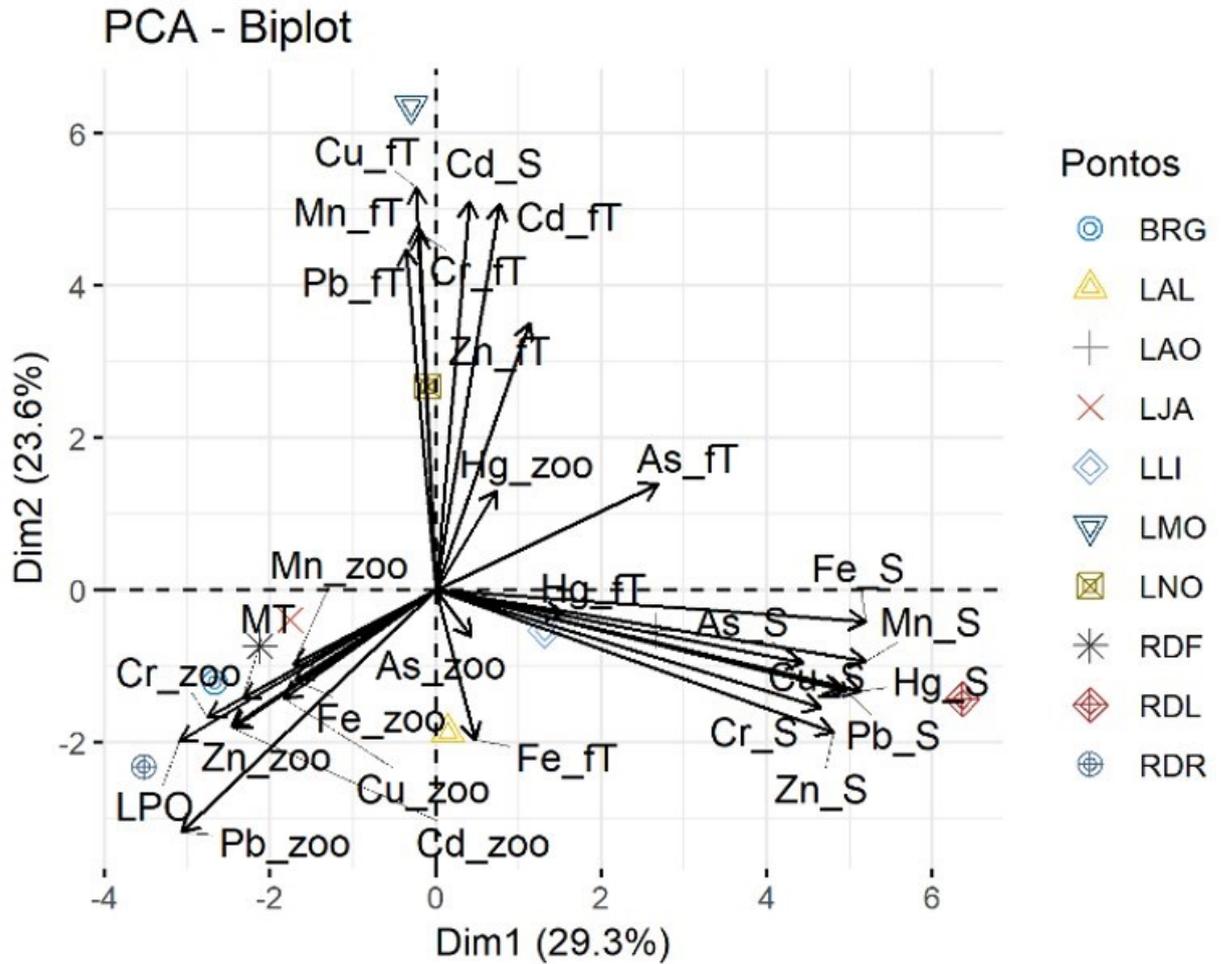
Fonte: Autoria própria.

Figura 15: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas na comunidade zooplanctônica com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente (Dim).



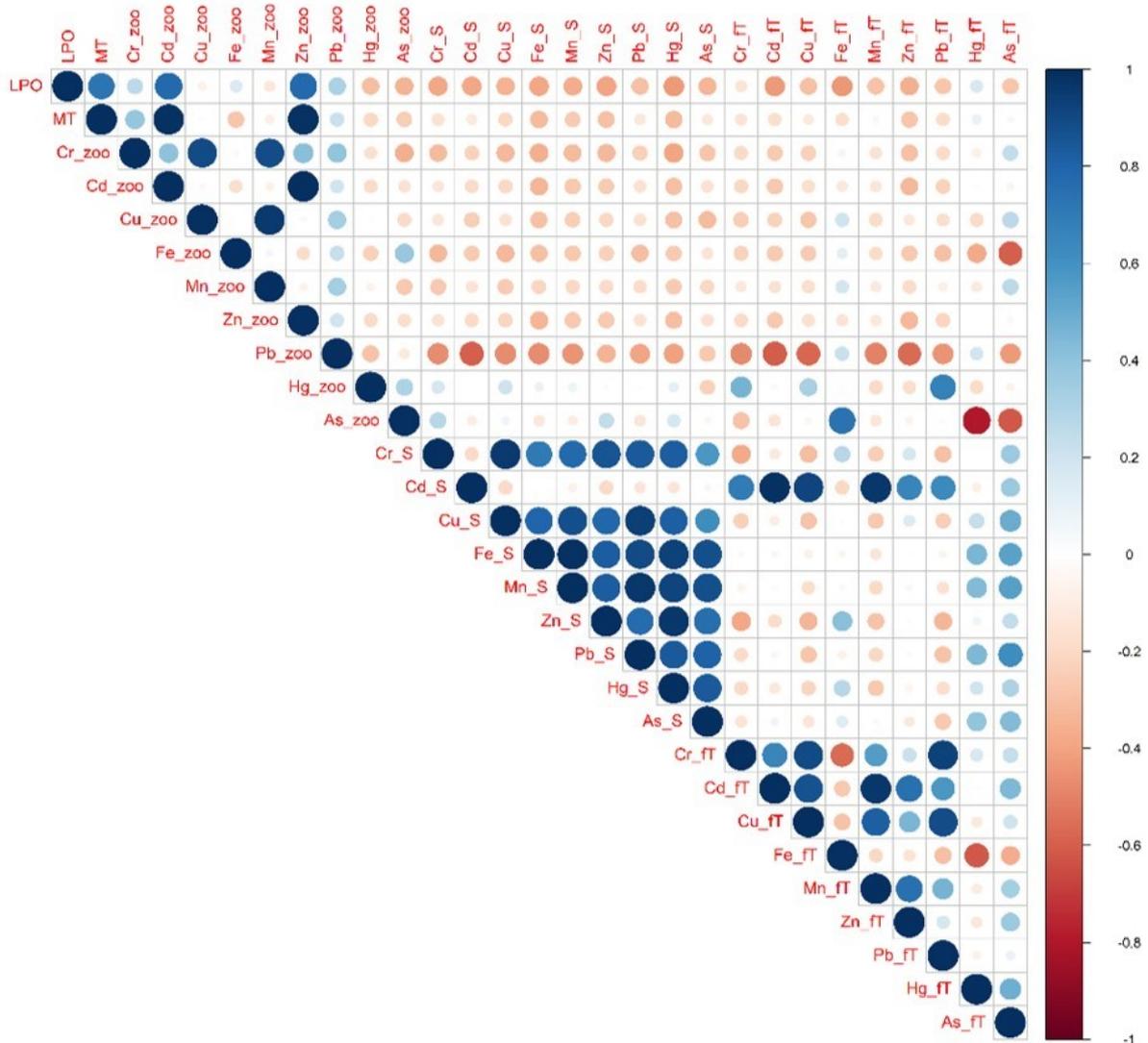
Fonte: Autoria própria.

Figura 16: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas e abióticas e das estações amostrais ao longo da porção capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]).



Fonte: Autoria própria.

Figura 17: Representação gráfica das correlações par a par entre as variáveis abióticas (concentrações de metais na água e sedimento) e biológicas (biomarcadores e concentrações de metais nos organismos) mensuradas na comunidade zooplancônica coletada ao longo da porção capixaba do Rio Doce (set/2018). Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0,05$ ) são mostradas na figura.



Fonte: Autoria própria.

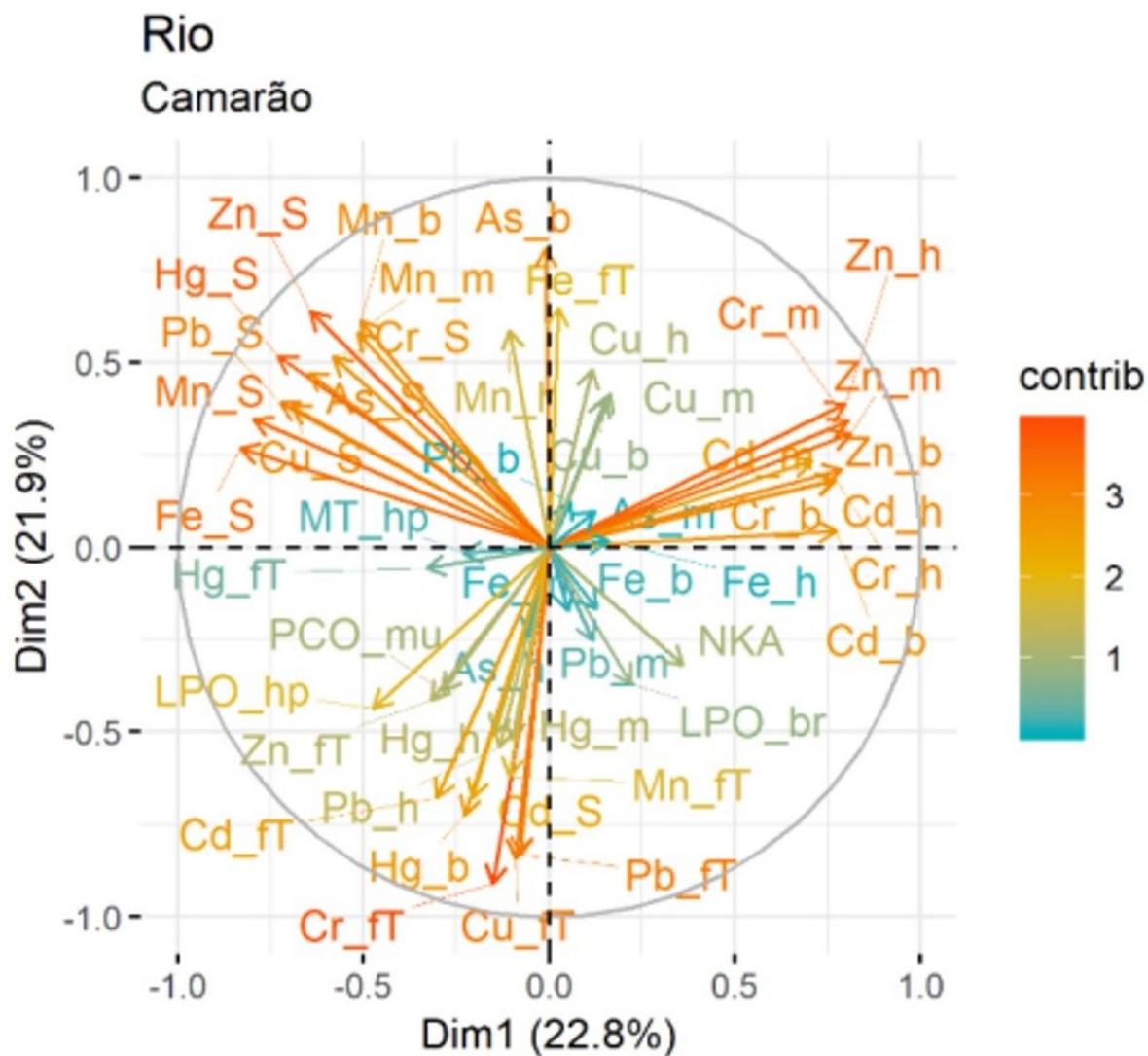
Desta maneira segue a síntese dos resultados e conclusões para o zooplâncton:

A bioacumulação de metais no zooplâncton não refletiu os níveis atuais dos metais presentes na água e no sedimento no momento da coleta, mas pode indicar um efeito crônico e cumulativo das variações na hidrodinâmica local e das oscilações temporais na disponibilidade destes metais no ambiente. Os níveis de lipoperoxidação (LPO) e o conteúdo de metalotioneínas (MT) estão associados ao aumento das concentrações corporais de Fe, Cr, Mn, Cd, Cu e Zn.

### 2.2.6.3 Camarões

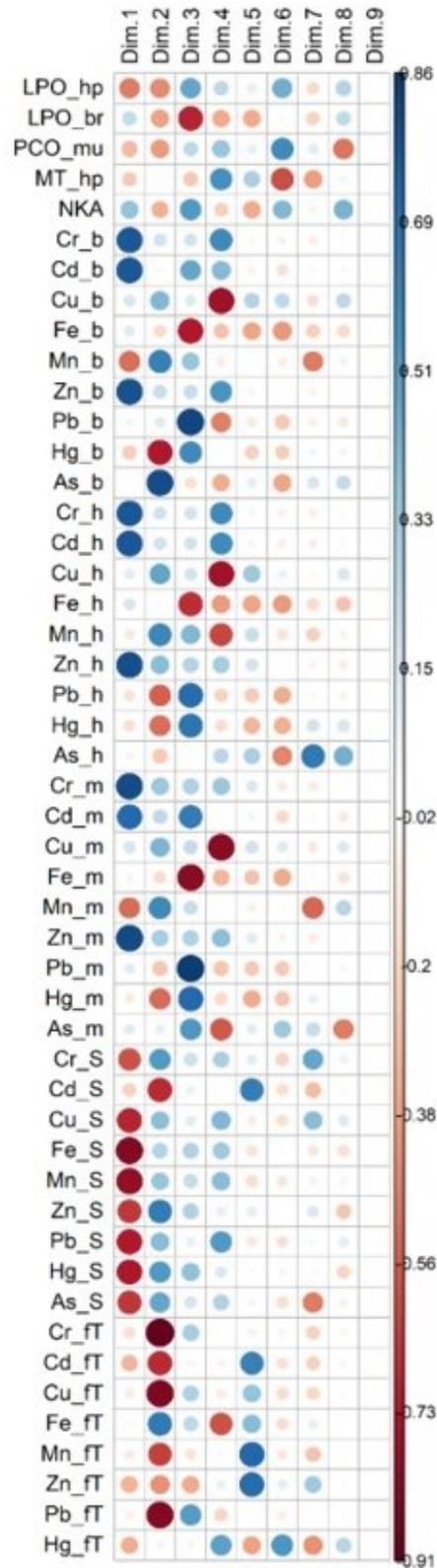
Os resultados da PCA para os camarões são representados na Figura 18. Os dois primeiros componentes da PCA (Dim1 e Dim2) representaram 44,7% da variância total; por outro lado, os outros eixos foram negligenciados porque não forneceram informações adicionais significativas. O primeiro componente (Dim1 - horizontal) explicou 22,8% da variabilidade total e neste primeiro componente, assim como para os demais grupos biológicos investigados é possível verificar um agrupamento dos metais Cr, Cd, Zn nos animais (brânquia, hepatopâncreas e músculo), indicando uma forte associação na bioacumulação destes metais, correlacionado com os níveis de lipoperoxidação (LPO) nas brânquias, enquanto na parte negativa do componente 1, observa-se o agrupamento padrão dos metais presentes no sedimento. Na Figura 19 podemos visualizar quais as variáveis mais importantes para a determinação do componente 1 e 2. No segundo componente da PCA (Dim2), na porção superior observa-se uma correlação entre as concentrações de Cu e Mn nos três tecidos investigados e na porção inferior uma correlação positiva entre os níveis de lipoperoxidação no hepatopâncreas (LPO\_h) e o conteúdo de proteínas oxidadas no músculo (PCO\_m) associados com as concentrações de Cr, Cd, Cu, Zn e Pb na água. Na Figura 20 podemos observar que os efeitos biológicos (danos oxidativos) encontrados nos camarões estão mais associados à Lagoa Monsarás (LMO), local este que por sua vez apresenta as maiores concentrações de íons metálicos livres, a forma mais tóxica para os organismos, de acordo com o BLM.

Figura 18: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água de fundo (fT), no sedimento (S) e nos camarões (brânquias = b; hepatopâncreas = e músculo = m) e biomarcadores de dano lipídico (LPO), danos oxidativos em proteínas (PCO), conteúdo de metalotioneínas (MT) e atividade da Na/K ATPase (NKA). A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal.



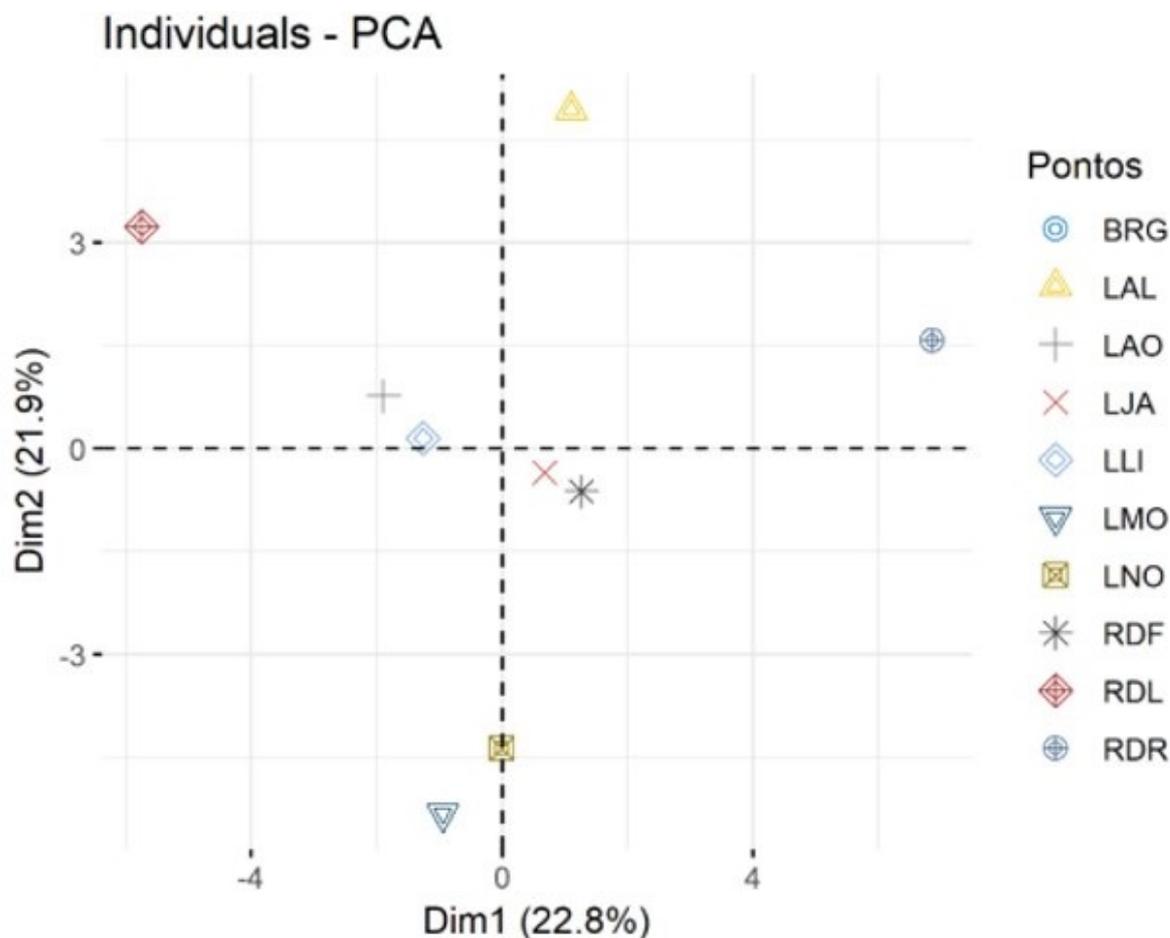
Fonte: Autoria própria.

Figura 19: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas nos camarões com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com o componente específico.



Fonte: Autoria própria.

Figura 20: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas e abióticas e das estações amostrais ao longo da porção capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]).



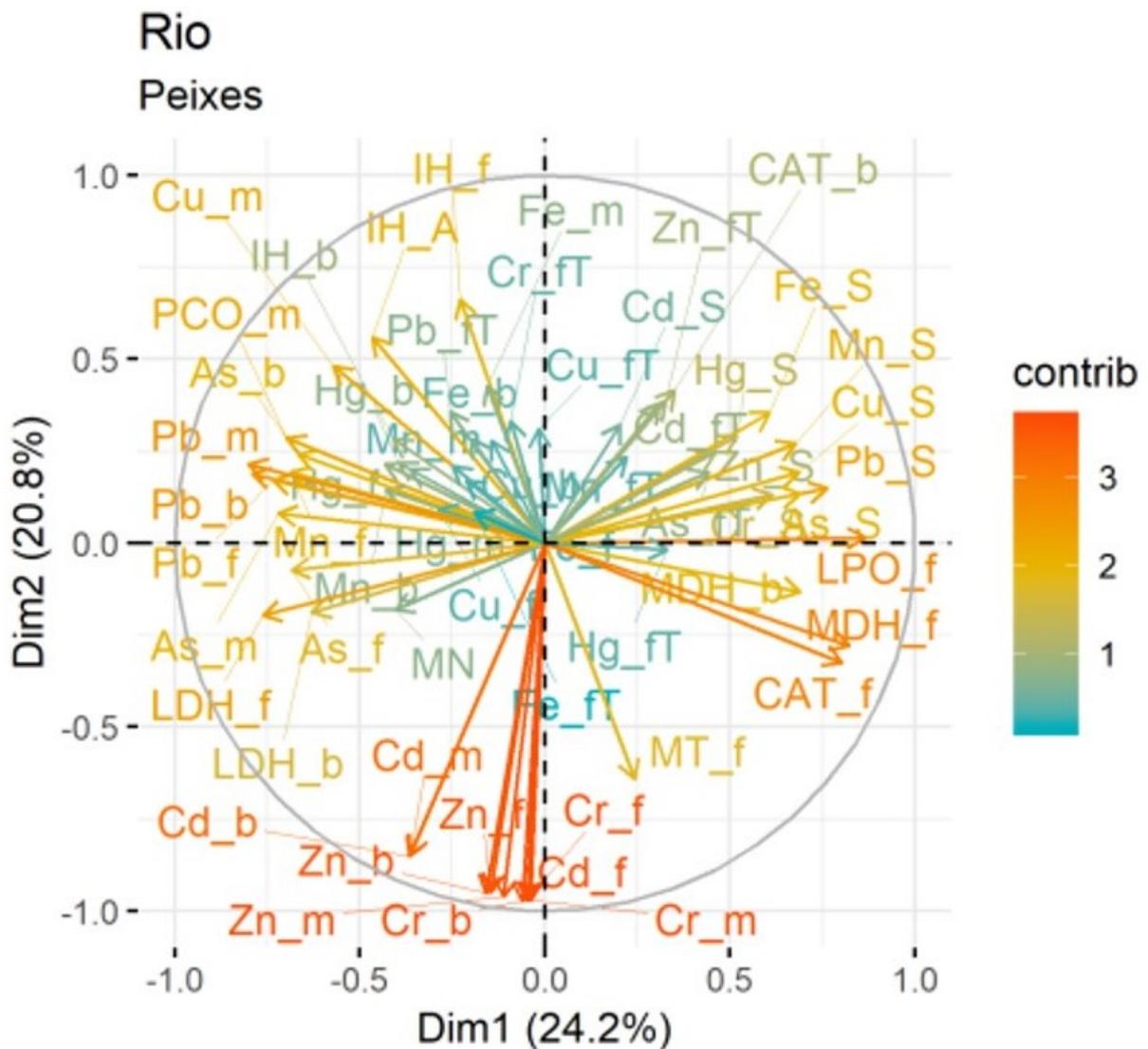
Fonte: Autoria própria.

#### 2.2.6.4 Peixes

Os resultados da PCA para as amostras de peixes são representados na Figura 21. Os dois primeiros componentes da PCA (Dim1 e Dim2) representaram 45,2% da variância total; por outro lado, os outros eixos foram negligenciados porque não forneceram informações adicionais significativas. O primeiro componente (Dim1 - horizontal) explicou 24,2% da variabilidade total e neste primeiro componente, é possível observar uma forte correlação da lipoperoxidação (LPO) com a atividade da catalase (CAT) e da malato-desidrogenase (MDH) tanto no fígado quanto na brânquia, efeitos estes associados com os níveis mais elevados de Fe, Mn, Cu, Pb, As, Zn no sedimento das estações de coleta. Na parte negativa do primeiro componente, observa-se uma correlação entre o conteúdo de proteínas carboniladas (PCO) no músculo com as concentrações de Pb nos tecidos (brânquia, fígado e músculo) e dos índices de alterações histológicas (IH) com as concentrações de Fe nos tecidos e com as concentrações de Cr, Fe e Pb na água. Na Figura 22 podemos visualizar quais as variáveis mais importantes para a determinação do componente 1. No segundo componente da PCA (Dim2) também é possível observar que houve uma correlação positiva entre a bioacumulação de Cr, Cd, Zn na brânquia, fígado e músculo

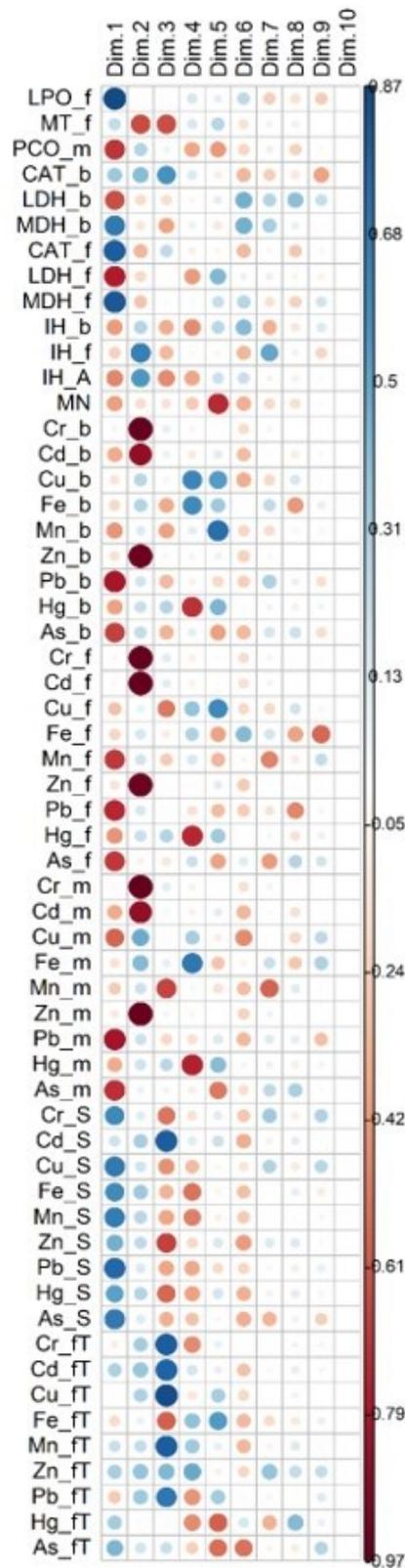
com o conteúdo hepático de metalotioneína (MT). Na Figura 23 podemos observar que os efeitos biológicos associados aos metais no sedimento foram mais evidentes nos animais coletados em RDL, o aumento de MT associado a acumulação de Cr, Cd e Zn foi mais evidente nos peixes coletados em RDR, enquanto outros efeitos, como os danos histológicos em fígado e brânquias estão melhor associados à diversos outros ambientes. A Figura 24 representa as correlações par a par entre todas as variáveis analisadas, evidenciando as correlações positivas entre os efeitos biológicos com as concentrações corporais de determinados metais e os níveis de metais no ambiente.

Figura 21: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) na água de fundo (fT), no sedimento (S) e nas brânquias (b), fígado (f) e músculo (m) dos peixes e biomarcadores de dano lipídico (LPO), dano oxidativo em proteínas (PCO), conteúdo de metalotioneínas (MT), atividade da catalase (CAT), lactato desidrogenase (LDH), malato desidrogenase (MDH), frequência de micronúcleos (MN) e índice de alterações histológicas na brânquia (IH\_b), fígado (IH\_f) e no animal (IH\_A [somatória de alterações observadas nos dois órgãos]). A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal.



Fonte: Autoria própria.

Figura 22: Painel de correlação de cada variável abiótica ou biótica mensuradas em espécies de peixes coletadas na porção capixaba da bacia do Rio Doce com os componentes principais (Dim1 e Dim2) extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa a importância de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente.



Fonte: Autoria própria.

Figura 23: Diagrama de ordenação *biplot* a partir da análise de componentes principais (PCA) indicando agrupamentos espaciais das variáveis bióticas mensuradas na comunidade de peixes e abióticas das estações amostrais ao longo da porção capixaba do rio Doce, a saber: Rio Guandu (BRG), Lagoa do Areal (LAL), Lagoa do Areão (LAO), Lagoa Juparanã (LJA), Lagoa do Limão (LLI), Lagoa Monsarás (LMO), Lagoa Nova (LNO), Rio Doce em Linhares (RDL) e Rio Doce em Regência (RDR) e foz do Rio Doce (RDF [estuário]).

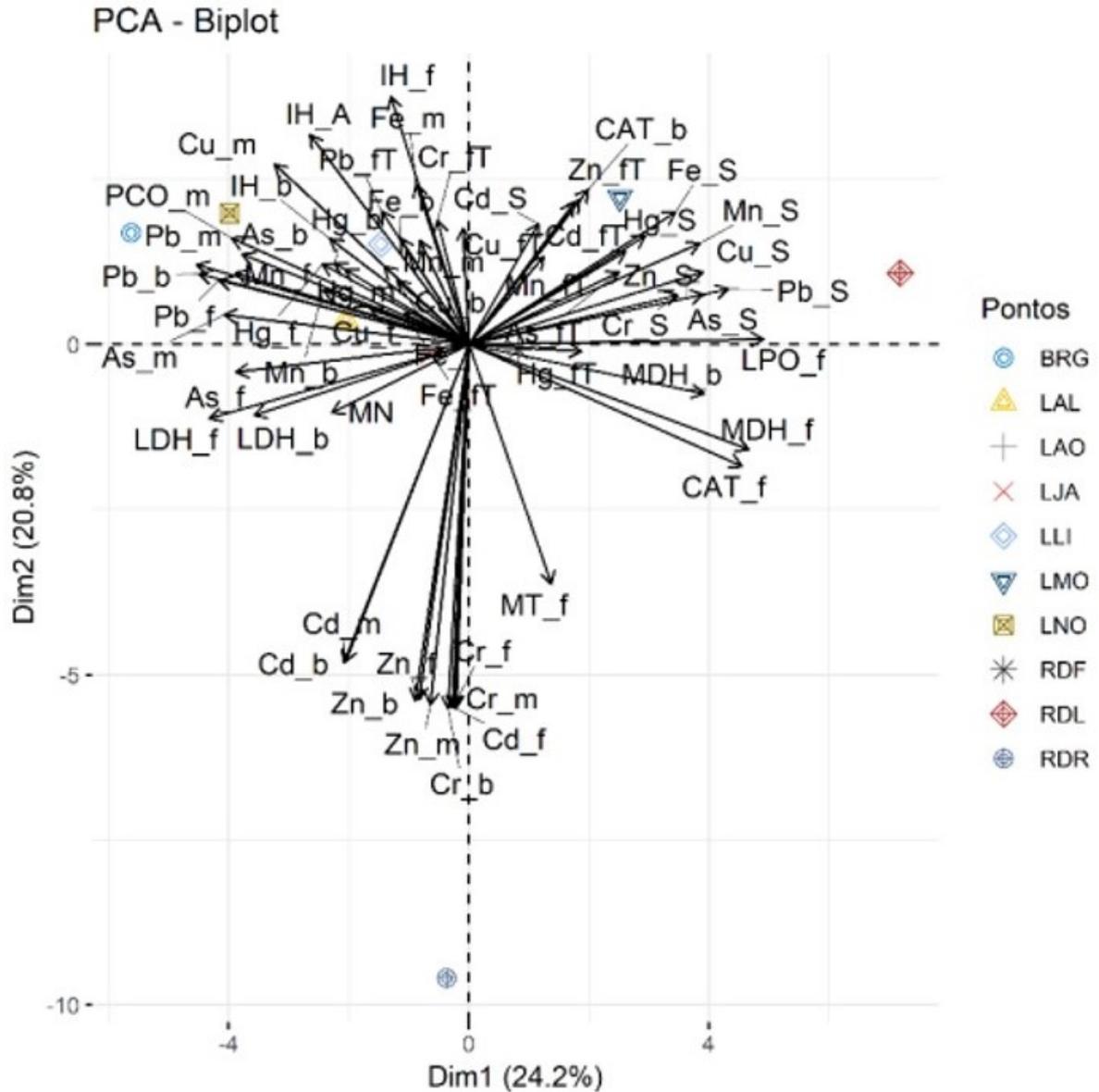
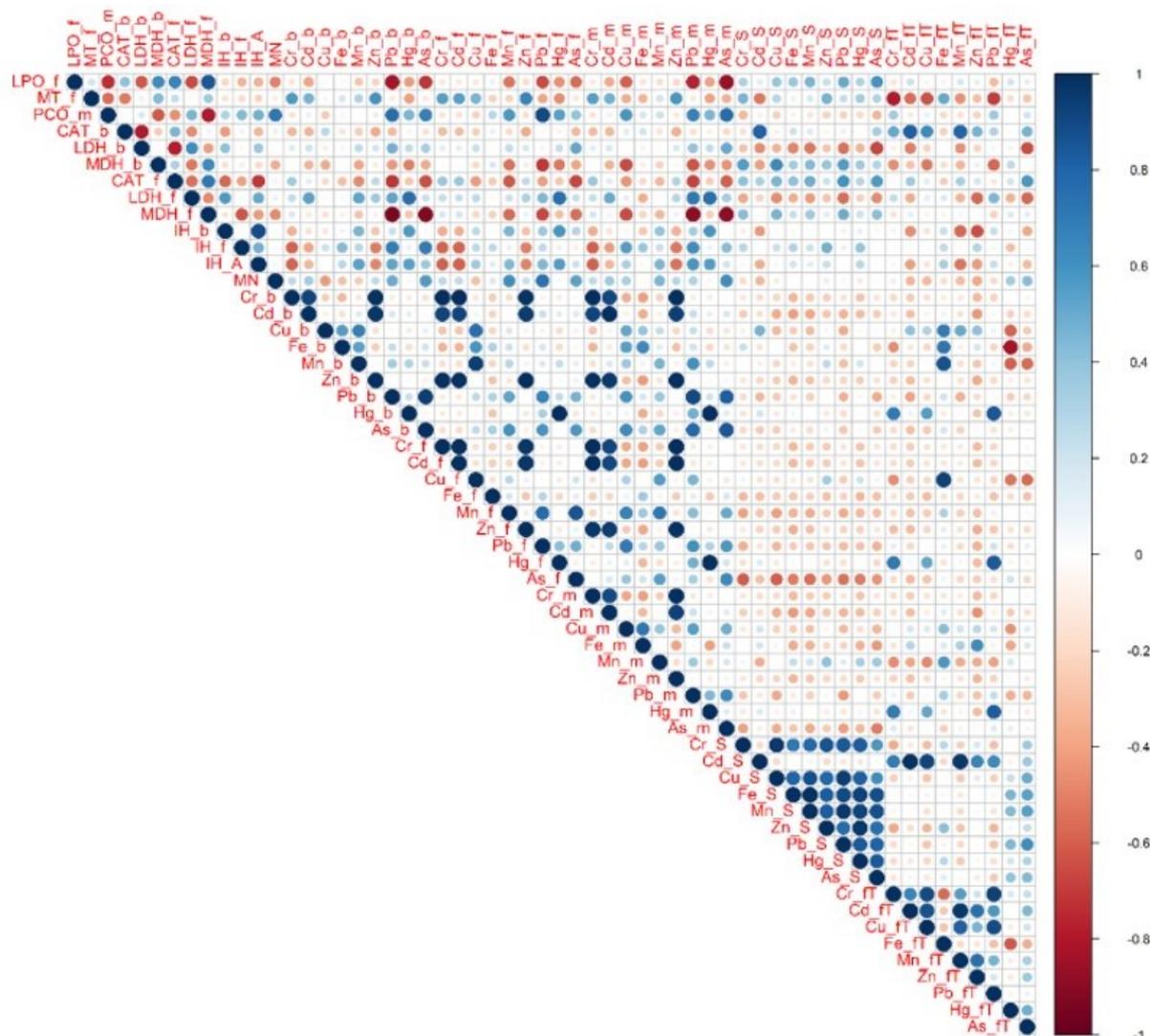


Figura 24: Representação gráfica das correlações par a par entre as variáveis abióticas (concentrações de metais na água e sedimento) e biológicas (biomarcadores e concentrações de metais nos organismos) mensuradas na comunidade de peixes coletados ao longo da porção capixaba do Rio Doce (set/2018). Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0,05$ ) são mostradas na figura.



Fonte: Autoria própria.

## 2.2.7 Discussão geral sobre os efeitos biológicos

Nesta seção, abordaremos uma discussão geral a respeito dos principais efeitos biológicos observados nos diferentes organismos coletados ao longo das estações amostrais da porção capixaba do Rio Doce durante a 1ª Campanha de Coleta (Inverno/2018).

De maneira geral, os principais efeitos biológicos observados na biota aquática da porção capixaba da bacia do Rio Doce foram evidenciados pelo aumento nos níveis de danos oxidativos, especialmente a lipoperoxidação (LPO) e pelo aumento responsivo à exposição a metais no conteúdo de

metalotioneínas (MT) e grande incidência de alterações morfológicas observadas no tecido branquial e hepático nos peixes coletados em todas as estações amostrais investigadas.

Os resultados da primeira campanha de monitoramento evidenciaram claramente uma correlação positiva entre o aumento nos níveis de peroxidação lipídica (LPO) na comunidade planctônica com os níveis dos metais Cr, Cd e Zn nos organismos, enquanto que na comunidade de peixes, o aumento dos níveis de lipoperoxidação parece estar associado com as maiores concentrações de metais no sedimento. Um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) acima dos níveis basais, ultrapassando a capacidade antioxidante dos tecidos e gerando danos em macromoléculas (lipoperoxidação, oxidação de proteínas e dano de DNA), caracteriza a situação de “estresse oxidativo” (Halliwell & Gutteridge, 1999). Neste contexto, cabe ressaltar que muitos poluentes, incluindo os metais, são capazes de aumentar a geração de ERO através de mecanismos diversos, tais como a reação de Fenton na presença de alguns metais de transição (como Cu e Fe), a auto-oxidação, o desacoplamento de transportadores de elétrons de membrana, entre outros (Livingstone, 2001), podendo induzir estresse oxidativo em animais aquáticos (Monserrat et al., 2007). Por isso, a medida dos níveis de danos oxidativos às macromoléculas, incluindo a lipoperoxidação, tem sido amplamente utilizada como biomarcador de estresse oxidativo induzido por contaminantes no meio aquático, especialmente os metais (Monserrat et al., 2007; Machado et al., 2013). Portanto, a exposição de organismos aquáticos aos metais, pode induzir a geração de ERO, provocando danos oxidativos importantes às biomoléculas, tais como lipídios, proteínas e DNA.

A LPO pode ser definida como uma cascata de eventos bioquímicos resultantes da ação de radicais livres sobre os lipídeos insaturados das membranas celulares, gerando principalmente lipoperóxidos levando à destruição de sua estrutura, falência dos mecanismos de trocas de metabólitos e, numa condição extrema, à morte celular (Benzie, 1996). A LPO envolve a oxidação dos ácidos graxos polinsaturados existentes nos fosfolipídios das membranas celulares, sendo estes os locais mais susceptíveis às reações de oxidação. Entre os produtos finais formados durante o processo de lipoperoxidação, destacam-se gases de hidrocarbonetos e os aldeídos, como o malondialdeído (MDA) e o 4-hidroxinonenal (4-HNE) (Halliwell & Gutteridge, 2007). O 4-HNE em níveis elevados (acima de 1  $\mu\text{M}$ ) pode atuar em processos citotóxicos e genotóxicos, provocando danos mitocondriais e inibindo a ação de chaperonas e a síntese de DNA e de proteínas. Já o MDA pode atacar proteínas quando presente em ambientes de baixo pH, resultando em modificações de inúmeros resíduos de aminoácidos (especialmente lisina), também podendo reagir com bases de DNA (especialmente guanina) gerando lesões mutagênicas (Halliwell & Gutteridge, 2007). A LPO talvez se constitua no evento citotóxico primário que desencadeia uma sequência de lesões aos constituintes celulares. As alterações nas membranas levam a transtornos na permeabilidade, alterando o fluxo iônico e o fluxo de outras substâncias, o que resulta na perda da seletividade para entrada e/ou saída de nutrientes e substâncias tóxicas à célula, alterações do DNA, oxidação da LDL e comprometimento dos componentes da matriz celular (Halliwell & Gutteridge, 2007).

Através da análise de componentes principais, também foi possível observar uma correlação positiva entre o aumento dos níveis de LPO com o a atividade da enzima catalase (CAT) no tecido branquial e hepático de peixes, especialmente nos espécimes coletados no trecho do Rio Doce em Linhares (RDL), local este que por sua vez apresentou os maiores valores de concentração de metais no sedimento. A CAT é uma enzima antioxidante encontrada nos peroxissomos, sendo responsável pela desintoxicação celular pela decomposição de peróxido de hidrogênio a água e oxigênio (Aebi, 1984). Alterações na homeostase celular entre as defesas antioxidantes e a produção de ERO são as responsáveis pela geração do estresse oxidativo celular. Em geral, os metais, especialmente os de transição como Fe, Cu e Cr participam ativamente na catálise de reações de oxirredução capazes de gerar ERO, incluindo o peróxido de hidrogênio, e desta forma, a resposta observada na atividade da CAT pode servir como mais um parâmetro indicativo do aumento na produção de ERO desencadeada pela exposição a metais presentes nos ambientes de estudo.

Foram analisadas também duas enzimas do metabolismo energético celular, a LDH e a MDH, em brânquias e fígados de peixes coletados nos diferentes ambientes. A LDH é localizada no citosol e catalisa a etapa terminal do metabolismo anaeróbico, promovendo a conversão de piruvato a lactato, concomitante com a oxidação/redução do NADH e NAD<sup>+</sup> (Voet & Voet, 2006; Lehninger et al, 2011). A atividade e as propriedades funcionais desta enzima refletem o nível de resistência a situações estressoras (Zakharov et al., 2004). A menor atividade da LDH tanto hepática quanto branquial, quando comparadas as medianas encontradas nos outros locais de investigação, também pode ser observada nos peixes coletados em RDL, o que pode levar a prejuízos no metabolismo energético destes animais. Sastry e Gupta (1980) afirmaram que a inibição da atividade da LDH pode ser decorrente do desequilíbrio de íons ou da ação intracelular do metal subsequente ao dano inicial da membrana plasmática. Este efeito inibitório também pode ser devido à ligação direta do metal com a enzima e à formação de um complexo enzima-inibidor (Singh & Sharma, 1998).

Outro biomarcador bastante responsivo no presente estudo foi a metalotioneína (MT), que apresentou uma resposta característica à exposição e aumento de determinados metais nos diferentes níveis tróficos investigados, incluindo o plâncton, camarão e peixes. A função fundamental das MTs nos sistemas vivos não foi totalmente esclarecida, embora existam várias hipóteses que incluem a ação destas moléculas como metalochaperonas que atuam no transporte de íons metálicos para outras proteínas, controle da concentração de elementos traços livres como o zinco (Zn) e cobre (Cu), estocagem e armazenamento, ação como agente de detoxificação para metais como cádmio (Cd) e mercúrio (Hg), e também um papel protetor através do sequestro de metais e proteção contra condições de estresse. Por isso, a MT é uma importante proteína no metabolismo intracelular de Cu e Zn e na proteção contra danos oxidativos resultantes da exposição excessiva a metais (Muto et al., 1999). A gama de metais capazes de se ligarem à MT é ampla (Stillman, 1995). A maior parte dos íons metálicos das famílias I-B e II-B da tabela periódica são conhecidos por se ligarem aos grupos cisteína-SH e a afinidade dos íons metálicos pelos sítios de ligação segue a ordem encontrada para tiolatos inorgânicos, isto é, Hg (II), prata (Ag) (I), Cu (I), Cd (II) e Zn (II) (Noel-Lambot et al., 1978, Kägi e

Schäffer, 1988; Roméo et al., 1997; Linde et al., 2001). Mais especificamente no plâncton, uma correlação positiva entre o aumento dos níveis de Cr, Zn e Cd foi acompanhada dos aumentos no conteúdo de MTs. Um dos mecanismos intracelulares mais difundidos para a desintoxicação de Cd<sup>2+</sup> em organismos fotossintéticos, como o fitoplâncton envolve a quelação dos íons metálicos por peptídeos ou proteínas, tais como glutatona, metalotioneínas (MTs) e fitoquelatinas (Kotrba et al., 1999; Cobbett, 2000; Mendoza-Cozatl et al., 2005).

Um dos mecanismos-chave da toxicidade dos metais tem sido relatado com o comprometimento osmoregulatório associado à inibição de ATPases nos tecidos osmorregulatórios de organismos aquáticos (McGeer & Wood, 1998). Estes elementos podem alterar a atividade das enzimas tanto pela ligação aos seus grupos funcionais ou pelo deslocamento do metal associado à enzima (Viarengo, 1989). As ATPases desempenham um papel fundamental no transporte de íons através da célula, mantendo assim o equilíbrio osmótico no animal (Atli & Canli, 2013), atuando na captação ativa de íons da água, ou gerando gradientes eletroquímicos favoráveis a entrada de determinados íons para o sangue ou hemolinfa. Desta forma, as ATPases, em conjunto com os parâmetros iônicos têm sido considerados como biomarcadores sensíveis utilizados para avaliação dos efeitos de metais sobre espécies aquáticas dulcícolas. Nos camarões coletados no Rio Doce em Linhares (RDL) e na foz (RDF), os menores valores de atividade da NKA podem indicar um efeito direto dos metais associados a estes ambientes, o que pode comprometer a tomada direta de íons do seu ambiente e o seu sucesso e na colonização e reprodução de espécies diádromas.

Modificações morfológicas em diferentes órgãos de peixes também são frequentemente associadas à exposição a contaminantes ambientais. A histologia representa um instrumento útil para a avaliação do grau de contaminação aquática, como um indicador de exposição a contaminantes (Cengiz, 2006). A análise histológica é um método rápido e eficiente para se determinar os efeitos dos agentes químicos em tecidos e órgãos, pois ocorrem alterações na morfologia em resposta ao estresse sub-letal ou crônico (Johnson, 1993). Há um grande número de estudos de avaliações de risco ambientais que utilizam os biomarcadores histopatológicos, todavia, a ausência de dados numéricos dificulta o estabelecimento de relações de causa e efeito entre a patologia observada e os contaminantes. Dessa forma, tais estudos têm focado em índices histopatológicos que forneçam dados numéricos baseados em abordagens semi-quantitativas (Costa et al., 2009).

Em termos gerais, os resultados obtidos na avaliação de níveis de organização biológica mais baixos, como as respostas bioquímicas e moleculares, são mais específicos, sensíveis e apresentam alta reprodutibilidade. No entanto, estes são mais difíceis de ser correlacionados a efeitos ecológicos. Por outro lado, as respostas obtidas em níveis mais altos de organização, como por exemplo em populações e comunidades, indicam diretamente o *status* do ecossistema, sendo relevantes em avaliações ambientais; entretanto, essas respostas são de difícil acesso, principalmente considerando-se as avaliações *in loco*. Dessa forma, as avaliações histopatológicas, as quais são relativamente fáceis de ser determinadas, atuam como um vínculo entre o *fitness* individual e os efeitos ecológicos, permitindo a extrapolação das respostas individuais a populações (Au, 2004; Schlenk et al., 2008). A

alta incidência de alterações morfológicas encontradas no fígado e nas brânquias de praticamente todos os peixes, com destaque para as alterações irreversíveis, como a necrose tecidual, podem indicar um efeito crônico e relacionado à exposição a altas concentrações de metais no ambiente em momentos pretéritos a este monitoramento e também ao atual cenário de exposição, além da transferência trófica destes contaminantes dentro dos ecossistemas investigados.

### 2.3 CONCLUSÃO

Os resultados pontuais aqui apresentados sobre a disponibilização e concentração de diferentes metais avaliados na água e sedimento do ambiente dulcícola podem ser transitórios e devem ser considerados cenários climáticos distintos, como a periodização das coletas em estações de inverno e verão nos quais os períodos de seca e chuva são bastante contrastantes. Tudo que foi incorporado ao ambiente está em constante movimentação e uma análise estática não acompanha o efeito real da dinâmica de cada metal. No entanto, tais resultados na água e no sedimento combinados com o comportamento desses metais na biota e com possíveis efeitos biológicos sem dúvida representam uma resposta completa e complexa sobre o real impacto causado na biodiversidade e no ecossistema.

Numa visão global, a correlação dos resultados apresentados com o rompimento da barragem necessitará de compilação com dados de outros subprojetos do mesmo anexo, como os resultados dos ensaios toxicológicos laboratoriais com amostras de água e sedimento, composição e ecologia da comunidade microbiológica, contaminação em aves e quelônios e demais biomarcadores em desenvolvimento não contemplados neste relatório. Entretanto, já é possível identificar padrões de correlação entre os níveis de metais no ambiente, a bioacumulação e os efeitos agudos e crônicos sobre os indivíduos investigados. A concentração dos metais na água e no sedimento estão acima dos valores encontrados nos ambientes amostrados antes do rompimento da barragem. Embora estes valores estejam abaixo do limite permitido pela legislação brasileira e abaixo dos valores encontrados em outros estudos que precedem os resultados do presente relatório, a variação na concentração, na composição e dinâmica temporal dos metais na água e no sedimento acarretou em efeitos negativos para as espécies que residem nesses ambientes. Dentre esses efeitos pode-se destacar a bioacumulação dos metais Cromo, Cádmio, Zinco e Ferro nas espécies avaliadas de diferentes níveis tróficos. As associações encontradas entre a variação na concentração de tais elementos na biota e seus efeitos biológicos nas células e seus componentes, como alterações específicas nos biomarcadores com alta sensibilidade a metais, evidenciam condições de estresse gerado às células. Os prejuízos em nível celular, se não compensados, se estendem aos danos teciduais e podem atingir a esfera de indivíduo. Isto significa que o dano persistente reflete em um efeito negativo crônico para o organismo, caracterizando um efeito de segundo grau. Tais circunstâncias podem promover impactos sobre a população e comunidade. De maneira geral, todos os níveis tróficos foram afetados, incluindo os organismos produtores (fitoplâncton), e consumidores primários, secundários e terciários (zooplâncton, camarões e peixes). Efeitos biológicos observados já na base da cadeia trófica, como os

danos oxidativos observados no plâncton, podem comprometer os serviços ecossistêmicos, incluindo a produção primária de energia, afetando assim toda a cadeia trófica e podendo trazer prejuízos maiores para o ecossistema ao longo do tempo.

As respostas dos biomarcadores de órgãos-alvos, como por exemplo, a histopatologia e perfil enzimático, podem expressar condições ambientais específicas e representar tanto a intensidade quanto o tempo de exposição dos organismos às alterações do ambiente. Assim, todos os parâmetros avaliados nesse subprojeto devem ser mantidos em caso de continuidade desse programa de monitoramento. Sugere-se, ainda, que pontos amostrais a jusante do rompimento da barragem sejam adicionados ao monitoramento ou monitorar áreas não impactadas pelos rejeitos na mesma área amostral para controle das variáveis, ou seja, para o estabelecimento de valores de referência para comparação com os obtidos nos pontos impactados.

Os compostos inorgânicos, presentes em alta concentração em rejeitos de minério, permanecem por longos períodos no ambiente já que esses compostos têm capacidade de adsorção, complexação, reprecipitação e ressuspensão. Por outro lado, os componentes orgânicos são mais facilmente degradados por vias diversas. Assim, o período de monitoramento ambiental em regiões impactadas pela classe de compostos inorgânicos (metais) deve ser longo.

O monitoramento ambiental completo da região atingida deve considerar não apenas o dimensionamento dos impactos diretos, deve também considerar a recuperação do ambiente e o reestabelecimento das condições pretéritas ao rompimento da barragem. Desta forma, um monitoramento de longa duração é indicado para verificar a recuperação da qualidade ambiental e mitigação dos impactos sobre os organismos aquáticos.

## 2.4 REFERÊNCIAS

- Abalaka, S.E., Fatihu, M.Y., Ibrahim, N.D.G., & Ambali, S.F. (2015). Gills and skin histopathological evaluation in African sharptooth catfish, *Clarias gariepinus* exposed to ethanol extract of *Adenium obesum* stem bark. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 41, 119-127.
- Aebi, H. (1984). Catalase in Vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 21-126.
- Ahmad, I., Maria, V.L., Oliveira, M., Pacheco, M., & Santos, M.A. (2006). Oxidative stress and genotoxic effects in gill and kidney of *Anguilla anguilla* L. exposed to chromium with or without pre-exposure to  $\beta$ -naphthoflavone. *Mutation Research - Genetic Toxicology and Environmental Mutagenesis*, 68, 16–28.
- Ameur, W. B., Megdiche, Y.E., Lapuente, J., Barhoumi, B., Trabelsi, S., Ennaceur, S., Camps, L., Serret, J., Ramos-López, D., Gonzalez-Linares, J., Driss, M.R., & Borràs, M. (2015). Oxidative stress, genotoxicity and histopathology biomarker responses in *Mugil cephalus* and *Dicentrarchus labrax* gill exposed to persistent pollutants. A field study in the Bizerte Lagoon: Tunisia. *Chemosphere*, 135, 67-74.
- Anderson, D.P., & Zeeman, M.G. (1995). Immunotoxicology in Fish. In: *Fundamentals of Aquatic Toxicology Effects: environmental fate and risk assessment*, Second Edition. Taylor & Francis. 345-369.
- Atli, G., & Canli, M. (2013). Metals ( $Ag^+$ ,  $Cd^{2+}$ ,  $Cr^{6+}$ ) affect ATPase activity in the gill, kidney, and muscle of freshwater fish *Oreochromis niloticus* following acute and chronic exposures. *Environmental toxicology*, 28 (12), 707-717.
- Au, D.W.T. (2004). The application of histo-cytopathological biomarkers in marine pollution monitoring: a review. *Marine Pollution Bulletin*, 48 (9-10), 817-834.
- Benzie, I.F.F. (1996). Lipid peroxidation: a review of causes, consequences, measurement and dietary influences. *International journal of food sciences and nutrition*, 47 (3), 233-261.
- Bernet, D., Schmidt, H., Meier, W., Burkhardt-Holm, P., & Wahli, T. (1999). Histopathology in fish: proposal for a protocol to assess aquatic pollution. *Journal of Fish Diseases*, 22, 25-34.
- Bertrand, L., Monferrán, M.V., Métails, I., Mouneyrac, C., & Amé, M.V. (2015). MTs in *Palaemonetes argentinus* as potential biomarkers of zinc contamination in freshwaters. *Ecological Indicators*, 48, 533–541.
- Bertrand, L., Monferrán, M.V., Métails, I., Mouneyrac, C., & Amé, M.V. (2018). Native crustacean species as a bioindicator of freshwater ecosystem pollution: A multivariate and integrative study of multi-biomarker response in active river monitoring. *Chemosphere*, 206, 265-277.
- Bianchini, A., da Silva, C.C., Lauer, M.M., Jorge, M.B., Costa, P.G., Marques, J.A., Marangoni, L.F.B., Jesulich, A.C., Taylor, A.J., Luz, D.C., da Silva, J.F., Zebal, Y.D., & Pinto M.M.Z.N. (2016). Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação. Brasília.

- Bianchini A (2019). Monitoramento dos efeitos ecotoxicológicos da pluma de sedimentos oriunda da foz do Rio Doce sobre o ambiente marinho. Relatório Técnico-Científico - FURG/ICMBio, Rio Grande, RS.
- Blackwood, W., Mcmenmy, W.H., Meyer, A., Norman, R.M., & RusseL, D.S. (1961) Greenfield Neuropathology. Ed. London Edward Arnold Ltd. p.71.
- Calbreath, D.F. (1992). Clinical chemistry: A fundamental textbook. In: W.B. Saunders Co. Philadelphia, US, 179 – 223.
- Campos, D.Y.F. (2007). Análises das respostas citogenéticas e histopatológicas de peixe *Trematomus newnesi* exposto à água do mar diante da Estação Antártica Brasileira “Comandante Ferraz”, Ilha Rei George, Antártica. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. São Paulo, SP. 112p.
- Carvalho, M.S., Moreira, R.M., Ribeiro, K. D., & Almeida, A.M. (2017) Concentração de metais no rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. *Acta Brasiliensis*, 1 (201), 37-41.
- Cengiz, E.I. (2006). Gill and kidney histopathology in the freshwater fish *Cyprinus carpio* after acute exposure to deltamethrin. *Environmental Toxicology and Pharmacology*, 22 (2), 200-204.
- Chandran, R., Sivakumar, A.A., Mohandass, S., Aruchami, M. (2005). Effect of cadmium and zinc on antioxidant enzyme activity in the gastropod, *Achatina fulica*. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Toxicology & Pharmacology*, 140, 422–426.
- Cobbett, C.S. (2000). Phytochelatins and their roles in heavy metal detoxification. *Plant Physiology*, 123, 825–832.
- CONAMA. 2012. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução No. 454, de 1 de novembro 2012. Diário Oficial da União de 08/11/12.
- CONAMA. 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução No. 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União de 18/03/05.
- Costa, P.M., Diniz, M.S., Caeiro, S., Lobo, J., Martins, M., Ferreira, A. M., & Costa, M. H. (2009). Histological biomarkers in liver and gills of juvenile *Solea senegalensis* exposed to contaminated estuarine sediments: a weighted indices approach. *Aquatic toxicology*, 92 (3), 202-212.
- Determinação de metais na bacia do Rio Doce – Relatório Técnico, 2016. Grupo Independente para Avaliação de Impacto Ambiental.
- Ezemonye, L.I., Adebayo, P.O., Enuneku, A.A., Tongo, I., & Ogbomida, E. (2019). Potential health risk consequences of heavy metal concentrations in surface water, shrimp (*Macrobrachium macrobrachion*) and fish (*Brycinus longipinnis*) from Benin River, Nigeria. *Toxicology Reports*, 6, 1–9.

- Fanta, E., Rios, F.S., Romão, S., Vianna, A.C.C., & Freiburger, S. (2003). Histopathology of the fish *Corydoras paleatus* contaminated with sublethal levels of organophosphorus in water and food. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 54, 119–130.
- Fernandes, G.W., Goulart, F.F., Ranieri, B.D., et al. (2016). Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Brazilian Journal of Nature Conservation*, 14, 35–45.
- Fleeger, J.W., Carman, K.R., & Nisbet, R.M. (2003). Indirect effects of contaminants in aquatic ecosystems. *Science of The Total Environment*, 317, 207-233.
- Galvao, R.C.F., Holanda, I.B.B., De Carvalho, D.P., Almeida, R., Souza, C.M.M., Lacerda, L.D., & Bastos, W.R., (2018). Freshwater shrimps (*Macrobrachium depressimanum* and *Macrobrachium jelskii*) as biomonitors of Hg availability in the Madeira River Basin, Western Amazon. *Environmental Monitoring Assessment*, 190, 77.
- Gundersen, D.T., Miller, R., Mischler, A., Elpers, K., & Mims, S.D. (2000). Biomarker response and health of polychlorinated biphenyl – and chlordane contaminated paddlefish from the Ohio River Basin, USA. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 19, 2275-2285.
- Halliwell, B., & Gutteridge, J.M.C. (1999). *Free Radicals in Biology and Medicine*. First Edition. University Press, Oxford, USA.
- Halliwell, B., & Gutteridge, J.M.C. (2007). *Free radicals in biology and medicine*. Fourth Edition, University Press, Oxford, USA.
- Hinton, D.E., Baumann, P.C., Gardner, G.R., Hawkins, W.E., Hendricks, J. D., Murchelano, R.A., Okihira, M.S. (1992). Histopathologic biomarkers. In: *Biomarkers – biochemical, physiological and histological markers of anthropogenic stress*. Boca Raton ,Lewis Publishers. 155–195.
- Johnson, L.L., Stehr, C.M., Olson, O.P., Myers, M.S., Pierce, S.M., Wigren, C.A., & Varanasi, U. (1993). Chemical contaminants and hepatic lesions in winter flounder (*Pleuronectes americanus*) from the Northeast Coast of the United States. *Environmental Science & Technology*, 27 (13), 2759-2771.
- Kägi, J.H.R., & Schäffer, A. (1988). Biochemistry of metallothionein. *Biochemistry*, 27, 8509–8515.
- Kotrba, P., Macek, T., & Ruml, T. (1999). Heavy metal-binding peptides and proteins in plants: a review. *Collection of Czechoslovak chemical communications*, 64, 1057–1086.
- Kubrak, O.I., Lushchak, O.V., Lushchak, J.V., Torous, I.M., Storey, J.M., Storey, K.B., & Lushchak, V.I. (2010). Chromium effects on free radical processes in goldfish tissues: comparison of Cr (III) and Cr (VI) exposures on oxidative stress markers, glutathione status and antioxidant enzymes. *Comparative Biochemistry and Physiology - C Toxicology and Pharmacology*, 152, 360-370.

- Kumar, N., Ambasankar, K., Krishnan, K.K., Gupta, S.K., Bhushan, S., & Minhas, P.S. (2016). Acute toxicity, biochemical and histopathological responses of endosulfan in Chanos. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 131, 79-88.
- Kumar, N., Krishnani, K. K., & Singh, N. P. (2019) Oxidative and cellular metabolic stress of fish: An appealing tool for biomonitoring of metal contamination in the Kolkata Wetland, a Ramsar site. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 76, 469-482.
- Kumar, N., Krishnani, K.K., Meena, K.K., Gupta, S. K., & Singh, N.P. (2017). Oxidative and cellular metabolic stress of *Oreochromis mossambicus* as biomarkers indicators of trace element contaminants. *Chemosphere*, 171, 265-274.
- Kumar, N., Sharma, R., Tripathi, G., Kumar, K., Dalvi, R.S., & Krishna, G. (2014). Cellular metabolic, stress and histological response on exposure to acute toxicity of endosulfan in *Tilapia (Oreochromis mossambicus)*. *Environmental Toxicology*, 31, 106-115.
- HYDROQUAL, 1999. Biotic Ligand Model (BLM) User's Guide for Version a 008. HydroQual. NJ.
- Lehninger, A.L., Cox, M.M., & Nelson, D.L. (2011). *Princípios de Bioquímica de Lehninger*. Fifth Edition. Artmed. Porto Alegre, RS.
- Liebel, S., Tomotake, M.E.M., & Oliveira Ribeiro, C.A. (2013) Fish histopathology as biomarker to evaluate water quality. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 8, 9-15.
- Linde, A.R., Sánchez-Galán, S., Vallés-Mota, P., & Garcia-Vázquez, E. (2001). Metallothionein as bioindicator of freshwater metal pollution: European eel and brown trout. *Ecotoxicology Environmental Safety*, 49, 60–63.
- Livingstone D.R. (2001). Contaminant-stimulates reactive oxygen species production and oxidative damage in aquatic organisms. *Marine Pollution Bulletin*, 42, 656-666.
- Lopes, F.F., Cognato, D.P., & Malabarba, L.R. (2005). Alterações histopatológicas observadas nas brânquias do lambari *Astyanax jacubiensis* (Linnaeus, 1758) (Teleostei: Characidae) sob influência de efluentes petroquímicos. *Revista Brasileira de Toxicologia*, 18 (2), 99-104.
- Macedo-Veiga, A.M., Monroy, E., Navarro, G., & Sosto, A. (2013). Metal concentrations and pathological responses of wild native fish exposed to sewage discharge in a Mediterranean river. *Science of the Total Environment*, 449, 9-19.
- McGeer, J.C., Szebedinszky, C., McDonald, D.G., & Wood, C.M. (2000). Effects of chronic sublethal exposure to waterborne Cu, Cd or Zn in rainbow trout. 1: Iono- regulatory disturbance and metabolic costs. *Aquatic Toxicology*, 50 (3), 231-243.
- Mendoza-Cozatl, D., Loza-Tavera, H., Hernandez-Navarro, A., & Moreno-Sanchez, R. (2005). Sulfur assimilation and glutathione metabolism under cadmium stress in yeast, protists and plants. *FEMS Microbiology Reviews*, 29, 653–671.

- Meyers, T.R., & Hendricks, J.D. (1985) Histopathology. In: Fundamentals of aquatic toxicology: methods and applications. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, USA. 283-331.
- Monserrat, J.M., Martinez, P.E., Geracitano, L.A., Amado, L.L., Martins, C.M.G., Pinho, G.L.L., Chaves, I.S., Ferreira-Cravo, M., Ventura-Lima, J., & Bianchini, A. (2007). Pollution biomarkers in estuarine animals: Critical review and new perspectives. *Comparative Biochemistry and Physiology C*, 146, 221-234.
- Moriwaki, H., Osborne, M.R., & Phillips, D.H. (2008). Effects of mixing metal ions on oxidative DNA damage mediated by a Fenton-type reduction. *Toxicology in Vitro*, 22, 36-44.
- Musrati, R.A., Kollarova, M., Mernik, N., & Mikulasova, D. (1998). Malate dehydrogenase: distribution, function and properties. *General Physiology and Biophysics*, 17, 193-210.
- Muto, N., Ren, H.W., Hwang, G.S., Tominaga, S., Itoh, N., & Tanaka, K. (1999). Induction of two major isoforms of metallothionein in crucian carp (*Carassius cuvieri*) by airpumping stress, dexamethasone, and metals. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 122, 75–82.
- Noel-Lambot, F., Gerday, C., & Disteche, A. (1978). Distribution of Cd, Zn and Cu in liver and gills of the eel *Anguilla anguilla* with special reference to metallothioneins. *Comparative Biochemistry and Physiology*, 61, 177–187.
- Oliveira K.S.S., & Quaresma V.S. (2017). Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. *Journal of South American Earth Sciences*, 78, 101-115.
- Oliveira-Ribeiro, C.A., Voltaire, Y., Sanchezchardl, A., & Roche, H. (2005). Bioaccumulation and the effects of organochlorine pesticides, PAH and heavy metals in the Eel (*Anguilla anguilla*) at the Camargue Nature Reserve, France. *Aquatic Toxicology*, 74, 53-69.
- Paris-Palácios, S., Biagianti-Risbourg, S., & Vernet, G. (2000). Biochemical and (ultra)structural hepatic perturbations of *Brachydanio rerio* (Teleostei, Cyprinidae) exposed to two sublethal concentrations of copper sulfate. *Aquatic Toxicology*, 50, 109 -124.
- Passow, H.A., Rothstein, A., & Clarkson, T.W. (1961). The general pharmacology of heavy metals. *Pharmacological Reviews*, 13, 185-224.
- Paulino, M.G., Benze, T.P., Sadauskas-Henrique H., Sakuragui, M.M., Fernandes, J.B., & Fernandes, M.N. (2014). The impact of organochlorines and metals on wild fish living in a tropical hydroelectric reservoir: bioaccumulation and histopathological biomarkers. *Science of the Total Environment*, 497–498, 293–306.
- Queiroz, H.M., Nóbrega, G.N., Ferreira, T.O., Almeida, L.S., Romero, T.B., Santaella, S.T., Bernardino, A., & Otero, X.L. (2018). The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? *Science of the Total Environment*, 637–638, 498–506.

- Rajeshkumar, S., Liu, Y., Ma, J., Ying Duan, H., & Li, X. (2017). Effects of exposure to multiple heavy metals on biochemical and histopathological alterations in common carp, *Cyprinus carpio* L. *Fish & Shellfish Immunology*, 70, 461-472.
- Regoli, F., Giuliani, M.E., Benedetti, M., & Arukwe, A. (2011). Molecular and biochemical biomarkers in environmental monitoring: A comparison of biotransformation and antioxidant defense systems in multiple tissues. *Aquatic Toxicology*, 105, 56-66.
- Rojik, I., Nemcsók, J., & Boross, L. (1993). Morphological and biochemical studies on liver, kidney and gill of fishes affected by pesticides. *Acta Biologica Hungarica*, 34, 81-92.
- Roméo M., Cosson, R.P., Gnassia-Barelli, M., Risso, C., Stien, X., & Lafaurie, M. (1997). Metallothionein determination in the liver of the sea bass *Dicentrarchus labrax* treated with copper and B(a)P. *Marine Environmental Research*, 44, 275–284.
- Santos, D.C.M. (2009). Toxidez aguda do zinco em lambaris *Astyanax aff. bimaculatus*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Pós-Graduação em Biologia Animal. Viçosa, MG. 125p.
- Schlenk, D., Handy, R., Steinert, S., Depledge, M. H., & Benson, W. (2008). Biomarkers. *The toxicology of fishes*, 1, 683-732.
- Schwaiger, J., Wanke, R., Adam, S., Pawert, M., Honnen, W., & Triebkorn, R. (1997) The use of histopathological indicators to evaluate contaminant related stress in fish. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 6 (1), 75-86.
- Shobha-rani, A., Sudharsan, R., Reddy, T.N., Reddy, P.U.M., & Raju, T.N. (2000). Alternations in the levels of dehydrogenases in a freshwater fish, *Tilapia mossambica* (Peters) exposed to arsenic toxicity. *Indian Journal of Environmental Health*, 42, 130-133.
- Singh, M., Ansari, A.A., Mueller, G., & Singh, I.G. (1997). Heavy metals in freshly deposited sediments of the Gomati river (a tributary of the Ganga river): effects of human activities. *Environmental Geology*, 29, 246- 252.
- Singh, R.K., & Sharma, B. (1998). Carbofuran induced biochemical changes in *Clarias batrachus*. *Pesticide Management Science*, 53, 285-290.
- Stillman M.J. (1995). Metallothioneins. *Coordination Chemistry Reviews*, 14, 461–511.
- Takashima, F., & Hibiya, T. (1995). An atlas of fish histology normal and pathological features. Second Edition. Kodansha: Gustav Fischer Verlag.
- Thatcher, V.E., & Brites-Neto, J. (1994). Diagnóstico, prevenção e tratamento das enfermidades de peixes neotropicais de água doce. *Revista Brasileira de Medicina Veterinária*, 16, 111-128.
- Thomson, R.G. (1978). *General veterinary pathology*. Philadelphia: Saunders, 444p.

- Thophon, S., Kruatrachue, M., Upatham, E.S., Pokethitiyook, P., Sahaphong, S., & Jaritkhuan, S. (2003). Histopathological alterations of white seabass, *Lates calcarifer*, in acute and subchronic cadmium exposure. *Environmental Pollution*, 121, 307-320.
- Tkatcheva, V., Hyvarinen, H., Kukkonen, J., Ryzhkov, L.P., & Holopainen, I.J. (2004). Toxic effects of mining effluents on fish gills in a subarctic lake system in NW Russia. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 57, 278-289.
- Venugopal, N.B.R.K., & Reddy, S.L.N. (1992). Nephrotoxic and hepatotoxic effects of trivalent and hexavalent chromium in a teleost fish *Anabas scandens*: enzymological and biochemical changes. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 24, 287-293.
- Viarengo, A. (1989). Heavy metals in marine invertebrates: mechanisms of regulation and toxicity at the cellular level. *Reviews in Aquatic Science*, 1 (2), 295-317.
- Voet, D. & Voet, J. (2006). *Bioquímica*, Terceira Edição, Artmed. Porto Alegre, RS. Artmed. p.1616.
- Winkaler, E.U., Silva, A.G., Galindo, H.C., & Martinez, C.B.R. (2001). Histological and physiological biomarkers to monitor the health of streams of fish Londrina, Paraná State. *Acta Scientiarum*, 3, 507-514.
- Zakhartsev, M., Johansen, T., Pörtner, H.O., & Blust, R. (2004). Effects of temperature acclimation on lactate dehydrogenase of cod (*Gadus morhua*): genetic, kinetic and thermodynamic aspects. *The Journal of Experimental Biology*, 207, 95 -112.
- Zanolo, R., & Yamamura, M.H. (2006). Parasitas em tilápias-do-nilo criadas em sistema de tanques-rede. *Semana: Ciências Agrárias*, 27, 281-288.
- Zeni, T. O. (2016). O uso da histopatologia por microscopia de luz em estudos com peixes dulcícola em condições ambientais controladas Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Pós-Graduação em Ciências Biológicas. Curitiba, PR.182p.

### **3 SUBPROJETO: MONITORAMENTO DO AMBIENTE MARINHO (FOZ DO RIO DOCE E REGIÃO COSTEIRA ADJACENTE)**

#### **3.1 OBJETIVO**

O monitoramento ecotoxicológico descrito neste relatório tem como objetivo avaliar as concentrações de metais na água, no sedimento e em organismos marinhos de diferentes níveis da cadeia trófica, incluindo o fitoplâncton, o zooplâncton, e recursos pesqueiros (peixes e crustáceos). E analisar biomarcadores de exposição e efeito de metais em organismos marinhos de diferentes níveis da cadeia trófica.

#### **3.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Este relatório irá apresentar os resultados das atividades de amostragem e análise de dados desenvolvidos no primeiro semestre do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I no ambiente marinho. Para análise e interpretação dos resultados obtidos, foram feitas comparações com dados pretéritos (estudos realizados pela FURG, UERJ e UFES durante o monitoramento ambiental coordenado pelo ICMBio) e com a literatura. Além disso, foram utilizadas técnicas multivariadas de ordenação de dados para integrar matrizes de dados biológicos e de dados abióticos. Esta estratégia se justifica pela complexidade e variedade de tipos de dados amostrados. Análises univariadas foram aplicadas a parâmetros cujo comportamento foram destacados nos resultados das análises multivariadas.

##### **3.2.1 Área de estudo**

Conforme definido no Anexo 1 do TR4, a Campanha Marinha 1- Estação seca (setembro/outubro de 2018) e a Campanha Marinha 2- Estação chuvosa (janeiro/fevereiro de 2019) do Anexo 1- Ecotoxicologia, contempla 25 estações amostrais desde regiões marinhas próximas a Guarapari (ES) até o Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (BA). O nome e código da estação amostral e posição geográfica, estão apresentados na Quadro 4 e na Figura 25.

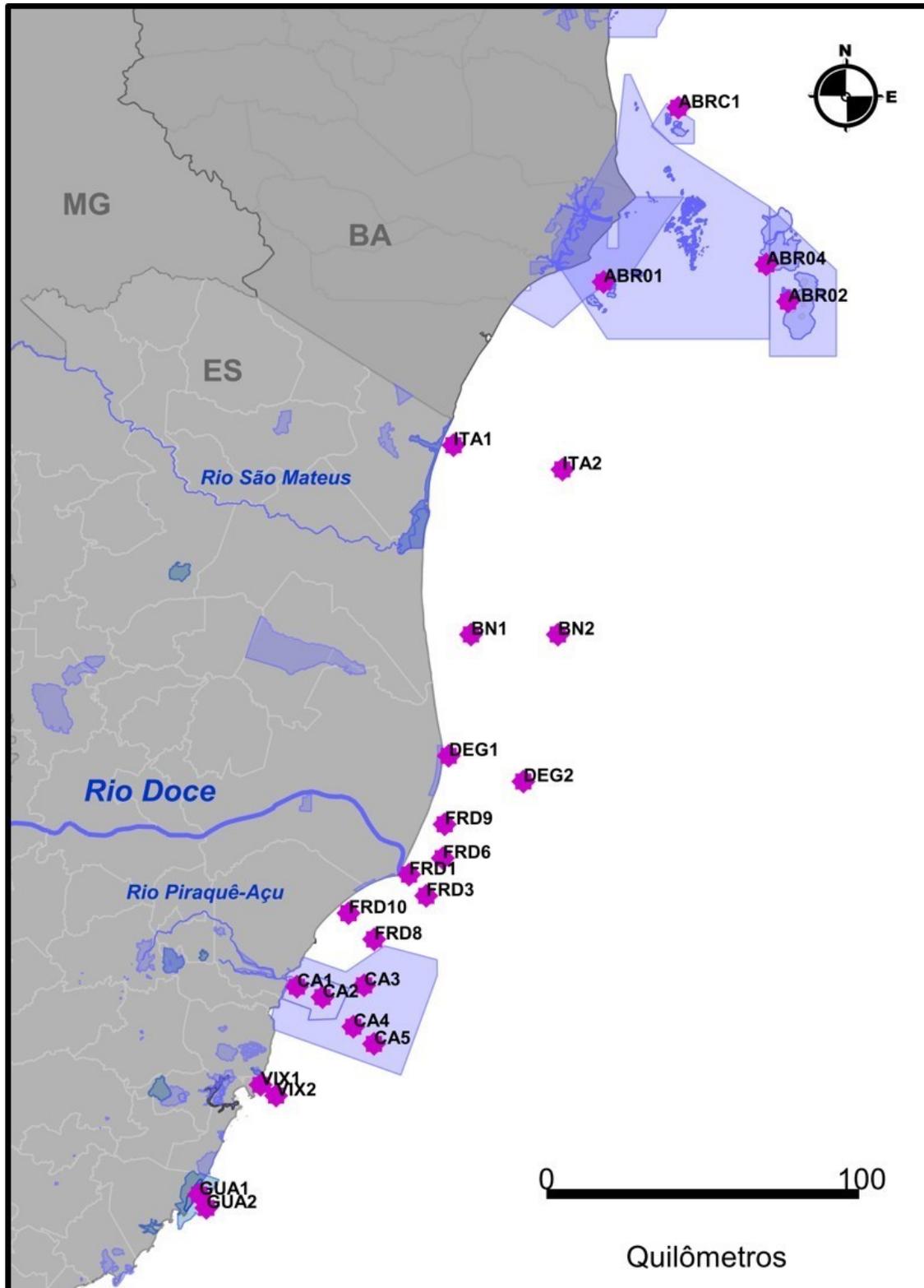
Quadro 4: Estações amostrais da Campanha Marinha 1 e 2, referente ao Anexo 1- Ecotoxicologia e posição geográfica (latitude e longitude) das 25 estações amostrais em UTM Sirgas 2000.

SUBPROJETO	NOME DA ESTAÇÃO AMOSTRAL	CÓDIGO DA ESTAÇÃO	NORTHING	EASTING
Anexo 1 – Marinho	Guarapari 1	GUA1	7723667,77	355156,85
	Guarapari 2	GUA2	7719405,95	357393,32
	Vitoria 1	VIX1	7759040,18	373370,92
	Vitoria 2	VIX2	7755589,67	378037,01
	Costa das Algas 1	CA1	7790616,41	384042,73
	Costa das Algas 2	CA2	7787276,74	391745,12
	Costa das Algas 3	CA3	7791153,28	404234,57
	Costa das Algas 4	CA4	7787200,53	401010,39
	Costa das Algas 5	CA5	7771576,57	411733,92
	Foz do Rio Doce 1	FRD1	7826708,46	417558,23
	Foz do Rio Doce 3	FRD3	7819938,12	422768,53
	Foz do Rio Doce 6	FRD6	7832036,66	427720,85
	Foz do Rio Doce 8	FRD8	7805922,41	407208,69
	Foz do Rio Doce 9	FRD9	7842923,74	428268,74
	Foz do Rio Doce 10	FRD10	7814269,72	399458,35
	Barra Nova 1	BN1	7903774,11	435969,74
	Barra Nova 2	BN2	7903846,12	462242,81
	Degredo 1	DEG1	7864891,21	429405,3
	Degredo 2	DEG2	7856730,3	451968,3
	Itaúnas 1	ITA1	7964547,9	430449,2
	Itaúnas 2	ITA2	7956840,44	463552,34
	Abrolhos 1	ABR01	8017006,73	475936,13
	Abrolhos 2	ABR02	8010704,39	532065,56
	Abrolhos 4	ABR04	8022616,67	525452,4
	Abrolhos Controle 1	ABRC1	8072874,16	498657,66

Fonte: Autoria própria.

Figura 25: Mapa amostral das 25 estações de coleta da Campanha Marinha 1 e 2, referente ao Anexo 1- Ecotoxicologia. A nomenclatura das estações amostrais bem como as respectivas coordenadas geográficas encontram-se descritas no Quadro 4.

4.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.2 Parâmetros físico-químicos e análise de metais na água e sedimento

Neste relatório todos os resultados apresentados se referem a amostras coletadas na Campanha Marinha 1- Estação Seca (set/out 2018). Amostras obtidas na Campanha Marinha 2- Estação chuvosa (jan/fev 2019), estão em fase de processamento e análise. Para análise de parâmetros físico-químicos da água foi utilizado um CTD RBR do tipo XR, instrumento oceanográfico com sensores para registrar temperatura, salinidade, condutividade e turbidez. Para esta amostragem, dados de perfilagem da coluna d'água armazenados no equipamento eram posteriormente processados. Entretanto, problemas com o cabo de comunicação do CTD impossibilitaram a obtenção dos dados em todos os pontos amostrais. Neste relatório são apresentados os valores máximos de temperatura e condutividade obtidos em cada ponto para cada parâmetro registrado (Quadro 5). Na Campanha Marinha 2 (dados em análise e processamento), visando aprimorar a amostragem dos parâmetros físico-químicos, foi utilizado a Sonda Multiparâmetro RINKO modelo AAQ176 (JFR Advantech Co., Ltd) com obtenção dos dados em tempo real onde foram registradas temperatura, salinidade, condutividade, densidade, clorofila, turbidez, pH, oxigênio dissolvido e PAR (Radiação Fotossinteticamente Ativa [400-700nm]).

Quadro 5: Parâmetros físico-químicos da água nas estações amostrais marinhas durante a Campanha Marinha 1.

Parâmetros físico-químicos			
Ponto	Profundidade (m)	Temperatura (°C)	Condutividade (mS/cm)
GUA1	10	22,34	52,47
GUA2	20	22,58	52,93
VIX1	*	22,65	52,86
VIX2	*	22,19	52,34
CA1	22	23,7	54,09
CA2	31	24,2	54,4
CA3	30	24,82	55,84
CA4	28	*	*
CA5	32	*	*
FRD1	12	*	*
FRD3	26	24,3	52,7
FRD6	20	*	*
FRD8	28	24,4	54,8
FRD9	16	25,1	56,7
FRD10	18	*	*
DEG1	18	25,7	56,7
DEG2	34	25,8	57,2
BN1	22	25,8	57,2
BN2	36	26,5	56,3
ITA1	10	28,7	56,5
ITA2	12	25,8	56,6
ABR01	8	25,7	56,3
ABR02	15	25,2	56,2

Fonte: Autoria própria.

\* Estações amostrais onde não foram obtidos todos os dados.

Em cada estação amostral foram coletadas amostras de água (superfície e fundo) e sedimento, seguindo métodos descritos no "Protocolo de Análises de Laboratório do Programa de Monitoramento

da Biodiversidade Aquática na Área Ambiental I”, para quantificação da concentração dos metais: Cromo (Cr), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg) e Arsênio (As).

A princípio, apresentaremos os resultados de quantificação de metais totais ou dissolvidos confrontados com a Resolução 357 de 17/03/2005 do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA 357/2005) para água salina, visando à detecção de resultados em desconformidade com a legislação vigente (Tabela 15). Num segundo momento, quando possível, estes resultados também serão comparados com estudos realizados pela FURG, UERJ e UFES durante o monitoramento ambiental coordenado pelo ICMBio.

#### 3.2.2.1 Principais resultados:

Em resumo, na Campanha Marinha 1 (set/out 2018) os seguintes metais encontravam-se em desconformidade com o preconizado pela resolução CONAMA 357/2005, de acordo com a Tabela 15:

- Cobre dissolvido, nas estações amostrais GUA2 e VIX2.
- Ferro dissolvido, em todas estações amostrais exceto no CA2, CA3, FRD8, DEG2, BN1, BN2 e ABRC1.
- Manganês total, nas estações amostrais FRD10 e DEG2.
- Mercúrio total, nas estações amostrais CA1, CA2, CA3, CA4, FRD3, FRD6, FRD10, DEG1, DEG2, ITA2, BN1, ABR01, ABR02 e ABR04.

Tabela 15: Concentração (µg/L) dos metais analisados na água (superfície e fundo/total e dissolvido) nas 25 estações amostradas na Campanha Marinha 1. Para cada metal, os valores estão apresentados como média ± erro padrão e mediana, e estão confrontados com os valores máximos estabelecidos pela resolução do CONAMA 357/2005 para águas salinas (convertido para unidade µg/L). Em vermelho destacam-se os valores (Média) acima do permitido pela legislação vigente.

Amostra de água	Ponto	N	Cr (µg/L)		Cd (µg/L)		Cu (µg/L)		Fe (µg/L)		Mn (µg/L)		Zn (µg/L)		Pb (µg/L)		Hg (µg/L)		As (µg/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Superfície Total	GUA1	3	7,42 ± 4,59	3,84	0,04 ± 0,01	0,06	5,14 ± 0,81	4,55	511,00 ± 158,26	371,60	16,77 ± 11,47	5,30	27,08 ± 1,22	27,87	1,10 ± 0,02	1,12	0,099 ± 0,001	0,099	0,47 ± 0,21	0,35
Superfície Dissolvido		3	1,87 ± 0,05	1,85	0,02 ± 0,01	0,01	1,35 ± 0,37	1,08	151,83 ± 7,97	151,30	12,87 ± 8,17	5,20	18,33 ± 1,58	16,98	1,04 ± 0,02	1,02	0,089 ± 0,005	0,085	0,19 ± 0,02	0,21
Fundo Total		3	2,77 ± 0,05	2,77	0,05 ± 0,01	0,07	3,87 ± 1,07	2,85	622,03 ± 79,97	619,10	8,49 ± 2,21	8,06	25,14 ± 2,36	23,23	1,01 ± 0,02	1,02	0,106 ± 0,002	0,105	0,66 ± 0,06	0,67
Fundo Dissolvido		3	2,46 ± 0,23	2,61	0,02 ± 0,01	0,01	1,98 ± 0,41	2,36	353,23 ± 31,10	337,60	5,03 ± 3,00	2,74	16,19 ± 1,88	17,17	0,64 ± 0,05	0,59	0,105 ± 0,002	0,100	0,22 ± 0,04	0,21
Superfície Total	GUA2	3	2,03 ± 0,06	2,00	0,01 ± 0,00	0,01	3,73 ± 0,66	4,16	504,83 ± 133,99	423,70	30,34 ± 15,27	37,14	30,96 ± 3,23	29,41	0,81 ± 0,27	1,03	0,097 ± 0,000	0,097	0,69 ± 0,06	0,64
Superfície Dissolvido		3	1,54 ± 0,06	1,52	0,01 ± 0,00	0,01	1,61 ± 0,41	1,53	467,23 ± 120,59	400,20	5,34 ± 3,38	3,08	24,53 ± 4,02	20,51	0,47 ± 0,27	0,25	0,087 ± 0,004	0,083	0,27 ± 0,07	0,26
Fundo Total		3	4,25 ± 0,61	3,79	0,01 ± 0,00	0,01	17,39 ± 8,12	10,25	759,10 ± 35,47	783,50	13,87 ± 3,68	15,93	29,23 ± 4,87	30,74	1,05 ± 0,02	1,07	0,102 ± 0,002	0,101	0,47 ± 0,16	0,62
Fundo Dissolvido		3	2,43 ± 0,33	2,20	0,007 ± 0,002	0,01	14,13 ± 8,62	7,32	443,06 ± 116,26	515,00	10,49 ± 4,49	14,36	18,36 ± 0,56	18,46	0,98 ± 0,04	0,97	0,092 ± 0,005	0,097	0,15 ± 0,03	0,12
Superfície Total	VIX1	3	6,60 ± 0,95	5,90	0,05 ± 0,01	0,06	3,27 ± 0,30	3,01	155,50 ± 4,19	157,00	21,90 ± 4,19	19,58	27,37 ± 1,19	26,25	1,04 ± 0,06	1,08	0,073 ± 0,001	0,073	0,86 ± 0,37	0,93
Superfície Dissolvido		3	3,68 ± 1,58	5,22	0,04 ± 0,01	0,05	1,67 ± 0,21	1,58	125,66 ± 7,73	125,40	18,12 ± 3,26	15,22	25,61 ± 0,72	26,23	0,90 ± 0,04	0,86	0,071 ± 0,000	0,071	0,27 ± 0,04	0,29
Fundo Total		3	6,32 ± 0,21	6,49	0,02 ± 0,00	0,02	2,99 ± 0,44	2,95	599,26 ± 42,77	572,10	67,29 ± 4,33	63,81	26,11 ± 1,27	24,90	1,02 ± 0,14	0,94	0,098 ± 0,014	0,109	0,74 ± 0,30	0,75
Fundo Dissolvido		3	5,40 ± 0,10	5,40	0,01 ± 0,00	0,01	1,85 ± 0,25	1,69	439,83 ± 62,13	441,70	50,99 ± 6,15	54,84	19,31 ± 0,96	18,50	0,93 ± 0,10	0,85	0,087 ± 0,011	0,095	0,48 ± 0,16	0,54
Superfície Total	VIX2	3	5,69 ± 0,31	5,63	0,18 ± 0,01	0,18	4,43 ± 0,53	4,61	352,33 ± 26,33	326,00	7,38 ± 3,55	7,14	5,21 ± 1,05	4,76	0,10 ± 0,02	0,09	0,110 ± 0,001	0,111	1,18 ± 0,12	1,12
Superfície Dissolvido		3	4,58 ± 0,24	4,43	0,15 ± 0,01	0,16	2,39 ± 0,34	2,06	320,13 ± 18,63	301,80	1,34 ± 0,05	1,33	3,44 ± 0,12	3,44	0,07 ± 0,00	0,06	0,103 ± 0,003	0,101	0,23 ± 0,06	0,18
Fundo Total		3	7,89 ± 0,88	7,44	0,16 ± 0,01	0,17	16,23 ± 3,44	13,37	490,93 ± 32,21	467,00	8,71 ± 3,42	10,98	18,92 ± 8,45	19,14	0,27 ± 0,07	0,26	0,108 ± 0,001	0,108	0,67 ± 0,04	0,66
Fundo Dissolvido		3	4,62 ± 0,27	4,41	0,11 ± 0,00	0,11	6,98 ± 1,99	8,89	339,03 ± 48,12	297,50	4,20 ± 1,19	5,23	5,23 ± 3,66	3,26	0,03 ± 0,01	0,02	0,103 ± 0,000	0,103	0,43 ± 0,11	0,54

Amostra de água	Ponto	N	Cr (µg/L)		Cd (µg/L)		Cu (µg/L)		Fe (µg/L)		Mn (µg/L)		Zn (µg/L)		Pb (µg/L)		Hg (µg/L)		As (µg/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Superfície Total	CA1	3	6,76 ± 1,62	6,44	0,09 ± 0,00	0,09	0,45 ± 0,18	0,46	606,00 ± 92,17	527,60	1,95 ± 0,71	2,36	45,26 ± 1,44	45,81	0,36 ± 0,00	0,36	0,901 ± 0,002	0,899	0,28 ± 0,01	0,28
Superfície Dissolvido		3	3,45 ± 1,38	2,57	0,08 ± 0,00	0,09	0,30 ± 0,17	0,15	371,83 ± 80,02	439,50	0,60 ± 0,04	0,62	39,45 ± 1,00	40,33	0,34 ± 0,01	0,35	0,870 ± 0,009	0,874	0,21 ± 0,00	0,21
Fundo Total		3	4,47 ± 1,91	4,19	0,09 ± 0,00	0,09	0,35 ± 0,11	0,45	409,80 ± 51,89	437,20	34,60 ± 1,35	35,76	49,08 ± 7,54	44,19	0,36 ± 0,00	0,35	0,905 ± 0,000	0,904	0,50 ± 0,04	0,47
Fundo Dissolvido		3	1,72 ± 0,40	1,55	0,08 ± 0,00	0,08	0,20 ± 0,07	0,15	315,20 ± 64,35	304,80	25,55 ± 0,50	25,66	44,04 ± 8,32	38,27	0,34 ± 0,00	0,34	0,852 ± 0,002	0,854	0,18 ± 0,00	0,18
Superfície Total	CA2	3	3,50 ± 0,03	3,50	0,39 ± 0,14	0,28	0,76 ± 0,09	0,84	70,39 ± 11,00	77,52	5,91 ± 2,60	3,60	15,15 ± 1,12	14,26	10,32 ± 4,81	6,32	0,345 ± 0,005	0,345	0,48 ± 0,08	0,54
Superfície Dissolvido		3	2,04 ± 0,38	1,77	0,25 ± 0,04	0,24	0,35 ± 0,10	0,25	17,92 ± 2,60	19,36	2,74 ± 0,24	2,75	12,71 ± 0,83	12,54	3,65 ± 0,77	3,79	0,325 ± 0,005	0,321	0,35 ± 0,09	0,41
Fundo Total		3	4,01 ± 0,40	3,92	0,32 ± 0,03	0,31	1,20 ± 0,45	0,77	177,10 ± 35,82	201,80	11,18 ± 5,90	9,82	19,90 ± 3,90	16,51	4,87 ± 0,91	4,29	0,311 ± 0,003	0,311	0,54 ± 0,16	0,44
Fundo Dissolvido		3	2,58 ± 1,03	1,65	0,25 ± 0,05	0,30	0,63 ± 0,05	0,66	141,82 ± 25,73	139,30	5,68 ± 2,09	7,25	14,74 ± 2,88	13,05	3,39 ± 0,30	3,60	0,298 ± 0,002	0,299	0,23 ± 0,01	0,23
Superfície Total	CA3	3	4,28 ± 1,24	3,60	0,26 ± 0,02	0,26	1,33 ± 0,31	1,14	216,56 ± 40,09	238,10	46,44 ± 23,79	51,48	21,18 ± 3,95	17,60	4,95 ± 0,84	5,77	0,283 ± 0,003	0,282	0,56 ± 0,09	0,52
Superfície Dissolvido		3	2,01 ± 0,67	1,44	0,17 ± 0,01	0,18	1,27 ± 0,29	1,08	144,80 ± 8,51	152,30	0,89 ± 0,14	0,74	15,85 ± 0,81	15,42	1,91 ± 0,16	1,95	0,267 ± 0,006	0,267	0,39 ± 0,01	0,40
Fundo Total		3	4,76 ± 1,20	4,33	0,46 ± 0,08	0,39	3,53 ± 1,02	2,77	134,93 ± 36,24	116,40	0,74 ± 0,15	0,66	17,49 ± 0,98	16,61	3,90 ± 0,89	3,43	0,245 ± 0,003	0,242	0,70 ± 0,01	0,71
Fundo Dissolvido		3	2,65 ± 0,58	2,44	0,31 ± 0,00	0,32	1,99 ± 0,39	2,21	40,98 ± 1,04	40,89	0,67 ± 0,13	0,56	15,51 ± 0,16	15,55	3,01 ± 0,45	2,56	0,228 ± 0,001	0,229	0,61 ± 0,02	0,61
Superfície Total	CA4	3	8,01 ± 1,24	7,85	0,08 ± 0,00	0,08	2,01 ± 0,77	2,57	2131,66 ± 363,95	1810,00	57,05 ± 21,62	35,49	33,91 ± 2,61	32,53	0,40 ± 0,01	0,40	0,932 ± 0,001	0,931	0,28 ± 0,01	0,28
Superfície Dissolvido		3	4,40 ± 1,63	2,99	0,07 ± 0,00	0,07	0,60 ± 0,28	0,78	366,26 ± 33,52	355,40	32,88 ± 1,44	33,24	29,33 ± 2,39	29,04	0,36 ± 0,00	0,36	0,925 ± 0,000	0,923	0,21 ± 0,00	0,21
Fundo Total		3	10,84 ± 3,58	9,33	0,08 ± 0,00	0,08	0,99 ± 0,39	1,03	630,17 ± 189,01	756,20	39,45 ± 6,15	45,11	30,02 ± 0,89	30,76	0,37 ± 0,01	0,38	0,933 ± 0,001	0,932	0,49 ± 0,04	0,47
Fundo Dissolvido		3	5,57 ± 0,06	5,62	0,06 ± 0,00	0,07	0,12 ± 0,05	0,17	375,77 ± 111,83	285,60	25,87 ± 1,66	25,31	25,73 ± 0,05	25,77	0,35 ± 0,00	0,36	0,645 ± 0,142	0,522	0,18 ± 0,00	0,18
Superfície Total	CA5	3	10,76 ± 3,38	9,19	0,17 ± 0,02	0,18	3,73 ± 1,17	3,07	362,03 ± 30,48	339,20	3,91 ± 2,59	1,65	5,59 ± 3,97	1,76	0,12 ± 0,06	0,07	0,106 ± 0,001	0,106	0,28 ± 0,06	0,23
Superfície Dissolvido		3	6,12 ± 0,79	5,44	0,15 ± 0,02	0,17	2,29 ± 0,63	1,99	322,20 ± 117,01	309,50	1,00 ± 0,02	0,99	2,42 ± 1,17	1,26	0,10 ± 0,06	0,05	0,097 ± 0,001	0,098	0,15 ± 0,00	0,15

Amostra de água	Ponto	N	Cr (µg/L)		Cd (µg/L)		Cu (µg/L)		Fe (µg/L)		Mn (µg/L)		Zn (µg/L)		Pb (µg/L)		Hg (µg/L)		As (µg/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Fundo Total		3	6,70 ± 0,21	6,63	0,19 ± 0,02	0,17	4,38 ± 1,06	3,90	384,06 ± 33,38	365,90	2,23 ± 0,74	2,06	9,04 ± 3,09	7,33	0,16 ± 0,05	0,13	0,112 ± 0,000	0,112	1,33 ± 0,07	1,32
Fundo Dissolvido		3	5,54 ± 0,29	5,44	0,16 ± 0,00	0,17	3,49 ± 0,88	2,71	324,16 ± 32,47	299,00	0,89 ± 0,02	0,88	7,28 ± 2,10	7,21	0,10 ± 0,06	0,06	0,108 ± 0,000	0,110	0,58 ± 0,00	0,57
Superfície Total	FRD1	3	7,84 ± 2,50	5,92	0,18 ± 0,00	0,18	5,98 ± 0,81	5,42	395,43 ± 66,49	433,70	2,44 ± 0,99	1,56	1,34 ± 0,46	1,28	0,22 ± 0,06	0,18	0,095 ± 0,000	0,094	1,03 ± 0,17	1,16
Superfície Dissolvido		3	3,71 ± 0,26	3,45	0,18 ± 0,01	0,18	4,20 ± 1,68	2,69	283,23 ± 20,16	270,70	1,24 ± 0,02	1,23	0,90 ± 0,17	1,08	0,16 ± 0,07	0,11	0,090 ± 0,003	0,093	0,35 ± 0,21	0,18
Fundo Total		3	5,84 ± 0,37	5,62	0,18 ± 0,00	0,19	4,60 ± 0,99	5,33	578,36 ± 153,78	614,70	1,94 ± 1,14	0,98	2,47 ± 1,11	1,57	0,12 ± 0,01	0,10	0,096 ± 0,000	0,097	0,22 ± 0,04	0,18
Fundo Dissolvido		3	5,19 ± 0,46	5,47	0,18 ± 0,00	0,19	2,49 ± 0,73	1,89	305,20 ± 21,33	295,60	0,76 ± 0,09	0,86	1,26 ± 0,20	1,06	0,02 ± 0,01	0,03	0,089 ± 0,002	0,091	0,17 ± 0,02	0,15
Superfície Total		3	4,09 ± 0,88	4,10	0,17 ± 0,00	0,17	1,59 ± 0,29	1,74	362,63 ± 53,72	362,40	1,30 ± 0,39	0,95	16,08 ± 7,87	17,92	0,04 ± 0,03	0,01	0,595 ± 0,005	0,595	0,13 ± 0,01	0,14
Superfície Dissolvido	FRD3	3	1,81 ± 0,18	1,99	0,11 ± 0,03	0,08	1,31 ± 0,17	1,36	329,76 ± 40,40	356,30	0,92 ± 0,10	0,85	4,32 ± 1,66	5,72	0,03 ± 0,02	0,01	0,576 ± 0,012	0,582	0,12 ± 0,00	0,11
Fundo Total		3	14,31 ± 5,04	18,84	0,08 ± 0,00	0,09	3,06 ± 0,77	3,75	3440,67 ± 675,51	3198,00	1,87 ± 0,27	1,64	54,58 ± 4,25	50,46	0,37 ± 0,00	0,37	0,654 ± 0,004	0,654	0,23 ± 0,03	0,25
Fundo Dissolvido		3	3,65 ± 0,75	2,91	0,07 ± 0,00	0,08	2,15 ± 0,39	2,16	1877,00 ± 186,54	1811,00	1,50 ± 0,03	1,49	36,60 ± 10,13	27,34	0,33 ± 0,03	0,35	0,639 ± 0,008	0,642	0,18 ± 0,03	0,17
Superfície Total		3	18,01 ± 3,78	20,11	0,08 ± 0,01	0,09	0,45 ± 0,16	0,38	842,76 ± 342,82	550,90	49,55 ± 6,28	45,75	37,94 ± 5,21	35,74	0,37 ± 0,00	0,37	0,933 ± 0,000	0,933	0,42 ± 0,21	0,25
Superfície Dissolvido	FRD6	3	9,52 ± 0,06	9,46	0,06 ± 0,01	0,07	0,22 ± 0,04	0,23	553,46 ± 167,95	449,80	44,24 ± 2,28	44,23	33,51 ± 4,48	29,44	0,35 ± 0,00	0,35	0,930 ± 0,000	0,931	0,28 ± 0,14	0,14
Fundo Total		3	25,17 ± 11,61	16,51	0,08 ± 0,00	0,08	0,85 ± 0,31	0,90	7551,33 ± 1281,26	7318,00	58,04 ± 18,16	40,85	39,48 ± 4,42	36,21	0,37 ± 0,00	0,37	0,930 ± 0,000	0,929	0,30 ± 0,09	0,35
Fundo Dissolvido		3	8,13 ± 3,36	5,10	0,07 ± 0,00	0,07	0,10 ± 0,05	0,11	524,73 ± 1005,4	559,60	45,16 ± 9,22	36,25	31,94 ± 1,65	32,84	0,35 ± 0,00	0,36	0,927 ± 0,000	0,928	0,21 ± 0,06	0,25
Superfície Total		3	15,44 ± 8,57	7,95	0,007 ± 0,004	0,004	3,75 ± 2,26	1,70	591,60 ± 29,38	567,20	3,99 ± 0,99	3,51	17,96 ± 1,18	17,94	1,11 ± 0,01	1,11	0,113 ± 0,000	0,112	0,32 ± 0,15	0,29
Superfície Dissolvido	FRD8	3	6,24 ± 1,35	6,22	0,004 ± 0,003	0,003	1,45 ± 0,19	1,45	270,33 ± 42,45	257,90	2,61 ± 0,80	1,96	16,04 ± 1,74	14,33	1,03 ± 0,02	1,02	0,110 ± 0,000	0,110	0,25 ± 0,13	0,19
Fundo Total		3	4,89 ± 0,36	4,84	0,01 ± 0,00	0,01	1,37 ± 0,35	1,13	287,36 ± 5,62	291,70	2,79 ± 1,71	1,84	26,32 ± 6,01	22,20	1,08 ± 0,04	1,07	0,109 ± 0,000	0,109	0,85 ± 0,13	0,71
Fundo Dissolvido		3	4,29 ± 0,41	4,66	0,007 ± 0,003	0,01	1,27 ± 0,29	1,09	256,13 ± 14,23	245,60	1,46 ± 0,69	1,45	19,19 ± 1,47	20,04	1,03 ± 0,06	0,99	0,106 ± 0,000	0,106	0,34 ± 0,10	0,40

Amostra de água	Ponto	N	Cr (µg/L)		Cd (µg/L)		Cu (µg/L)		Fe (µg/L)		Mn (µg/L)		Zn (µg/L)		Pb (µg/L)		Hg (µg/L)		As (µg/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Superfície Total	FRD9	3	8,69 ± 0,30	8,76	0,18 ± 0,00	0,18	2,31 ± 1,01	1,39	342,70 ± 4,79	343,10	0,80 ± 0,08	0,88	3,35 ± 1,25	3,91	0,16 ± 0,04	0,12	0,083 ± 0,002	0,083	0,31 ± 0,06	0,37
Superfície Dissolvido		3	6,56 ± 0,78	6,32	0,16 ± 0,01	0,15	1,06 ± 0,02	1,05	306,16 ± 12,01	296,90	0,57 ± 0,00	0,56	2,64 ± 0,88	3,42	0,13 ± 0,03	0,11	0,076 ± 0,006	0,081	0,20 ± 0,05	0,14
Fundo Total		3	6,34 ± 0,14	6,23	0,17 ± 0,00	0,18	2,74 ± 0,90	2,69	377,36 ± 29,51	371,90	0,74 ± 0,18	0,59	3,93 ± 0,98	4,81	0,13 ± 0,00	0,02	0,078 ± 0,002	0,081	0,19 ± 0,00	0,19
Fundo Dissolvido		3	5,49 ± 0,12	5,47	0,15 ± 0,01	0,17	1,24 ± 0,16	1,19	304,30 ± 2,96	306,70	0,69 ± 0,13	0,56	2,23 ± 0,22	2,22	0,05 ± 0,03	0,02	0,057 ± 0,007	0,055	0,14 ± 0,01	0,14
Superfície Total	FRD10	3	7,55 ± 1,11	7,70	0,08 ± 0,00	0,08	1,06 ± 0,18	1,15	366,27 ± 43,22	355,60	36,81 ± 7,06	30,70	31,66 ± 3,13	31,06	0,35 ± 0,02	0,35	0,466 ± 0,003	0,467	0,26 ± 0,05	0,24
Superfície Dissolvido		3	6,09 ± 0,49	5,77	0,06 ± 0,00	0,06	0,70 ± 0,14	0,56	339,03 ± 25,64	350,20	23,04 ± 1,44	23,39	27,64 ± 1,14	28,36	0,31 ± 0,00	0,30	0,447 ± 0,000	0,446	0,23 ± 0,006	0,16
Fundo Total		3	8,13 ± 2,10	8,53	0,08 ± 0,00	0,07	1,72 ± 0,56	1,39	485,43 ± 104,40	434,40	146,60 ± 3,74	149,30	26,01 ± 3,65	29,36	0,38 ± 0,01	0,37	0,430 ± 0,002	0,429	0,48 ± 0,07	0,41
Fundo Dissolvido		3	3,10 ± 0,11	2,99	0,05 ± 0,00	0,05	1,10 ± 0,12	1,20	130,18 ± 22,15	130,30	79,34 ± 37,11	111,40	14,26 ± 1,84	15,23	0,31 ± 0,04	0,29	0,417 ± 0,006	0,421	0,22 ± 0,03	0,24
Superfície Total	DEG1	3	7,36 ± 1,54	5,84	0,07 ± 0,01	0,09	2,37 ± 1,03	1,44	936,20 ± 256,92	793,70	3,01 ± 2,73	0,39	38,35 ± 3,44	37,75	0,37 ± 0,00	0,37	0,781 ± 0,002	0,782	0,41 ± 0,15	0,55
Superfície Dissolvido		3	4,63 ± 0,65	4,66	0,07 ± 0,01	0,08	0,94 ± 0,03	0,96	564,60 ± 11,80	556,20	0,37 ± 0,17	0,31	32,27 ± 1,93	30,44	0,35 ± 0,00	0,35	0,662 ± 0,018	0,653	0,28 ± 0,11	0,26
Fundo Total		3	10,92 ± 0,95	10,16	0,08 ± 0,00	0,08	1,19 ± 0,04	1,20	889,20 ± 43,33	903,30	17,38 ± 0,69	17,63	40,03 ± 0,11	39,96	0,41 ± 0,04	0,38	0,691 ± 0,111	0,802	0,12 ± 0,01	0,13
Fundo Dissolvido		3	5,75 ± 0,42	5,44	0,07 ± 0,00	0,07	0,92 ± 0,02	0,94	861,13 ± 31,28	890,60	6,11 ± 5,85	0,29	25,72 ± 0,41	25,76	0,38 ± 0,03	0,37	0,674 ± 0,105	0,775	0,10 ± 0,00	0,11
Superfície Total	DEG2	3	4,08 ± 0,27	4,28	0,07 ± 0,00	0,07	1,63 ± 0,31	1,54	111,36 ± 10,17	116,70	167,60 ± 66,74	187,30	18,20 ± 3,59	19,06	0,32 ± 0,06	0,38	0,403 ± 0,002	0,402	0,46 ± 0,14	0,56
Superfície Dissolvido		3	3,25 ± 0,39	3,24	0,05 ± 0,00	0,06	1,01 ± 0,06	1,02	83,66 ± 5,75	78,50	65,98 ± 30,84	66,80	16,08 ± 2,94	17,74	0,24 ± 0,03	0,26	0,392 ± 0,002	0,393	0,25 ± 0,06	0,28
Fundo Total		3	4,23 ± 0,82	3,43	0,35 ± 0,01	0,34	1,30 ± 0,45	1,32	101,30 ± 22,86	119,20	25,05 ± 10,97	35,80	20,66 ± 3,69	19,82	5,06 ± 0,81	5,52	0,268 ± 0,102	0,365	0,25 ± 0,03	0,26
Fundo Dissolvido		3	3,03 ± 0,52	2,55	0,26 ± 0,03	0,29	0,71 ± 0,27	0,48	64,91 ± 25,29	50,60	2,35 ± 0,25	2,16	12,03 ± 0,41	12,43	3,91 ± 0,66	3,40	0,257 ± 0,102	0,358	0,20 ± 0,01	0,21
Superfície Total	BN1	3	5,04 ± 1,31	5,18	0,18 ± 0,00	0,18	3,19 ± 1,06	2,39	294,03 ± 17,88	310,50	2,20 ± 0,75	1,60	6,71 ± 1,06	6,39	0,05 ± 0,00	0,05	0,472 ± 0,007	0,471	0,25 ± 0,07	0,26
Superfície Dissolvido		3	4,42 ± 1,31	4,26	0,17 ± 0,00	0,17	1,56 ± 0,02	1,55	282,57 ± 18,69	298,50	0,94 ± 0,04	0,98	4,83 ± 0,20	4,66	0,03 ± 0,01	0,03	0,360 ± 0,086	0,441	0,14 ± 0,01	0,12

Amostra de água	Ponto	N	Cr (µg/L)		Cd (µg/L)		Cu (µg/L)		Fe (µg/L)		Mn (µg/L)		Zn (µg/L)		Pb (µg/L)		Hg (µg/L)		As (µg/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Fundo Total	BN2	3	2,16 ± 0,12	2,25	0,17 ± 0,00	0,17	1,67 ± 0,37	1,56	324,56 ± 43,79	317,30	1,01 ± 0,57	0,45	12,65 ± 5,22	7,56	0,06 ± 0,02	0,08	0,433 ± 0,101	0,529	0,23 ± 0,04	0,27
Fundo Dissolvido		3	1,89 ± 0,16	1,99	0,16 ± 0,00	0,16	1,36 ± 0,18	1,42	268,00 ± 16,72	255,60	0,46 ± 0,07	0,41	9,30 ± 3,64	6,01	0,03 ± 0,01	0,02	0,414 ± 0,102	0,512	0,14 ± 0,00	0,13
Superfície Total	BN2	3	5,05 ± 0,40	4,88	0,19 ± 0,01	0,19	1,88 ± 0,25	1,71	302,40 ± 3,20	303,20	4,80 ± 3,81	1,23	4,01 ± 0,45	3,65	2,13 ± 2,03	0,12	0,093 ± 0,000	0,094	0,94 ± 0,26	0,67
Superfície Dissolvido		3	4,11 ± 0,93	4,23	0,16 ± 0,00	0,17	1,24 ± 0,16	1,09	269,56 ± 10,66	270,60	1,99 ± 0,21	1,11	2,74 ± 0,14	2,87	1,79 ± 1,70	0,11	0,089 ± 0,000	0,089	0,48 ± 0,10	0,55
Fundo Total		3	4,68 ± 0,37	4,35	0,18 ± 0,00	0,18	1,29 ± 0,33	1,01	287,70 ± 4,65	285,60	1,13 ± 0,37	0,83	4,77 ± 1,22	5,74	0,30 ± 0,13	0,30	0,085 ± 0,002	0,084	0,33 ± 0,07	0,27
Fundo Dissolvido		3	4,27 ± 0,04	4,23	0,14 ± 0,01	0,15	0,91 ± 0,07	0,85	280,43 ± 1,76	280,20	1,74 ± 0,08	0,67	4,03 ± 1,02	4,31	0,13 ± 0,05	0,15	0,079 ± 0,004	0,074	0,22 ± 0,00	0,22
Superfície Total	ITA1	3	5,88 ± 0,35	6,09	0,20 ± 0,00	0,19	3,24 ± 0,61	3,07	397,80 ± 58,81	419,30	13,79 ± 6,36	10,81	2,95 ± 0,47	2,83	0,11 ± 0,02	0,12	0,101 ± 0,000	0,101	0,30 ± 0,13	0,22
Superfície Dissolvido		3	5,22 ± 0,12	5,22	0,18 ± 0,00	0,18	2,36 ± 0,12	2,42	292,13 ± 13,59	294,90	4,71 ± 2,48	2,70	1,78 ± 0,10	1,76	0,07 ± 0,01	0,08	0,098 ± 0,000	0,098	0,14 ± 0,02	0,12
Fundo Total		3	7,72 ± 1,13	6,73	0,19 ± 0,00	0,18	3,84 ± 0,93	3,76	442,70 ± 65,20	507,00	2,26 ± 0,65	2,12	7,49 ± 2,67	4,98	0,53 ± 0,46	0,08	0,097 ± 0,000	0,097	0,28 ± 0,01	0,28
Fundo Dissolvido		3	5,13 ± 0,15	5,23	0,17 ± 0,00	0,17	1,88 ± 0,26	1,80	309,70 ± 3,36	306,90	1,27 ± 0,21	1,11	4,30 ± 0,13	4,22	0,04 ± 0,01	0,03	0,095 ± 0,001	0,095	0,13 ± 0,01	0,13
Superfície Total	ITA2	3	9,21 ± 3,46	9,70	0,08 ± 0,01	0,09	0,56 ± 0,14	0,56	698,63 ± 30,59	704,40	3,63 ± 2,96	0,68	46,57 ± 3,96	50,38	0,37 ± 0,00	0,36	0,705 ± 0,002	0,707	0,42 ± 0,18	0,40
Superfície Dissolvido		3	3,07 ± 1,53	1,63	0,06 ± 0,01	0,07	0,11 ± 0,01	0,11	539,73 ± 38,71	503,90	2,33 ± 1,72	0,61	39,59 ± 3,39	36,75	0,32 ± 0,03	0,35	0,666 ± 0,008	0,658	0,15 ± 0,003	0,18
Fundo Total		3	5,29 ± 1,32	4,96	0,08 ± 0,00	0,08	0,05 ± 0,01	0,05	515,80 ± 47,59	558,20	1,55 ± 0,26	1,54	43,35 ± 3,38	45,81	0,37 ± 0,00	0,37	0,639 ± 0,115	0,753	0,19 ± 0,02	0,21
Fundo Dissolvido		3	3,32 ± 0,17	3,22	0,06 ± 0,01	0,07	0,02 ± 0,00	0,02	452,53 ± 22,63	459,80	1,16 ± 0,08	1,21	32,50 ± 5,06	27,77	0,36 ± 0,00	0,36	0,535 ± 0,094	0,624	0,14 ± 0,00	0,14
Superfície Total	ABR01	3	5,30 ± 0,82	5,01	0,18 ± 0,00	0,18	3,20 ± 1,37	2,02	399,16 ± 56,49	394,00	0,78 ± 0,24	0,62	8,94 ± 0,16	8,88	0,02 ± 0,01	0,02	0,333 ± 0,034	0,307	0,27 ± 0,05	0,23
Superfície Dissolvido		3	3,87 ± 0,17	3,74	0,15 ± 0,01	0,15	1,37 ± 0,09	1,34	336,90 ± 48,29	311,50	0,50 ± 0,04	0,49	3,33 ± 0,43	3,45	0,01 ± 0,00	0,01	0,298 ± 0,034	0,284	0,17 ± 0,00	0,17
Fundo Total		3	6,86 ± 0,29	6,61	0,13 ± 0,04	0,17	1,34 ± 0,25	1,15	387,60 ± 66,84	403,50	1,89 ± 0,47	1,83	3,95 ± 0,35	4,28	0,04 ± 0,01	0,05	0,394 ± 0,008	0,395	0,21 ± 0,00	0,21
Fundo Dissolvido		3	4,35 ± 0,36	4,33	0,12 ± 0,04	0,16	1,03 ± 0,01	1,02	254,80 ± 3,71	251,60	1,35 ± 0,33	1,22	2,65 ± 0,17	2,64	0,02 ± 0,00	0,02	0,334 ± 0,001	0,334	0,17 ± 0,00	0,17
Superfície Total	ABR02	3	9,39 ± 3,95	5,46	0,09 ± 0,00	0,09	0,24 ± 0,19	0,07	485,90 ± 60,33	441,09	9,94 ± 0,05	0,97	46,34 ± 1,34	46,54	0,39 ± 0,00	0,39	0,779 ± 0,109	0,888	0,17 ± 0,04	0,12

Amostra de água	Ponto	N	Cr (µg/L)		Cd (µg/L)		Cu (µg/L)		Fe (µg/L)		Mn (µg/L)		Zn (µg/L)		Pb (µg/L)		Hg (µg/L)		As (µg/L)	
			Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana
Superfície Dissolvido	ABR04	3	4,62 ± 1,35	4,22	0,08 ± 0,00	0,09	0,10 ± 0,08	0,04	357,33 ± 53,37	391,30	0,55 ± 0,21	0,58	28,68 ± 3,28	27,52	0,33 ± 0,03	0,34	0,747 ± 0,103	0,845	0,09 ± 0,00	0,09
Fundo Total		3	5,91 ± 1,44	6,49	0,25 ± 0,16	0,10	0,44 ± 0,02	0,42	362,40 ± 48,29	357,70	11,12 ± 10,50	0,84	45,77 ± 3,46	44,62	0,36 ± 0,00	0,37	0,897 ± 0,000	0,896	0,42 ± 0,03	0,43
Fundo Dissolvido		3	3,96 ± 1,57	2,45	0,07 ± 0,00	0,07	0,16 ± 0,01	0,16	319,43 ± 42,78	300,40	9,89 ± 9,59	0,31	38,36 ± 4,52	42,19	0,34 ± 0,01	0,34	0,883 ± 0,000	0,884	0,29 ± 0,02	0,30
Superfície Total		3	10,29 ± 2,60	10,4	0,09 ± 0,00	0,09	2,21 ± 0,98	1,51	501,23 ± 148,65	508,50	38,13 ± 2,11	37,38	54,12 ± 14,36	49,02	0,37 ± 0,00	0,37	0,914 ± 0,000	0,914	0,26 ± 0,06	0,24
Superfície Dissolvido	ABR04	3	7,69 ± 2,89	7,58	0,08 ± 0,00	0,08	0,94 ± 0,20	1,09	412,60 ± 86,85	498,60	22,61 ± 0,80	22,35	36,49 ± 8,04	28,63	0,35 ± 0,00	0,35	0,904 ± 0,001	0,904	0,19 ± 0,01	0,18
Fundo Total		3	13,19 ± 3,42	10,9	0,08 ± 0,00	0,09	0,42 ± 0,08	0,35	611,33 ± 96,82	698,50	55,76 ± 8,80	56,45	29,47 ± 1,10	29,72	0,38 ± 0,01	0,38	0,945 ± 0,007	0,945	0,81 ± 0,06	0,76
Fundo Dissolvido		3	5,49 ± 0,13	5,63	0,07 ± 0,00	0,07	0,37 ± 0,08	0,29	517,20 ± 53,23	550,80	38,53 ± 6,10	35,73	24,62 ± 0,25	24,75	0,35 ± 0,00	0,35	0,923 ± 0,009	0,932	0,53 ± 0,16	0,52
Superfície Total		ABRC 1	3	7,00 ± 0,65	7,17	0,02 ± 0,01	0,01	2,05 ± 0,42	1,91	386,13 ± 6,95	383,10	19,21 ± 8,61	23,64	33,68 ± 3,26	35,00	0,93 ± 0,25	1,08	0,104 ± 0,000	0,104	0,24 ± 0,22
Superfície Dissolvido	3		4,12 ± 0,20	4,10	0,01 ± 0,01	0,00	1,07 ± 0,18	0,99	271,26 ± 43,82	252,50	8,95 ± 3,82	10,95	21,31 ± 0,88	20,86	0,82 ± 0,20	1,00	0,102 ± 0,001	0,101	0,01 ± 0,00	0,02
Fundo Total	3		4,11 ± 0,38	4,48	0,03 ± 0,00	0,03	1,37 ± 0,21	1,37	310,30 ± 19,20	300,00	19,74 ± 4,69	22,14	29,39 ± 7,26	25,44	1,09 ± 0,05	1,04	0,099 ± 0,000	0,099	0,37 ± 0,07	0,44
Fundo Dissolvido	3		2,05 ± 0,10	2,10	0,01 ± 0,00	0,01	0,92 ± 0,07	0,86	240,16 ± 14,00	246,10	15,36 ± 5,46	10,23	21,28 ± 1,65	20,18	1,03 ± 0,04	0,99	0,093 ± 0,000	0,950	0,17 ± 0,01	0,18
<b>Valor permitido CONAMA 357/2005</b>			<b>50,00</b> Cr Total	<b>5,00</b> Cd Total	<b>5,00</b> Cu dissolvido	<b>300,00</b> Fe dissolvido	<b>100,00</b> Mn Total	<b>90,00</b> Zn Total	<b>10,00</b> Pb Total	<b>0,2</b> Hg Total	<b>10,00</b> As Total									

Fonte: Autoria própria.

O cobre (Cu) dissolvido estava em desconformidade com o CONAMA 357/2005 (5 µg/L) em algumas estações amostrais (GUA2, VIX2). A média geral do Cu dissolvido (superfície e fundo) foi de 1,59 µg/L e os valores em todas as estações amostrais variaram de 0,02 a 9,08 µg/L. Entretanto não se observou um padrão espacial definido.

Considerando todas as estações amostrais, a média geral de ferro (Fe) dissolvido na água (superfície e fundo) foi de 370,38 µg/L, valor superior ao permitido pelo CONAMA 357/2005 (300 µg/L), e também 2X maior que a média geral obtida em expedição realizada 60 dias após a chegada da lama no mar (~150 µg/L). Ainda, de acordo com relatórios anteriores, essas concentrações são 2X maiores do que a encontrada na região antes da chegada da lama no mar (20/11/15) (Bianchini, 2019). As concentrações de Fe dissolvido variaram de 30,05 a 3535,00 µg/L, sendo que os maiores valores foram encontrados em estações amostrais localizadas na região da Foz do Rio Doce, seguida pela região de Degredo. Vale ressaltar que, em estações amostrais localizadas dentro das unidades de conservação Revis de Santa Cruz (CA1) e APA Costa das Algas (CA4), bem como na área ou proximidade do Resex de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e APA Ponta da Baleia/Abrolhos (ABR04), também foram encontrados níveis de Fe acima do permitido pela legislação CONAMA 357/2005. No caso do Mn, a concentração média total (superfície e fundo) foi de 21,52 µg/L variando entre 0,16 e 272,10 µg/L. Foram encontrados valores acima da CONAMA 357/2005 (100 µg/L) nas estações amostrais FRD10 (ao sul da Foz do Rio Doce e ± 5 Km da Reserva Indígena de Comboios) e DEG2, sendo que estes valores são 9X acima do valor encontrado em expedição realizada 60 dias após a chegada da lama no mar (~14 µg/L).

Observamos ainda que o Hg mostrou concentração elevada em diversas estações amostrais (CA1, CA2, CA3, CA4, FRD3, FRD6, FRD10, DEG1, DEG2, ITA2, BN1, ABR01, ABR02, ABR04). Relatórios anteriores, identificaram que a concentração deste metal aumentou 60 dias após a chegada da lama (~0,2 µg/L) e aumentou novamente após 660 dias, atingindo valores acima de 0,3 µg/L. Neste relatório, a média geral encontrada para Hg total em todos os pontos foi de 0,39 µg/L sendo que seus valores variaram de 0,06 a 0,95 µg/L.

Estes resultados mostram que a concentração de Cu e Hg na água, parecem continuar aumentando após o evento relacionado a chegada da lama. Além disso, as concentrações dos metais associados à atividade de mineração, como o Fe e o Mn, encontraram-se ainda elevadas, em algumas estações amostrais, mesmo após considerável tempo da ocorrência do evento.

Um padrão espacial marcado com maiores níveis nas regiões próximas a Foz do Rio doce (ex: FRD6 [ao norte da Foz do Rio Doce]) foi observado para o cromo, outro metal associado a atividade de mineração, apesar do mesmo ter apresentado níveis abaixo do permitido pela legislação.

A concentração de metais no sedimento das 25 estações amostradas na Campanha Marinha 1 foi confrontada, quando possível, com a legislação vigente CONAMA 454/2012 (Tabela 16). Neste caso, nenhum metal apresentou valores em desconformidade com a legislação. Não obstante, observamos

um padrão espacial com concentrações crescentes de alguns metais no sedimento em pontos próximos a Foz do Rio Doce.

#### 3.2.2.2 Principais resultados:

Cromo, com médias acima de 5 mg/kg peso seco nas estações amostrais FRD1, FRD3, FRD6, FRD9, DEG1, DEG2, BN1, ITA1, ITA2. Cobre, com médias acima de 0,20 mg/kg peso seco nas estações amostrais CA4, FRD1, FRD3, FRD6, FRD9, DEG2. Ferro, com médias acima de 10 mg/kg peso seco nas estações amostrais CA1, CA4, FRD1, FRD6, ABRC1. Manganês, com médias acima de 10 mg/kg peso seco nas estações amostrais CA4, FRD1, FRD3, FRD6, FRD9, DEG1, ITA1, ABR01, ABRC1.

A concentração de metais no sedimento indica que o Fe apresentou um padrão espacial com maiores concentrações no sedimento coletado em regiões próximas a Foz do Rio Doce (FRD1 e FRD6 [em frente e ao norte da Foz do Rio Doce, respectivamente]). Além disso, destacamos que concentrações relativamente altas também foram observadas na área dentro da unidade de conservação APA Costa das Algas (CA4) e na área próxima à APA Ponta da Baleia/Abrolhos (ABRC1).

Destacamos ainda que, a média máxima de Cr encontrado na estação amostral FRD1 (16,03 µg/g peso seco) é cerca de 10X maior que o encontrado antes da chegada da lama no ambiente marinho (~ 1,45 µg/g peso seco).

Tabela 16: Concentração (mg/kg peso seco) dos metais analisados no sedimento nas 25 estações amostradas na Campanha Marinha 1. Para cada metal, os valores estão apresentados como média  $\pm$  erro padrão e a mediana. Médias elevadas para cada metal foram destacadas.

Ponto	N	Metais (mg / kg peso seco)																		
		Cr		Cd		Cu		Fe		Mn		Zn		Pb		Hg		As		
		Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	
Amostra sedimento	GUA1	4	0,22 $\pm$ 0,04	0,23	0,005 $\pm$ 0,001	0,005	0,06 $\pm$ 0,02	0,06	7,44 $\pm$ 0,69	7,53	4,10 $\pm$ 1,05	3,19	0,09 $\pm$ 0,03	0,06	0,03 $\pm$ 0,01	0,03	0,0018 $\pm$ 0,0002	0,0017	0,008 $\pm$ 0,00	0,008
	GUA2	4	0,19 $\pm$ 0,07	0,18	0,003 $\pm$ 0,000	0,003	0,06 $\pm$ 0,02	0,05	5,22 $\pm$ 1,17	4,92	3,12 $\pm$ 0,93	3,24	0,04 $\pm$ 0,01	0,03	0,02 $\pm$ 0,00	0,02	0,0013 $\pm$ 0,0000	0,0013	0,003 $\pm$ 0,001	0,003
	VIX1	4	0,16 $\pm$ 0,05	0,15	0,0009 $\pm$ 0,0003	0,0006	0,14 $\pm$ 0,05	0,14	7,14 $\pm$ 2,11	5,66	5,08 $\pm$ 1,53	4,42	1,10 $\pm$ 0,28	0,91	0,08 $\pm$ 0,02	0,07	0,0004 $\pm$ 0,0001	0,0002	0,009 $\pm$ 0,002	0,010
	VIX2	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	CA1	4	0,22 $\pm$ 0,08	0,18	0,007 $\pm$ 0,001	0,007	0,15 $\pm$ 0,02	0,14	10,36 $\pm$ 0,81	9,92	5,12 $\pm$ 1,47	5,49	1,32 $\pm$ 0,33	1,37	0,04 $\pm$ 0,01	0,04	0,0033 $\pm$ 0,0003	0,0033	0,07 $\pm$ 0,02	0,08
	CA2	4	0,11 $\pm$ 0,03	0,11	0,001 $\pm$ 0,000	0,001	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	4,66 $\pm$ 0,88	4,76	0,93 $\pm$ 0,14	0,79	1,13 $\pm$ 0,21	1,19	0,008 $\pm$ 0,002	0,009	0,0013 $\pm$ 0,0002	0,0011	0,0010 $\pm$ 0,0006	0,0005
	CA3	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	CA4	4	1,03 $\pm$ 0,56	0,63	0,004 $\pm$ 0,001	0,003	<b>0,34 <math>\pm</math> 0,19</b>	0,18	<b>24,94 <math>\pm</math> 3,03</b>	26,1 1	<b>22,96 <math>\pm</math> 2,36</b>	24,59	3,16 $\pm$ 0,26	3,10	0,10 $\pm$ 0,02	0,09	0,0093 $\pm$ 0,0014	0,0085	0,005 $\pm$ 0,002	0,003
	CA5	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
	FRD1	4	<b>16,03 <math>\pm</math> 2,96</b>	16,5 7	0,002 $\pm$ 0,001	0,002	<b>0,38 <math>\pm</math> 0,13</b>	0,37	<b>11,43 <math>\pm</math> 2,72</b>	10,3 1	<b>16,49 <math>\pm</math> 2,97</b>	16,93	2,59 $\pm$ 0,78	2,11	0,15 $\pm$ 0,03	0,17	0,0007 $\pm$ 0,0001	0,0009	0,02 $\pm$ 0,00	0,02
	FRD3	4	11,10 $\pm$ 1,83	11,9 8	0,003 $\pm$ 0,001	0,002	0,25 $\pm$ 0,05	0,23	5,46 $\pm$ 0,55	5,06	10,71 $\pm$ 1,70	11,06	2,65 $\pm$ 0,41	2,82	0,05 $\pm$ 0,01	0,04	0,0007 $\pm$ 0,0000	0,0007	0,02 $\pm$ 0,00	0,02
	FRD6	4	13,58 $\pm$ 0,25	13,6 3	0,002 $\pm$ 0,001	0,002	<b>0,39 <math>\pm</math> 0,16</b>	0,31	<b>11,07 <math>\pm</math> 2,39</b>	10,4 4	<b>14,63 <math>\pm</math> 5,29</b>	10,98	4,63 $\pm$ 2,37	2,53	0,12 $\pm$ 0,02	0,12	0,0012 $\pm$ 0,0001	0,0012	0,03 $\pm$ 0,00	0,03
	FRD8	4	3,96 $\pm$ 0,74	3,84	0,002 $\pm$ 0,001	0,001	0,06 $\pm$ 0,01	0,07	7,28 $\pm$ 2,36	5,96	4,61 $\pm$ 1,34	4,69	1,77 $\pm$ 0,42	1,77	0,05 $\pm$ 0,01	0,04	0,0003 $\pm$ 0,0000	0,0003	0,006 $\pm$ 0,001	0,006
	FRD9	4	10,87 $\pm$ 2,42	9,00	0,003 $\pm$ 0,001	0,003	0,19 $\pm$ 0,03	0,19	8,07 $\pm$ 1,89	7,19	11,89 $\pm$ 2,74	10,63	3,54 $\pm$ 0,88	3,22	0,06 $\pm$ 0,02	0,06	0,0008 $\pm$ 0,0000	0,0008	0,02 $\pm$ 0,00	0,02
	FRD10	0	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*	*
DEG1	4	8,89 $\pm$ 2,31	7,30	0,004 $\pm$ 0,002	0,003	0,12 $\pm$ 0,03	0,10	3,85 $\pm$ 0,78	3,80	10,43 $\pm$ 2,58	9,90	2,58 $\pm$ 0,25	2,56	0,05 $\pm$ 0,01	0,05	0,0006 $\pm$ 0,0000	0,0006	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	
DEG2	4	6,37 $\pm$ 0,84	5,80	0,002 $\pm$ 0,001	0,003	0,21 $\pm$ 0,09	0,15	4,06 $\pm$ 1,29	4,09	8,17 $\pm$ 2,21	6,80	2,25 $\pm$ 1,09	1,31	0,05 $\pm$ 0,01	0,06	0,0008 $\pm$ 0,0001	0,0008	0,01 $\pm$ 0,01	0,01	

Ponto		N	Metais (mg / kg peso seco)																	
			Cr		Cd		Cu		Fe		Mn		Zn		Pb		Hg		As	
			Média (± erro padrão)	Mediana																
Amostra sedimento	BN1	4	7,65 ± 2,33	7,00	0,002 ± 0,000	0,002	0,08 ± 0,01	0,08	1,35 ± 0,28	1,10	8,31 ± 2,17	7,58	1,74 ± 0,93	0,97	0,03 ± 0,01	0,04	0,0004 ± 0,0000	0,0004	0,0008 ± 0,0004	0,0004
	BN2	4	4,64 ± 0,79	3,98	0,002 ± 0,000	0,002	0,07 ± 0,01	0,07	0,60 ± 0,24	0,51	6,99 ± 1,70	6,58	0,88 ± 0,32	0,67	0,01 ± 0,00	0,01	0,0003 ± 0,0000	0,0003	0,0013 ± 0,0006	0,0007
	ITA1	4	11,42 ± 3,11	10,27	0,005 ± 0,001	0,005	0,13 ± 0,01	0,12	1,36 ± 0,09	1,39	13,15 ± 4,56	10,62	3,96 ± 2,00	2,58	0,07 ± 0,01	0,07	0,0010 ± 0,0000	0,0010	0,004 ± 0,001	0,004
	ITA2	4	7,46 ± 1,72	7,30	0,003 ± 0,000	0,003	0,06 ± 0,02	0,07	0,70 ± 0,31	0,64	7,97 ± 2,06	8,02	0,57 ± 0,05	0,57	0,02 ± 0,01	0,01	0,0004 ± 0,0000	0,0004	0,005 ± 0,003	0,003
	ABR0 1	4	0,13 ± 0,07	0,08	0,0001 ± 0,0000	0,0001	0,13 ± 0,01	0,13	1,79 ± 0,12	1,78	12,05 ± 2,42	11,53	1,31 ± 0,19	1,42	0,03 ± 0,01	0,03	0,0008 ± 0,0000	0,0008	0,02 ± 0,01	0,02
	ABR0 2	4	0,06 ± 0,02	0,05	0,0003 ± 0,0001	0,0002	0,07 ± 0,01	0,06	0,92 ± 0,21	0,95	4,18 ± 1,47	3,67	0,81 ± 0,17	0,93	0,009 ± 0,003	0,009	0,0003 ± 0,0000	0,0003	0,004 ± 0,000	0,004
	ABR0 4	4	0,08 ± 0,02	0,07	0,0001 ± 0,0000	0,0001	0,06 ± 0,01	0,06	1,22 ± 0,37	1,08	6,44 ± 1,79	6,32	0,89 ± 0,26	0,86	0,005 ± 0,001	0,004	0,0003 ± 0,0000	0,0003	0,01 ± 0,00	0,01
	ABRC 1	4	3,05 ± 0,51	3,20	0,006 ± 0,003	0,004	0,08 ± 0,02	0,09	11,49 ± 0,55	11,21	42,50 ± 11,48	34,05	3,86 ± 0,88	3,89	0,03 ± 0,01	0,02	0,0006 ± 0,0002	0,0005	0,03 ± 0,01	0,03
Valor permitido CONAMA 454/2012	Nível 1		81		1,2		34		–		–		150		46,7		0,3		19	
	Nível 2		370		7,2		270		–		–		410		218		1,0		70	

Fonte: Autoria própria.

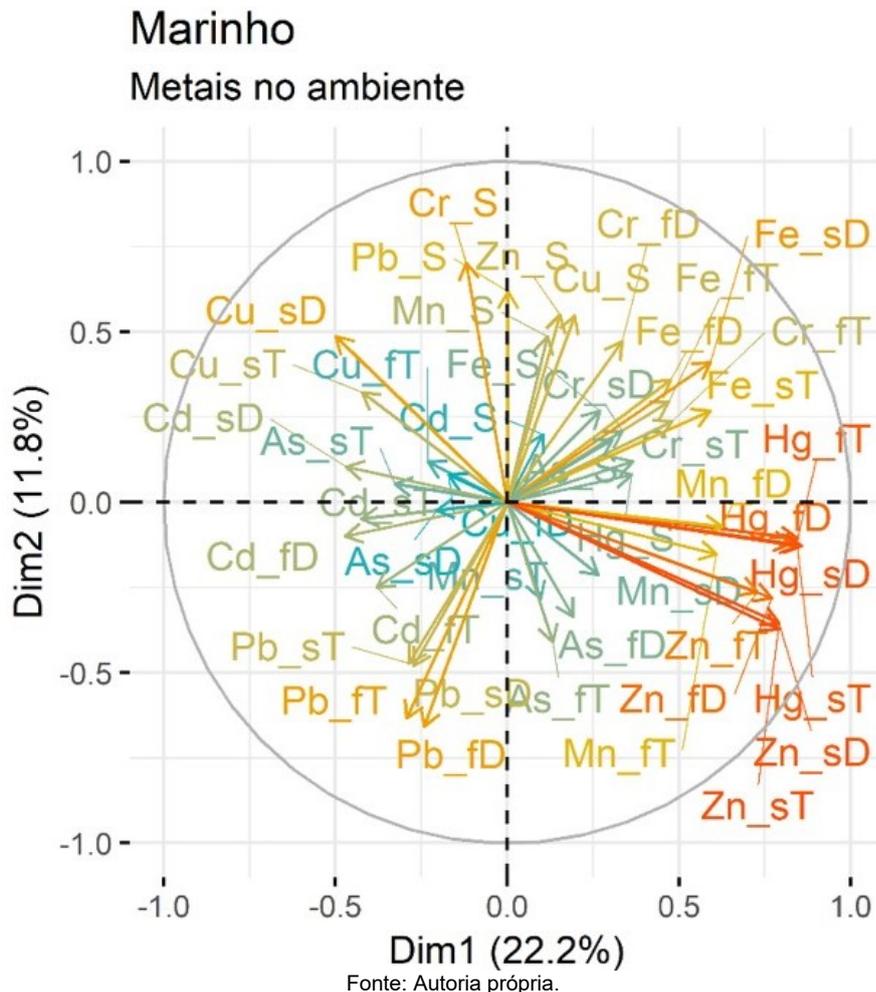
\*Estações amostrais onde não foi possível coletar sedimento.

### 3.2.3 Análise Integrada

Uma análise multivariada foi feita para integrar dados de concentração dos nove metais (Cu, Zn, Fe, Cr, Mn, Cd, Pb, Hg e As) em matrizes abióticas (água e sedimento) (Figura 26). A PCA evidenciou a congruência entre os valores de metais na água de fundo e de superfície, nas duas frações (total e dissolvido) analisadas. Estes resultados indicam que, no caso do ambiente marinho, é possível utilizar apenas um desses compartimentos (superficial ou fundo, total ou dissolvida) como variável preditora confiável do nível ambiental de contaminação por metais na água.

O primeiro eixo da Análise de Componentes Principais (PCA), responsável por 22,2% da variância total, evidencia a separação entre os metais mais associados à chegada da lama no ambiente marinho (Cr, Fe, Mn), entre outros, e os metais Cu, Cd e Pb. Este resultado sugere que os metais Cu, Cd e Pb, apresentam seus picos em estações amostrais diferentes dos demais e sugere que são oriundos de fontes diferentes dos metais agrupados no eixo leste do primeiro componente.

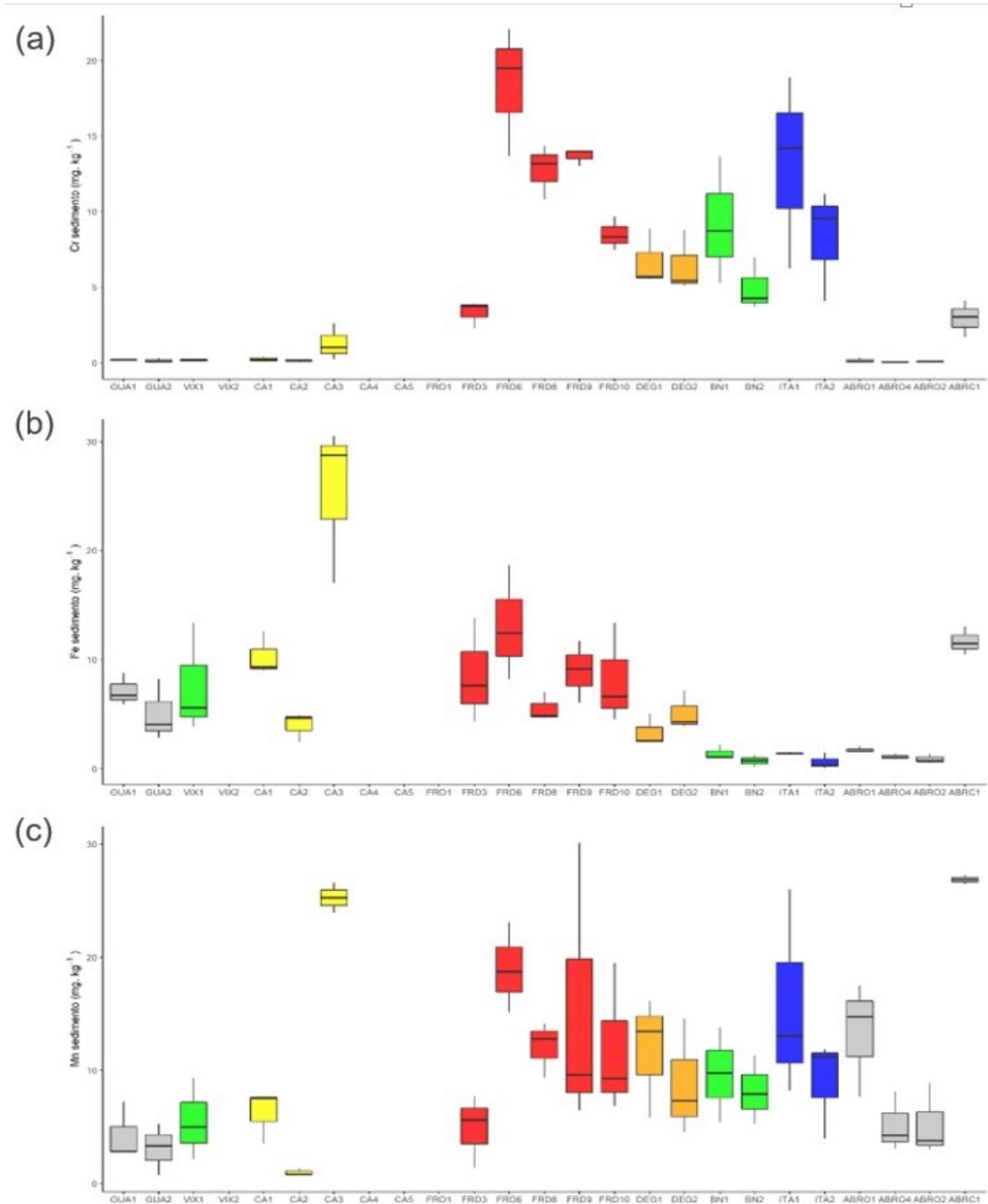
Figura 26: Análise de Componentes Principais aplicadas para os dados de concentração de metais na água e no sedimento. O código sT e sD indicam determinações de metais realizadas em água superficial nas frações total e dissolvida, respectivamente. O código fT e fD indicam determinações realizadas em água de fundo nas frações total e dissolvida, respectivamente. O código S indica determinações de metais realizadas nas amostras de sedimento.



Considerando a matriz sedimento, a maioria dos metais se agrupou no setor negativo do segundo componente principal, e uma alta correlação foi observada entre Cr, Fe, Mn, Pb, Zn e Cu. Isso indica que o sedimento integra diferentes metais com uma maior consistência espaço-temporal, provavelmente por refletir menos variações temporais de curto prazo, associadas ao hidrodinamismo e condições oceanográficas.

Considerando os metais com maior correlação com os dois componentes principais (Cr, Mn, Pb, Fe, Cd e Zn), indicado pelo gradiente de cores quentes no gráfico, e os metais que apresentaram concentrações elevadas nas estações amostrais próximas a Foz do Rio Doce que destacados anteriormente, destaca-se o Cr, Fe e o Mn. Ao se avaliar os níveis de Cr, Fe e Mn no sedimento, observa-se também padrão espacial marcado por um maior nível de contaminação nas estações amostrais localizadas próximas a Foz do Rio Doce (área FRD) (Figura 27).

Figura 27: Concentração (a) de Cromo (Cr), (b) Ferro (Fe) e (d) Manganês (Mn) no sedimento (mg/kg peso seco) por estação amostral, considerando médias e erro padrão. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte.



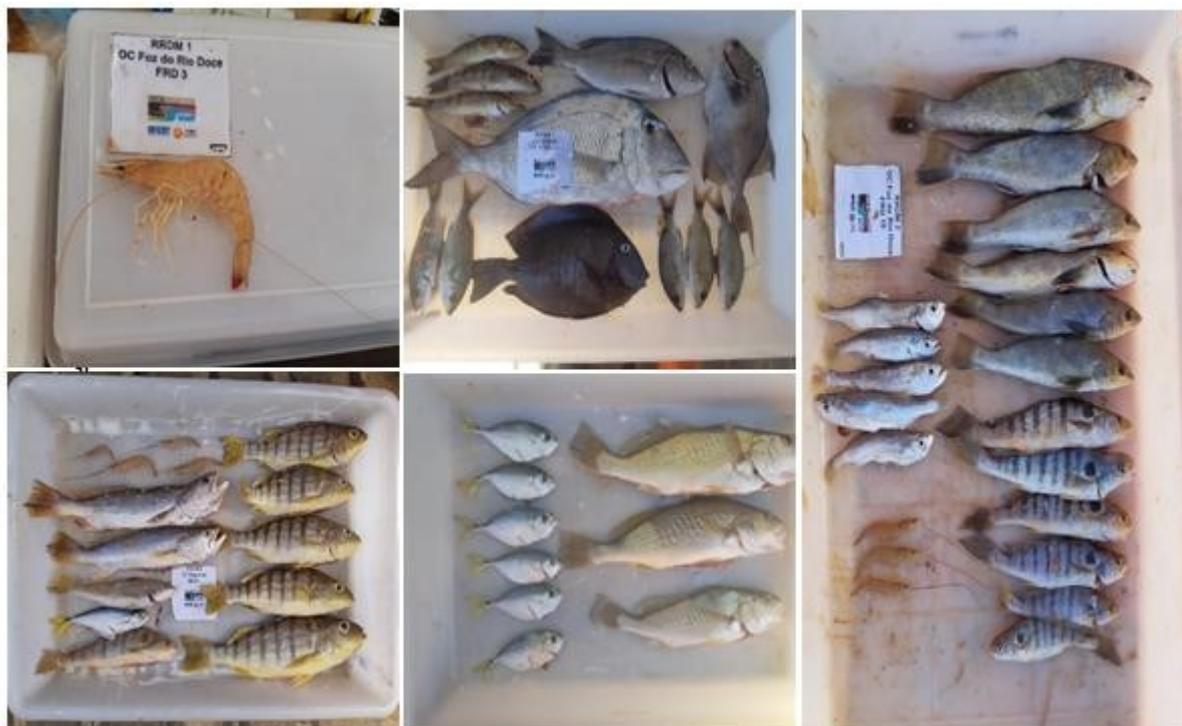
Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4 Concentração de metais na biota

Na Campanha Marinha 1 e 2 foram amostrados, sempre que possível, espécies representativas de diferentes níveis tróficos, podendo dividi-los em três subgrupos principais: (1) *pools* de fitoplâncton e zooplâncton (n = 5 arrastos por ponto de coleta, com duração ~15 min; coleta com redes de fito e zooplâncton); (2) hidrocorais e corais (n = 6 fragmentos por ponto de coleta; coleta manual por mergulho autônomo); (3) coleta de 2 espécies de camarão (Camarão 7 Barbas [*Xiphopenaeus kroyeri*] e Camarão rosa [*Farfantapeneus* spp.]) discriminando os principais tecidos para análise, brânquia, hepatopâncreas e músculo; (4) coleta de diferentes espécies de peixes, retirando os principais tecidos, brânquia, fígado e músculo, para as análises.

A Figura 28 reúne imagens representativas dos principais organismos coletados durante a Campanha Marinha 1 e 2 (set/out de 2018 e jan/fev de 2019, respectivamente). Os dados individuais das análises químicas e de biomarcadores na biota podem ser acessados na “Planilha de Dados Brutos”. Em alguns pontos amostrais na Campanha Marinha não foram coletados peixes/ camarões no número previsto (n=6) ou não foram encontrados na estação amostral estabelecida. Poliquetos e Moluscos não foram coletados nas Campanhas Marinhas 1 e 2 pois não foram encontrados e já não haviam sido encontrados nas expedições anteriores ao PMBA.

Figura 28: Fotos das espécies coletadas durante a Campanha Marinha 1 e 2 do Anexo 1 em diferentes estações amostrais.



Fonte: Autoria própria.

#### 3.2.4.1 Fitoplâncton e Zooplâncton

O compartimento referido neste relatório como “fitoplâncton” engloba uma comunidade diversa de organismos pertencentes ao fito e protozooplâncton marinho, com tamanhos entre 63 e 200  $\mu\text{m}$ . O compartimento referido como “zooplâncton” engloba a comunidade planctônica com tamanhos maiores que 200  $\mu\text{m}$ . Ambos compartimentos foram coletados com o objetivo de avaliar efeitos na base da cadeia trófica.

A Tabela 17 e Tabela 18 sumarizam os resultados de concentração de metais (Cromo [Cr], Cádmiio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]) mensurados no fitoplâncton e no zooplâncton coletados nas 25 estações amostrais durante a Campanha Marinha 1.

Tabela 17: Concentração de diferentes metais ( $\mu\text{g/g}$  de peso úmido) em amostras (Pool) de Fitoplâncton coletados nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana para cada metal analisado (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]).

Ponto	Metais ( $\mu\text{g/g}$ peso úmido)																										
	Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As		
	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Média	EP	Median a	Médi a	EP	Median a	Média	EP	Median a	Média	EP	Median a	Médi a	EP	Media na	Média	EP	Median a
GUA1	0,75	0,16	0,60	0,05	0,01	0,06	0,79	0,18	0,66	6,93	0,69	6,97	6,42	0,42	6,58	38,54	3,66	36,25	0,292	0,079	0,209	0,005	0,001	0,005	0,528	0,155	0,619
GUA2	0,33	0,04	0,32	0,05	0,01	0,06	0,73	0,10	0,74	4,34	0,63	4,54	1,57	0,49	1,13	30,07	2,24	30,27	0,781	0,126	0,804	0,004	0,001	0,003	0,165	0,026	0,184
VIX1	0,17	0,04	0,15	0,03	0,00	0,03	0,19	0,03	0,16	5,08	0,96	4,35	0,37	0,08	0,39	12,62	2,03	12,01	0,022	0,007	0,016	0,002	0,000	0,002	0,035	0,009	0,034
VIX2	0,09	0,03	0,07	0,20	0,07	0,18	0,58	0,11	0,64	47,16	8,67	46,19	1,66	0,20	1,84	3,99	0,92	3,45	1,475	0,322	1,524	0,001	0,000	0,001	0,039	0,012	0,035
CA1	0,38	0,12	0,39	0,03	0,01	0,03	1,19	0,27	1,26	38,71	5,20	39,88	0,86	0,20	0,77	5,78	1,33	5,40	0,006	0,002	0,005	0,001	0,000	0,001	0,023	0,009	0,012
CA2	0,41	0,11	0,40	0,04	0,00	0,04	0,61	0,08	0,60	0,50	0,14	0,49	20,32	2,32	21,16	9,02	1,42	7,93	0,323	0,156	0,139	0,009	0,001	0,008	0,559	0,055	0,543
CA3	1,64	0,75	1,07	0,06	0,03	0,04	2,15	0,45	1,73	42,65	14,04	58,66	2,33	0,57	1,65	5,32	1,32	5,32	4,846	0,853	4,512	0,002	0,000	0,002	0,201	0,145	0,027
CA4	0,47	0,18	0,34	0,23	0,10	0,08	0,27	0,09	0,33	53,66	9,24	42,01	0,71	0,26	0,69	13,56	11,61	2,90	0,048	0,013	0,043	0,000	0,000	0,000	0,085	0,057	0,004
CA5	0,74	0,46	0,48	2,46	0,14	2,61	2,67	1,32	1,91	220,69	54,44	208,54	1,66	0,51	1,40	2,73	1,82	1,22	0,160	0,057	0,148	0,005	0,003	0,002	0,616	0,129	0,542
FRD1	1,83	0,78	1,43	0,01	0,01	0,00	1,32	0,51	0,76	90,17	26,58	66,27	1,56	0,71	1,07	12,79	5,92	8,49	0,057	0,017	0,057	0,001	0,000	0,000	0,004	0,002	0,002
FRD3	0,18	0,08	0,18	0,24	0,06	0,24	0,37	0,10	0,37	1,44	0,44	1,44	18,54	4,14	18,54	3,72	0,35	3,72	0,004	0,002	0,004	0,004	0,003	0,004	0,040	0,013	0,040
FRD6	0,43	0,13	0,41	0,60	0,20	0,34	0,47	0,19	0,35	74,29	9,21	67,93	0,86	0,28	0,92	4,84	1,31	5,49	0,011	0,003	0,009	0,001	0,000	0,000	0,050	0,046	0,001
FRD8	0,26	0,23	0,05	0,05	0,02	0,04	0,82	0,31	0,91	14,69	9,29	7,40	9,52	4,63	8,38	7,67	2,71	7,45	0,006	0,003	0,004	0,003	0,001	0,002	0,030	0,012	0,033
FRD9	2,11	0,52	1,75	0,02	0,00	0,02	0,49	0,06	0,44	1,71	1,34	0,35	2,23	0,52	1,91	3,40	0,92	3,88	0,019	0,005	0,024	0,000	0,000	0,000	0,008	0,004	0,004
FRD10	0,66	0,21	0,62	0,00	0,00	0,00	0,77	0,17	0,73	17,53	5,93	22,01	0,56	0,13	0,48	3,00	0,68	2,61	0,046	0,013	0,050	0,000	0,000	0,000	0,002	0,002	0,001
DEG1	0,18	0,07	0,09	0,34	0,10	0,37	8,54	6,14	2,12	0,39	0,10	0,42	1,23	0,32	1,12	2,61	1,18	1,29	0,074	0,024	0,054	0,004	0,001	0,003	0,565	0,472	0,046
DEG2	0,77	0,12	0,72	0,04	0,02	0,02	0,24	0,07	0,16	0,77	0,44	0,34	0,07	0,04	0,03	32,85	5,45	34,09	0,135	0,056	0,095	0,007	0,001	0,008	0,352	0,185	0,095
BN1	0,64	0,24	0,63	0,03	0,01	0,04	0,28	0,02	0,26	2,71	0,40	2,54	1,08	0,38	0,81	30,49	7,70	23,67	0,026	0,009	0,023	0,001	0,000	0,001	0,082	0,028	0,117

Ponto	Metais (µg/g peso úmido)																										
	Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As		
	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana
BN2	0,48	0,10	0,58	3,83	1,00	3,11	0,90	0,24	0,73	19,11	8,66	10,95	15,53	4,46	14,37	104,80	75,46	29,91	0,070	0,045	0,012	0,005	0,002	0,006	0,214	0,047	0,179
ITA1	1,64	1,10	0,58	0,13	0,03	0,12	0,35	0,12	0,26	2,71	0,85	2,08	0,65	0,17	0,51	41,30	13,32	24,23	0,039	0,021	0,029	0,000	0,000	0,000	0,056	0,032	0,010
ITA2	2,17	1,02	1,51	0,32	0,16	0,14	3,56	0,68	3,34	9,26	4,26	4,01	3,68	0,74	3,05	31,50	3,89	36,93	0,445	0,175	0,412	0,003	0,002	0,001	0,139	0,042	0,178
ABR01	0,46	0,28	0,38	0,16	0,10	0,12	0,74	0,47	0,34	1,59	1,01	0,99	4,45	2,98	2,18	3,84	1,47	3,62	0,063	0,056	0,010	0,000	0,000	0,000	0,065	0,042	0,050
ABR02	0,11	0,07	0,07	0,40	0,16	0,30	1,62	0,36	1,43	1,16	0,45	0,81	1,92	0,56	1,59	5,23	2,32	2,02	0,018	0,008	0,008	0,001	0,000	0,001	0,037	0,014	0,043
ABR04	0,16	0,10	0,07	0,03	0,02	0,01	0,27	0,07	0,29	19,34	17,88	2,13	0,94	0,36	0,79	0,87	0,29	0,82	0,030	0,015	0,020	0,002	0,001	0,002	0,028	0,014	0,018
ABRC1	0,35	0,04	0,35	0,02	0,00	0,02	0,03	0,00	0,03	2,83	1,17	2,83	0,76	0,42	0,76	15,40	5,34	15,40	0,082	0,064	0,082	0,000	0,000	0,000	0,061	0,054	0,061

Fonte: Autoria própria.

Tabela 18: Concentração de diferentes metais (µg/g de peso úmido) em amostras (Pool) de Zooplâncton coletados nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana para cada metal analisado (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]).

Ponto	Metais (µg/g peso úmido)																										
	Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As		
	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana	Médi a	EP	Medi ana
	0,25	0,02	0,26	0,03	0,00	0,03	0,50	0,07	0,48	1,59	0,17	1,81	0,83	0,15	0,84	34,45	3,29	36,31	0,082	0,019	0,065	0,001	0,000	0,001	0,079	0,028	0,059
GUA2	0,58	0,08	0,53	0,13	0,01	0,13	0,60	0,04	0,55	4,51	0,57	4,39	3,65	0,49	3,86	41,60	4,68	43,40	1,151	0,138	1,256	0,002	0,000	0,001	0,043	0,007	0,041
VIX1	0,06	0,01	0,06	0,05	0,01	0,05	0,18	0,03	0,17	2,53	0,20	2,34	0,36	0,04	0,32	27,10	3,27	26,40	0,034	0,008	0,035	0,001	0,000	0,000	0,019	0,003	0,018
VIX2	0,75	0,27	0,82	0,17	0,08	0,07	1,29	0,59	0,72	71,89	16,14	74,86	6,43	0,86	6,56	20,39	4,44	21,99	1,165	0,708	0,413	0,002	0,001	0,001	0,140	0,080	0,024
CA1	0,28	0,14	0,08	0,03	0,01	0,03	2,06	0,70	1,72	50,54	7,23	46,22	1,10	0,15	1,08	3,86	1,03	3,19	0,025	0,002	0,025	0,001	0,000	0,001	0,019	0,009	0,012
CA2	0,48	0,16	0,41	0,04	0,01	0,04	0,30	0,08	0,33	0,29	0,10	0,22	14,32	3,73	16,27	13,19	4,82	10,48	0,017	0,006	0,009	0,004	0,001	0,005	0,824	0,234	0,514

Ponto	Metais (µg/g peso úmido)																										
	Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As		
	Mé- di- a	EP	Media na	Mé- di- a	EP	Media na	Mé- di- a	EP	Medi- ana	Mé- di- a	EP	Median- a	Mé- di- a	EP	Media na	Mé- di- a	EP	Median- a	Mé- di- a	EP	Media na	Mé- di- a	EP	Media na	Mé- di- a	EP	Median- a
CA3	2,06	0,56	1,92	0,07	0,01	0,07	3,14	1,70	1,44	34,33	11,41	48,31	5,35	2,80	3,35	13,21	5,58	5,00	0,895	0,578	0,410	0,002	0,001	0,002	0,305	0,200	0,019
CA4	0,78	0,27	0,65	0,31	0,13	0,16	1,26	0,34	1,04	65,17	17,22	68,78	1,47	0,30	1,39	13,27	5,77	6,85	0,843	0,383	0,314	0,000	0,000	0,000	0,059	0,031	0,039
CA5	1,25	0,15	1,24	0,47	0,07	0,41	4,57	2,14	4,49	189,61	31,95	164,61	14,33	8,90	9,80	51,07	23,59	37,45	10,040	8,735	2,308	0,001	0,000	0,001	0,179	0,022	0,197
FRD1	0,45	0,13	0,31	0,04	0,02	0,02	1,19	0,37	1,04	46,38	18,71	41,73	1,65	0,38	1,43	22,37	14,73	2,89	0,023	0,014	0,010	0,001	0,000	0,001	0,010	0,005	0,006
FRD3	0,15	0,07	0,12	0,05	0,03	0,03	0,42	0,11	0,51	24,54	10,02	31,89	4,55	2,57	0,98	1,75	0,45	1,97	0,001	0,000	0,001	0,001	0,001	0,000	0,014	0,006	0,014
FRD6	0,57	0,24	0,61	0,23	0,10	0,15	0,59	0,26	0,69	187,91	43,52	185,77	2,39	0,87	3,00	8,13	3,99	4,75	0,056	0,020	0,028	0,001	0,000	0,000	0,183	0,113	0,005
FRD8	0,19	0,09	0,13	0,04	0,01	0,04	8,71	7,93	1,07	34,85	11,31	41,14	6,05	3,38	0,96	4,51	1,49	3,54	0,003	0,001	0,003	0,001	0,000	0,000	0,019	0,008	0,025
FRD9	2,29	0,17	2,11	0,03	0,01	0,02	1,06	0,22	0,96	0,52	0,16	0,41	1,57	0,50	1,08	2,97	0,41	2,48	0,051	0,006	0,051	0,001	0,000	0,000	0,004	0,000	0,004
FRD10	0,37	0,06	0,35	0,01	0,01	0,01	0,58	0,13	0,51	15,06	6,71	10,61	0,76	0,16	0,65	0,86	0,43	0,32	0,300	0,189	0,073	0,000	0,000	0,000	0,007	0,002	0,007
DEG1	0,05	0,01	0,05	0,00	0,00	0,00	1,44	0,35	1,46	0,60	0,38	0,16	0,54	0,06	0,53	0,80	0,24	0,76	0,033	0,008	0,032	0,004	0,001	0,004	0,021	0,002	0,024
DEG2	0,28	0,04	0,29	0,19	0,14	0,07	1,07	0,67	0,59	15,25	14,56	0,96	2,08	0,66	1,74	30,73	7,38	34,15	0,049	0,024	0,020	0,004	0,001	0,004	0,426	0,163	0,428
BN1	2,92	2,63	0,19	0,02	0,01	0,01	8,26	7,49	0,95	10,89	7,09	4,66	2,78	1,04	2,13	90,84	31,33	58,32	0,305	0,291	0,011	0,016	0,015	0,002	0,169	0,057	0,177
BN2	0,60	0,31	0,44	6,34	3,58	1,71	4,39	1,26	5,58	22,57	9,45	20,17	18,50	7,08	19,51	379,42	216,55	46,67	0,028	0,016	0,004	0,004	0,002	0,006	0,372	0,164	0,388
ITA1	0,37	0,18	0,27	0,32	0,07	0,31	0,46	0,31	0,17	4,33	2,27	2,48	1,90	0,73	1,38	36,69	10,90	22,44	0,054	0,039	0,024	0,000	0,000	0,000	0,089	0,013	0,086
ITA2	1,54	1,23	0,34	0,32	0,14	0,34	2,69	0,99	2,56	6,45	2,83	4,98	3,06	1,65	2,40	34,78	13,25	31,00	0,368	0,128	0,318	0,000	0,000	0,000	0,221	0,162	0,118
ABR01	0,24	0,02	0,24	0,05	0,04	0,02	0,30	0,04	0,29	0,69	0,41	0,80	1,14	0,30	0,99	5,53	1,67	4,20	0,035	0,019	0,045	0,000	0,000	0,000	0,017	0,018	0,003
ABR02	0,03	0,01	0,01	0,17	0,06	0,18	0,46	0,21	0,30	29,87	16,89	19,08	1,00	0,27	0,86	1,14	0,20	1,22	0,027	0,014	0,017	0,001	0,000	0,001	0,036	0,016	0,026
ABR04	0,05	0,03	0,04	0,13	0,06	0,05	0,30	0,06	0,26	0,14	0,05	0,09	0,71	0,20	0,63	0,35	0,08	0,39	0,025	0,012	0,016	0,002	0,001	0,002	0,017	0,007	0,014
ABRC1	0,53	0,02	0,53	0,03	0,01	0,03	0,18	0,13	0,18	2,67	1,06	2,67	0,29	0,06	0,29	14,51	7,16	14,51	0,102	0,017	0,102	0,000	0,000	0,000	0,122	0,010	0,122

Fonte: Autoria própria.

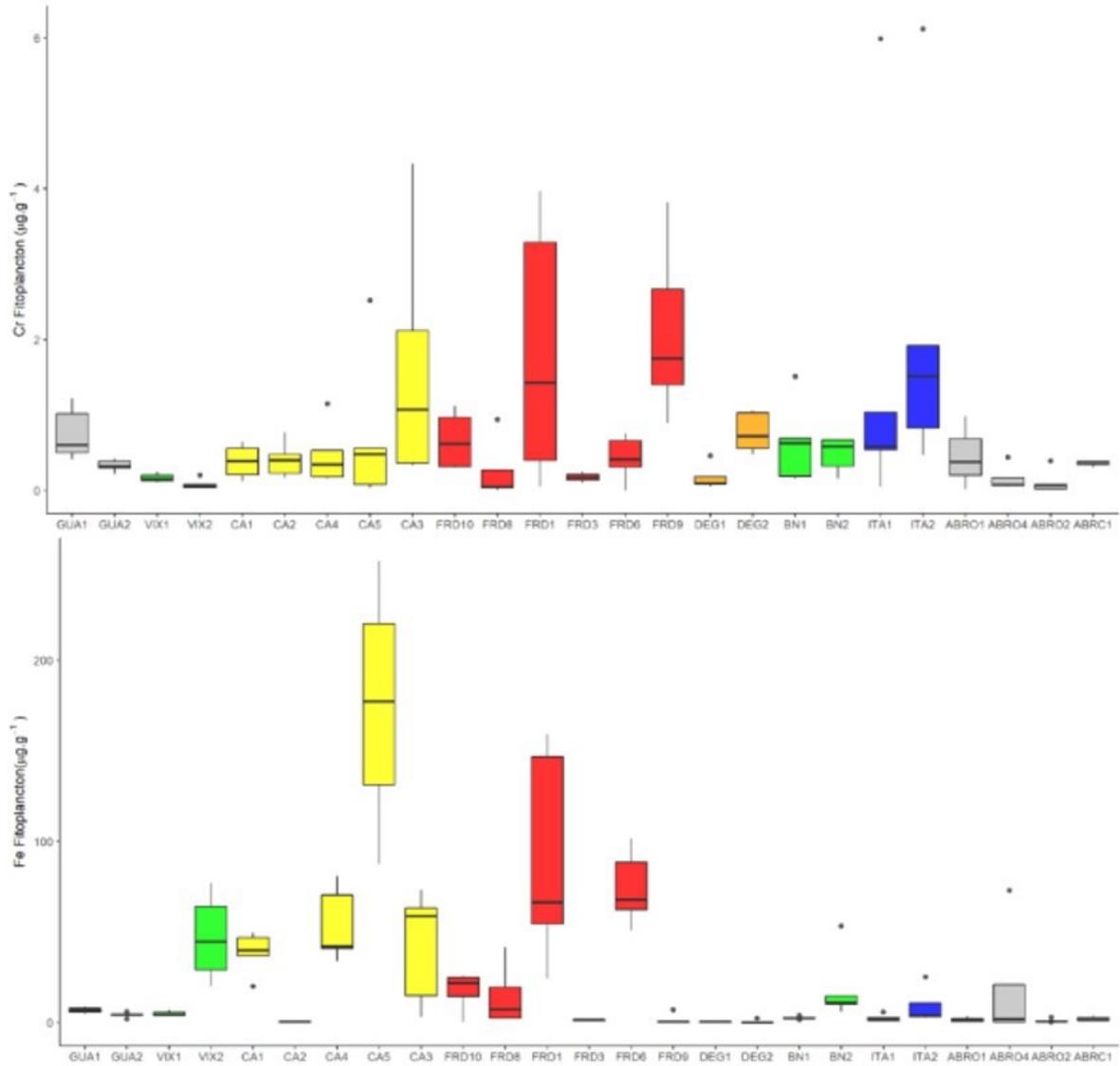
#### 3.2.4.2 Principais Resultados

Nos dois casos observamos que, em geral, as concentrações de todos os metais foram mais altas nas amostras coletadas em estações amostrais mais próximas a Foz do Rio Doce (FRD) e nas Unidades de Conservação de Revis de Santa Cruz e APA Costa das Algas (CA), quando comparadas a regiões mais distantes da Foz como Guarapari e o Parque Nacional Marinho de Abrolhos.

Destaca-se ainda que, foi possível observar marcados padrões espaciais para os metais Fe e Cr tanto em fito (Figura 29) como em zooplâncton (Figura 30). A concentração de Fe foi maior nas estações amostrais CA5 e FRD6, além de FRD1 no caso do fitoplâncton, quando comparado com as demais estações amostrais. No caso do Cr, foram observados níveis elevados na estação FRD9, de forma similar nos dois compartimentos planctônicos, bem como em regiões ao norte da Foz do Rio Doce como Barra Nova e Itaunas.

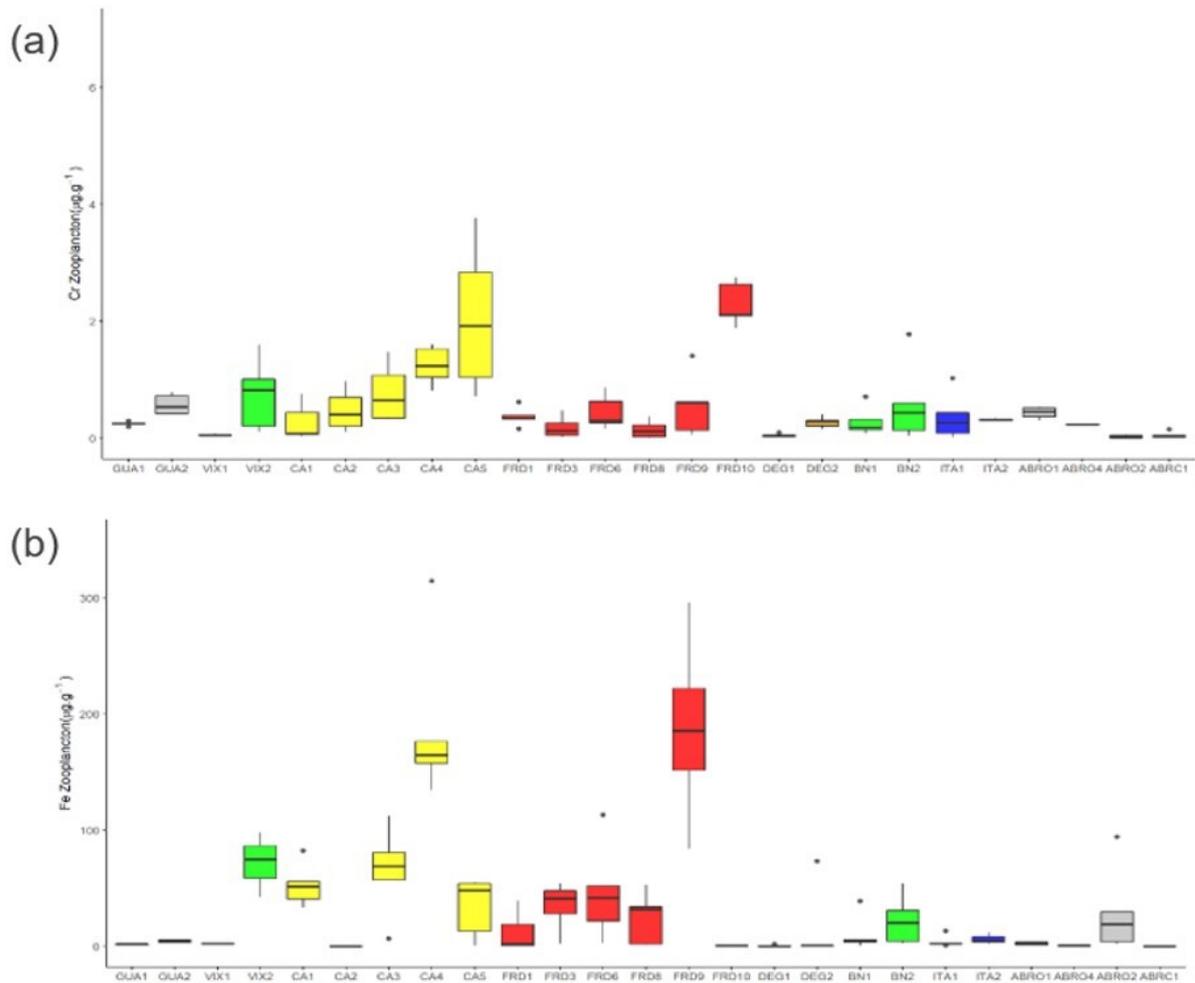
Neste relatório, a concentração média de Fe (considerando todas estações amostrais) no zooplâncton foi de 32,69 µg/g peso úmido, porém a média por estação amostral mostra picos de 189,6 e 187,9 µg/g nas estações CA5 e FRD6, respectivamente. Dados pretéritos mostram que, após cerca de 180 dias da chegada da lama no ambiente marinho, a média geral de Fe foi de 1.100 µg/g de peso úmido para níveis inferiores a 100 µg/g em cerca de 840 dias após esse evento. Neste relatório notamos que, apesar de as médias gerais seguirem diminuindo, estações próximas a Foz do Rio Doce permanecem com níveis relativamente elevados de contaminação por Fe no zooplâncton (quando comparados a estações mais distantes da Foz do Rio Doce).

Figura 29: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$  peso úmido) de (a) Cromo (Cr), (b) Ferro em amostras do compartimento fitoplâncton. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho.



Fonte: Autoria própria.

Figura 30: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$  peso úmido) de (a) Cromo (Cr) e (b) Ferro em amostras do compartimento zooplâncton. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.4.3 Camarões

A Tabela 19 sumariza os resultados de concentração de metais (Cr, Cd, Cu, Fe, Mn, Zn, Pb, Hg e As) mensurados nos camarões (média das 2 espécies amostradas) coletados durante a Campanha Marinha 1. De modo geral, o acúmulo de metais nos tecidos de camarão não seguiu um padrão espacial bem definido na área de estudo, o que pode estar associado à capacidade de mobilidade dos animais estudados. Cabe ressaltar ainda que o acúmulo dos metais avaliados nas espécies de camarão é marcadamente maior no tecido branquial e hepatopâncreas do que no músculo.

Tabela 19: Concentração de metais (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]) mensurados nos camarões (média das 2 espécies amostradas) na brânquia, hepatopâncreas e músculo de camarões marinhos coletados nas estações amostradas durante a Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana.

Ponto	Tecido	Metais (µg/g peso úmido)																											
		Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As			
		Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	
Camarão Marinho	GUA2	Brânquia	0,46	0,08	0,41	0,20	0,02	0,20	9,52	2,25	9,14	31,56	10,50	35,15	1,76	0,47	1,71	57,19	18,37	64,60	0,179	0,057	0,208	0,033	0,011	0,035	0,197	0,024	0,211
		Hepatopâncreas	0,01	NC	0,01	0,03	NC	0,03	2,16	NC	2,16	4,75	NC	4,75	0,39	NC	0,39	53,78	NC	53,78	0,054	NC	0,054	0,002	NC	0,002	0,065	NC	0,065
		Músculo	0,09	0,02	0,07	0,10	0,03	0,08	1,78	0,74	1,17	6,04	1,13	6,05	0,45	0,04	0,43	49,66	12,14	53,60	0,040	0,007	0,038	0,004	0,001	0,003	0,147	0,026	0,143
	VIX1	Brânquia	1,15	0,62	0,73	0,08	0,03	0,07	2,98	0,92	2,52	37,84	9,05	26,23	NC	NC	NC	5,85	1,87	3,43	1,301	0,572	0,677	0,019	0,007	0,016	0,308	0,046	0,307
		Hepatopâncreas	0,28	0,07	0,22	0,02	0,01	0,02	4,11	0,73	4,31	13,17	3,13	11,11	NC	NC	NC	3,00	1,01	1,81	0,639	0,252	0,399	0,004	0,001	0,004	0,165	0,059	0,119
		Músculo	0,34	0,11	0,24	0,06	0,05	0,01	2,13	0,43	1,85	7,56	1,09	8,22	NC	NC	NC	1,70	0,34	1,67	0,382	0,140	0,251	0,004	0,003	0,001	0,507	0,384	0,142
	CA1	Brânquia	0,52	0,26	0,25	0,25	0,10	0,10	32,09	8,20	22,65	93,90	23,09	72,96	2,54	0,85	2,04	36,41	13,29	29,06	0,211	0,110	0,099	0,006	0,001	0,006	0,460	0,180	0,521
		Hepatopâncreas	0,29	0,10	0,31	0,55	0,21	0,37	200,31	61,74	194,50	42,84	9,01	36,79	4,85	1,78	2,68	76,57	13,43	84,53	0,360	0,227	0,140	0,008	0,003	0,006	1,927	0,680	1,527
		Músculo	1,97	0,45	1,93	0,09	0,02	0,07	4,39	0,84	3,72	6,71	1,73	5,62	0,63	0,07	0,68	10,13	0,42	10,48	0,003	0,001	0,002	0,008	0,001	0,007	0,071	0,015	0,058
CA2	Brânquia	8,36	1,50	8,58	0,03	0,01	0,03	44,79	7,66	44,07	16,94	3,89	17,01	3,42	0,71	3,31	12,28	0,88	12,08	0,245	0,129	0,091	0,017	0,004	0,015	11,892	9,455	2,878	
	Hepatopâncreas	3,07	0,48	2,96	6,49	0,94	6,24	133,36	29,61	117,89	31,15	6,06	32,83	3,71	0,48	3,42	55,42	8,43	50,10	0,029	0,012	0,015	0,019	0,012	0,007	3,882	2,392	0,531	
	Músculo	1,79	0,42	1,70	0,04	0,01	0,03	7,22	0,92	7,07	2,85	0,86	2,85	0,57	0,06	0,57	10,52	0,91	10,11	0,048	0,022	0,027	0,005	0,001	0,004	1,966	1,024	0,767	
FRD1	Brânquia	8,21	4,93	3,26	0,26	0,07	0,28	27,39	9,02	25,85	108,70	26,94	124,32	5,53	1,80	5,22	18,68	2,89	22,26	0,161	0,070	0,085	0,006	0,002	0,003	0,051	0,014	0,052	
	Hepatopâncreas	2,56	1,24	1,19	0,31	0,16	0,14	62,16	28,88	51,54	54,10	18,29	40,55	2,99	1,02	2,91	75,89	29,37	35,72	0,112	0,019	0,127	0,007	0,004	0,005	0,031	0,010	0,022	
	Músculo	1,64	0,39	1,48	0,02	0,00	0,02	3,09	0,51	2,75	7,31	1,85	7,17	0,64	0,07	0,61	8,61	0,68	8,44	0,008	0,001	0,007	0,009	0,003	0,008	0,206	0,080	0,169	
FRD3	Brânquia	0,48	0,22	0,35	3,10	0,96	2,86	23,70	6,73	23,68	25,79	7,10	25,86	6,88	1,71	7,76	48,33	18,28	39,52	0,129	0,096	0,032	0,017	0,007	0,013	0,384	0,081	0,414	
	Hepatopâncreas	0,22	0,07	0,17	3,35	0,56	3,39	238,33	102,97	63,78	36,61	5,52	33,35	5,19	0,69	4,95	55,42	22,93	37,11	0,103	0,039	0,064	0,011	0,003	0,010	0,188	0,029	0,173	
	Músculo	0,93	0,24	0,67	0,19	0,02	0,19	5,65	0,98	5,08	10,71	4,65	5,55	1,05	0,25	0,86	12,98	2,41	10,64	0,023	0,003	0,021	0,005	0,001	0,004	0,570	0,145	0,596	

Ponto	Tecido	Metais (µg/g peso úmido)																											
		Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As			
		Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	Média	EP	Mediana	
Camarão Marinho	FRD6	Brânquia	2,26	0,71	1,73	11,29	5,19	5,04	21,84	8,75	7,86	559,63	234,00	450,15	2,18	0,42	1,84	165,71	29,28	170,81	0,181	0,050	0,107	0,009	0,003	0,003	0,098	0,021	0,081
		Hepatopâncreas	1,10	0,51	0,45	4,16	2,51	0,01	34,76	23,26	5,89	713,84	422,37	286,17	1,44	0,33	1,36	98,58	27,11	59,47	0,072	0,033	0,035	0,005	0,001	0,004	0,057	0,011	0,066
		Músculo	2,15	0,24	2,17	0,02	0,00	0,02	4,10	0,37	4,17	4,83	1,13	3,53	0,46	0,06	0,49	9,30	0,56	9,59	0,017	0,003	0,020	0,012	0,002	0,009	0,123	0,026	0,109
	FRD9	Brânquia	22,05	13,47	11,21	NC	NC	NC	46,27	5,63	47,15	29,66	13,40	23,76	5,71	2,57	4,25	14,02	1,75	13,85	0,113	0,066	0,056	0,026	0,010	0,018	5,649	1,672	4,510
		Hepatopâncreas	10,32	4,86	5,72	0,56	0,17	0,43	171,00	27,11	167,02	69,74	42,95	28,53	14,60	8,97	6,42	31,01	7,97	34,46	0,273	0,234	0,040	0,024	0,013	0,011	9,695	2,872	9,155
		Músculo	1,21	0,43	1,25	NC	NC	NC	2,98	0,22	2,92	7,74	2,30	7,77	0,68	0,12	0,63	8,62	0,81	8,69	0,008	0,002	0,007	0,002	0,001	0,001	0,318	0,070	0,353
	FRD10	Brânquia	2,17	1,41	0,73	3,80	1,73	2,02	13,83	4,96	11,69	29,37	9,38	23,55	7,36	2,56	4,90	40,00	26,28	1,20	5,427	4,859	0,311	0,003	0,002	0,001	0,930	0,564	0,710
		Músculo	1,44	0,40	1,60	0,01	0,00	0,01	4,28	0,37	4,10	6,64	2,45	44,28	0,83	0,08	0,88	11,16	0,37	11,16	0,009	0,002	0,006	0,001	0,000	0,001	0,658	0,134	0,709
	DEG1	Brânquia	0,55	0,13	0,55	2,18	0,50	2,27	19,84	6,15	16,04	60,14	15,00	3,68	5,79	1,00	5,23	46,87	17,72	31,01	0,277	0,066	0,269	0,027	0,007	0,024	0,772	0,238	0,722
		Hepatopâncreas	0,29	0,10	0,30	1,47	0,55	1,20	308,91	95,59	452,43	43,68	5,09	44,87	3,14	0,33	3,01	14,40	4,56	15,13	0,412	0,370	0,053	0,013	0,002	0,011	0,379	0,062	0,394
		Músculo	0,12	0,03	0,12	0,69	0,10	0,68	2,77	0,16	2,77	4,33	0,71	4,63	0,81	0,03	0,84	7,15	2,04	5,68	0,147	0,047	0,142	0,004	0,001	0,005	0,154	0,054	0,156
	ITA1	Brânquia	13,79	7,46	3,87	1,87	0,53	2,11	26,56	14,17	16,04	17,60	1,81	19,64	6,13	1,00	5,88	161,02	29,86	247,37	0,087	0,032	0,062	0,003	0,001	0,002	0,182	0,110	0,079
Hepatopâncreas		9,83	5,17	4,28	1,92	0,63	1,30	134,35	47,76	133,40	57,47	19,98	35,37	5,70	1,32	4,76	233,10	62,03	234,49	0,059	0,015	0,056	0,003	0,001	0,003	0,166	0,076	0,098	
Músculo		0,40	0,11	0,27	1,13	0,25	0,84	1,13	0,19	0,97	3,91	0,66	3,61	2,36	0,52	1,65	26,19	7,63	25,91	0,017	0,004	0,017	0,000	0,000	0,000	0,005	0,001	0,004	

Fonte: Autoria própria.

Nas expedições anteriores (Bianchini et al., 2016; Bianchini, 2019), onde foi analisado a concentração de metais no músculo de Camarões observou-se picos de acúmulo da maioria dos metais analisados, logo após a chegada da lama no ambiente marinho com posterior diminuição em escala temporal. O presente relatório descreve que para os metais Cd, Cu, Pb, Hg e As, os valores de concentração no músculo dos camarões manteve os níveis relativamente baixos seguindo o padrão das expedições anteriores realizadas cerca de 800 dias após a chegada da lama no ambiente marinho.

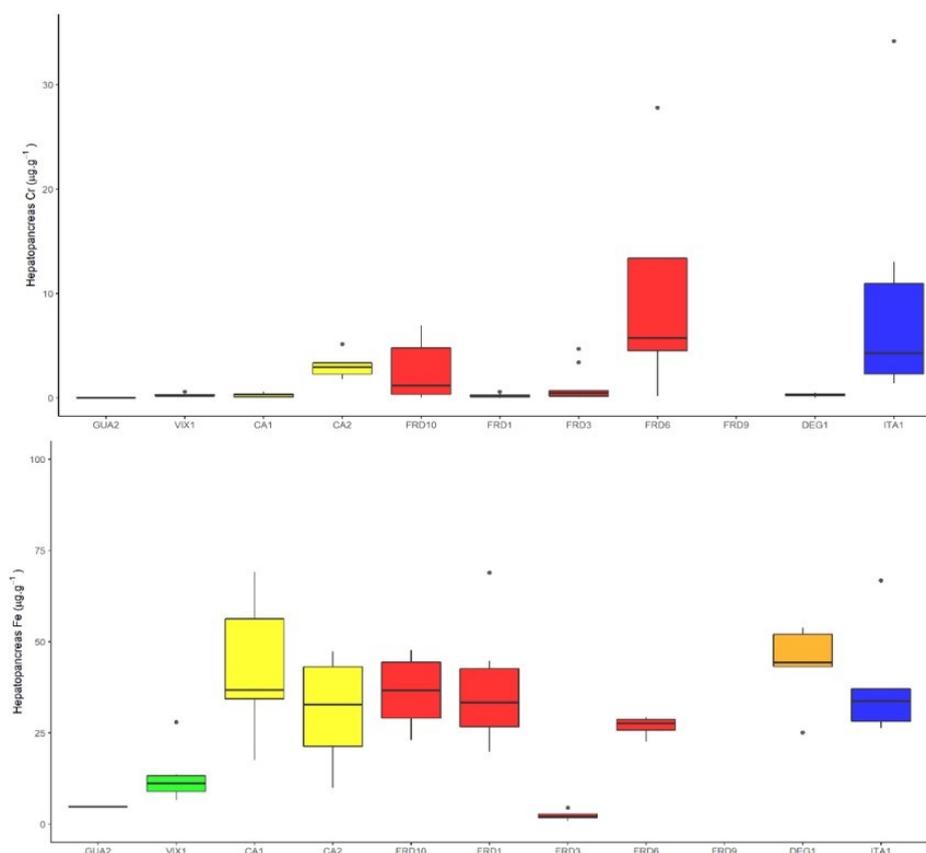
Neste relatório as médias gerais (em todos os pontos amostrados) de Fe foram 6,47 µg/g peso úmido, de Mn 0,84 µg/g peso úmido e de Cr 1,15 µg/g peso úmido. Contudo, quando comparamos esses resultados com as análises feitas cerca de 800 dias após a chegada da lama, notamos um nítido aumento nas concentrações destes metais, Fe (~2,5 µg/g peso úmido), Mn (0,2 µg/g peso úmido) e Cr (0,02 µg/g peso úmido) no músculo dos camarões amostrados.

No Quadro 06 as concentrações mínimas e máximas, conforme apresentado na Tabela 19, de metais nos tecidos dos camarões foram confrontadas com dados descritos na literatura para a concentração dos metais coincidentes em espécies de camarões marinhos coletados no presente relatório. O levantamento bibliográfico evidenciou que as concentrações de alguns metais atingiram valores máximos elevados quando comparados com outros estudos, os quais destaca-se:

- A concentração de Fe no hepatopâncreas;
- A concentração de Mn no hepatopâncreas;
- A concentração de Zn na brânquia e no hepatopâncreas;
- A concentração de As na brânquia e no hepatopâncreas.

Dentre estes metais em concentração elevada, salientamos que o Cr e Fe, que são metais associados à atividade de mineração, foram encontrados em altas concentrações no hepatopâncreas dos camarões na região norte da Foz do Rio Doce (FRD6 e FRD9, respectivamente) (Figura 31).

Figura 31: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$  peso úmido) de (a) Cromo (Cr) e (b) Ferro (Fe) no hepatopâncreas de camarão. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 6: Concentração mínima e máxima dos metais em todas as estações amostrais, de acordo com a Tabela 19, na brânquia, fígado e músculo ( $\mu\text{g/g}$  de peso úmido) de camarões coletados na Campanha Marinha 1 comparados com outros estudos em camarões marinhos compilados a partir da literatura. Os dados da literatura estão expressos em valores ( $\mu\text{g/g}$  de peso úmido) mínimos e máximos encontrados. Valores do presente relatório acima dos encontrados na literatura foram destacados.

Camarão	Tecido	Metais ( $\mu\text{g/g}$ de peso úmido)								
		Cr	Fe	Mn	Cd	Cu	Zn	Pb	Hg	As
		Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx	Mín - Máx
Campanha Marinha 1 Anexo 1	Brânquia	0,46 – 22,05	16,93 – 559,63	1,76 – 7,36	0,03 – 11,29	2,98 – 46,26	5,84 – 165,71	0,08 – 5,42	0,0028 – 0,032	0,05 – 11,89
	Hepatopâncreas	0,01 – 10,31	4,75 – 713,83	0,39 – 14,59	0,02 – 6,49	2,16 – 308,91	2,99 – 233,10	0,02 – 0,63	0,0021 – 0,024	0,03 – 9,69
	Músculo	0,08 – 2,15	2,85 – 10,71	0,44 – 2,36	0,01 – 1,12	1,13 – 7,21	1,69 – 49,66	0,002 – -0,38	0,0003 – 0,011	0,004 – 1,96
Bibliografia	Brânquia	0,57 <sup>a</sup> – 114,5 <sup>b</sup>	14,9 <sup>i</sup> – 572,6 <sup>a</sup>	1,0 <sup>m</sup> – 8,8 <sup>i</sup>	0,2 <sup>i</sup> – 20,3 <sup>b</sup>	114,5 <sup>a</sup> – 190,4 <sup>b</sup>	28,6 <sup>a</sup> – 164,9 <sup>b</sup>	4,29 <sup>a</sup> – 18,7 <sup>i</sup>	0,001 <sup>n</sup> – 0,01 <sup>o</sup>	0,06 <sup>o</sup> – 1,43 <sup>a</sup>
	Hepatopâncreas	4,3 <sup>a</sup> – 130,3 <sup>b</sup>	32,3 <sup>d</sup> – 196,4 <sup>a</sup>	3,73 <sup>j</sup> – 6,2 <sup>i</sup>	1,97 <sup>f</sup> – 19,9 <sup>b</sup>	47 <sup>f</sup> – 348 <sup>d</sup>	36,8 <sup>a</sup> – 169,4 <sup>b</sup>	0,36 <sup>d</sup> – 5,18 <sup>a</sup>	0,02 <sup>o</sup> – 0,03 <sup>o</sup>	0,1 <sup>p</sup> – 1,96 <sup>a</sup>
	Músculo	0,22 <sup>c</sup> – 15,1 <sup>b</sup>	2,1 <sup>e</sup> – 149 <sup>f</sup>	0,38 <sup>c</sup> – 6,8 <sup>h</sup>	0,008 <sup>c</sup> – 4,27 <sup>b</sup>	2,68 <sup>g</sup> – 25,2 <sup>a</sup>	0,6 <sup>e</sup> – 98,7 <sup>f</sup>	0,1 <sup>c</sup> – 2,5 <sup>e</sup>	0,22 <sup>c</sup> – 1,2 <sup>k</sup>	1,25 <sup>a</sup> – 29,25 <sup>c</sup>

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da Campanha Marinha 1 do Anexo 1 apresentados neste quadro foram comparados com os valores Mín e Máx dos seguintes estudos: Lewtas et al., 2014<sup>a</sup>, Firat et al., 2008<sup>b</sup>, Kaya & Turkoglu, 2017<sup>c</sup>, Olgunoglu et al., 2015<sup>d</sup>, Dadar, 2014<sup>e</sup>, W U-X-Y I, 2011<sup>f</sup>, Pinto, 2013<sup>g</sup>, Gao et al., 2016<sup>h</sup>, Silva et al., 2014<sup>i</sup>, Paez Ossuna, 1996<sup>k</sup>, Di Iena et al., 2018<sup>k</sup>, Kargin et al., 2001<sup>l</sup>, Paez-Ossuna & Tron Mayer, 1996<sup>m</sup>, Liu et al., 2019<sup>n</sup>, Darmon e Denton, 1990<sup>o</sup>, Leblanc & Prince, 2012<sup>p</sup>.

#### 3.2.4.4 Peixes

A Tabela 20, sumariza os resultados de concentração de metais (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]) mensurados nos peixes (média de todas as espécies amostradas) coletados durante a Campanha Marinha 1.

Para a concentração de metais nos peixes observamos que todos os metais tiveram concentrações elevadas em estações próximas a Foz do Rio Doce (principalmente FRD8 e FDR9), e/ou Revis de Santa Cruz (CA2), APA Costa das Algas (principalmente CA4) com alguns picos também em Itaúnas (principalmente ITA1). Diferentemente dos camarões, notamos um padrão espacial bem definido de bioacumulação de metais, demonstrados para Cr na Tabela 20, nas regiões da Foz do Rio Doce e Costa das Algas. Podemos observar claramente esse padrão na maioria dos metais analisados, a saber:

Cromo, com maiores concentrações em brânquia e/ou fígado de peixes coletados nas estações amostrais FRD9, ITA1 e CA2. Cádmio, com maiores concentrações em fígado de peixes coletados nas estações amostrais FRD8, DEG2, ITA1, FRD3 e CA4. Cobre, com maiores concentrações em fígado de peixes coletados em quase todas as estações amostrais na região da Foz do Rio Doce (FRD1, FRD3, FRD6, FRD8 e FRD10), exceto no FRD9. Ferro, com maiores concentrações em fígado de peixes coletados nas estações amostrais ITA1, FRD8 e CA4. Manganês, com maiores concentrações em fígado e/ou brânquia de peixes coletados nas estações amostrais FRD8, VIX1 e FRD9. Zinco, com maiores concentrações em brânquia e/ou fígado de peixes coletados nas estações amostrais ITA1, CA4 e CA1. Chumbo, com maiores concentrações em fígado de peixes coletados nas estações amostrais VIX1 e ITA1. Mercúrio, com maiores concentrações em fígado e/ou brânquia de peixes coletados nas estações amostrais ITA1, CA2 e FRD8. Arsênio, com maiores concentrações em fígado e/ou brânquia de peixes coletados nas estações amostrais CA2, FRD9 e ITA1.

Em expedições pretéritas realizadas em colaboração com ICMBio, os resultados indicavam uma diminuição da concentração de metais no músculo dos peixes marinhos. Dentre estes metais, destacamos que a média geral de Fe (~2 µg/g peso úmido), Mn (0,2 µg/g peso úmido), Cr (0,02 µg/g peso úmido) e Cu (0,1 µg/g peso úmido) diminuiu em escala temporal com níveis mais baixos encontrados cerca de 800 dias após a chegada da lama no ambiente marinho.

Porém, nesta Campanha Marinha 1 os resultados indicam um nítido aumento de Cr (média geral de 1,56 µg/g peso úmido), Mn (média geral de 1,34 µg/g peso úmido), Fe (média geral de 4,01 µg/g peso úmido) e Cu (média geral de 0,67 µg/g peso úmido) no músculo de peixes marinhos.

Tabela 20: Concentração de metais (Cromo [Cr], Cádmio [Cd], Cobre [Cu], Ferro [Fe], Manganês [Mn], Zinco [Zn], Chumbo [Pb], Mercúrio [Hg] e Arsênio [As]) mensurados nos peixes marinhos (média de todas as espécies amostradas) na brânquia, fígado e músculo coletados nas estações amostradas durante a Campanha Marinha 1. Os resultados foram expressos em média, erro padrão (EP) e mediana. Valores médios elevados foram destacados em negrito.

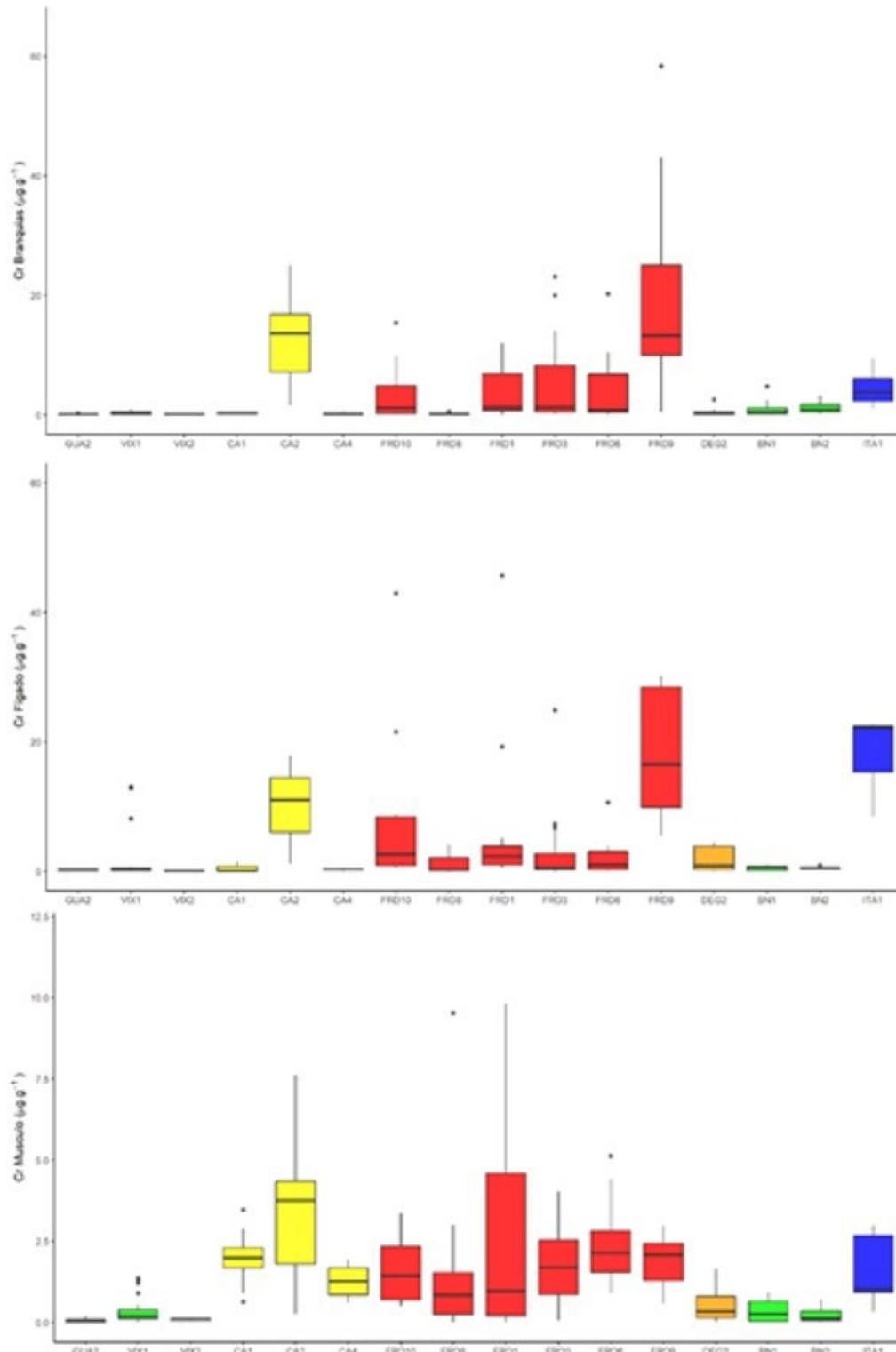
Ponto	Tecido	Metais (µg/g peso úmido)																											
		Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As			
		Mé di a	EP	Med ia na	Mé di a	EP	Med ia na	Mé di a	EP	Med ia na	Mé di a	EP	Med ia na	Mé di a	EP	Med ia na	Mé di a	EP	Med ia na	Mé di a	EP	Med ia na	Mé di a	EP	Med ia na				
Peixes Marinhos	GUA2	Brânquia	0,14	0,03	0,15	0,07	0,01	0,07	0,15	0,08	0,10	11,24	1,25	11,83	1,03	0,35	1,13	13,84	1,78	15,46	0,047	0,007	0,053	0,005	0,002	0,006	0,282	0,065	0,253
		Fígado	0,23	0,08	0,19	0,14	0,04	0,14	0,17	0,05	0,15	9,71	1,73	10,12	0,49	0,17	0,49	18,52	2,84	18,74	0,101	0,029	0,081	0,014	0,007	0,013	0,386	0,116	0,405
		Músculo	0,08	0,03	0,07	0,05	0,01	0,04	0,06	0,03	0,03	7,05	0,20	7,08	0,65	0,16	0,44	32,00	3,61	31,02	0,046	0,012	0,038	0,005	0,002	0,003	0,164	0,059	0,098
	VIX1	Brânquia	0,37	0,06	0,28	0,21	0,07	0,12	0,56	0,14	0,30	20,53	3,24	17,75	14,37	4,32	4,52	37,67	6,47	31,63	0,301	0,034	0,268	0,008	0,001	0,006	0,201	0,039	0,165
		Fígado	2,97	1,27	0,29	0,20	0,05	0,11	4,52	1,31	2,35	42,36	6,65	37,27	13,37	4,44	6,08	28,51	3,79	23,07	0,788	0,195	0,569	0,014	0,003	0,011	0,257	0,073	0,140
		Músculo	0,37	0,09	0,20	0,67	0,20	0,12	0,36	0,10	0,22	4,59	0,68	3,94	3,51	0,65	3,00	15,04	3,00	11,32	0,145	0,019	0,113	0,003	0,001	0,003	0,137	0,021	0,111
	VIX2	Brânquia	0,15	0,08	0,15	0,08	0,07	0,08	0,95	0,36	0,95	10,53	4,33	10,53	0,74	0,32	0,74	4,19	1,38	4,19	0,491	0,197	0,491	0,003	0,003	0,003	0,063	0,025	0,063
		Fígado	0,08	NC	0,08	0,04	NC	0,04	0,15	NC	0,15	14,40	NC	14,40	3,78	NC	3,78	2,64	NC	2,64	0,355	NC	0,355	0,004	NC	0,004	0,167	NC	0,167
		Músculo	0,09	0,02	0,09	1,21	0,52	1,34	1,12	0,89	1,12	3,96	1,30	2,90	1,15	0,39	1,05	6,34	0,99	5,66	0,139	0,111	0,139	0,002	0,001	0,002	0,397	0,127	0,380
	CA1	Brânquia	0,32	0,05	0,30	0,49	0,30	0,21	0,54	0,11	0,38	22,85	3,67	22,80	3,55	1,04	2,44	246,14	72,18	181,09	0,231	0,052	0,192	0,006	0,002	0,004	0,281	0,073	0,212
		Fígado	0,44	0,17	0,10	0,90	0,48	0,17	1,71	0,44	1,27	43,91	5,61	44,23	5,03	1,79	2,87	89,88	28,00	65,74	0,197	0,071	0,095	0,007	0,002	0,005	0,256	0,097	0,124
		Músculo	1,98	0,27	1,99	0,08	0,01	0,08	0,38	0,07	0,34	3,04	0,55	2,67	0,62	0,11	0,65	2,32	0,19	2,28	0,037	0,013	0,015	0,009	0,001	0,009	0,250	0,105	0,153
	CA2	Brânquia	12,41	2,21	13,64	0,24	0,10	0,21	2,41	0,76	1,12	27,67	5,09	24,88	10,33	1,48	10,54	18,70	2,89	17,74	0,096	0,030	0,069	0,022	0,005	0,018	1,141	0,270	1,237
		Fígado	10,16	2,36	11,04	0,63	0,19	0,51	5,32	0,83	4,36	87,40	14,19	87,36	4,24	0,84	4,07	23,47	1,72	22,67	0,102	0,040	0,053	0,029	0,004	0,030	4,586	1,445	3,860
		Músculo	3,52	0,74	3,75	0,06	0,01	0,06	0,69	0,20	0,39	3,72	0,93	2,96	0,93	0,22	0,78	2,68	0,21	2,50	0,015	0,004	0,010	0,006	0,001	0,005	0,946	0,276	0,465
	CA4	Brânquia	0,23	0,11	0,18	1,39	0,79	0,76	3,22	1,61	1,80	46,28	15,42	37,34	1,28	0,21	1,25	266,53	144,90	129,60	0,068	0,023	0,056	0,002	0,001	0,001	0,146	0,043	0,147
		Fígado	0,28	0,06	0,31	3,47	1,83	3,48	11,20	6,00	8,87	100,75	25,90	117,84	6,91	4,20	3,68	155,62	23,33	161,55	0,440	0,059	0,388	0,004	0,003	0,001	0,670	0,472	0,218
		Músculo	1,27	0,30	1,27	0,32	0,23	0,15	0,49	0,17	0,39	1,78	0,40	1,67	0,82	0,39	0,46	3,40	1,45	2,12	0,029	0,010	0,026	0,003	0,002	0,003	0,240	0,155	0,123

Ponto	Tecido	Metais (µg/g peso úmido)																										
		Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As		
		Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana	Médi a	EP	Med iana
FRD1	Brânquia	3,91	1,14	1,25	0,97	0,35	0,41	2,57	0,84	1,77	56,56	35,39	23,93	4,51	1,35	3,41	105,89	30,54	78,53	0,248	0,061	0,142	0,004	0,002	0,002	0,104	0,056	0,033
	Fígado	7,44	4,15	2,34	0,60	0,28	0,13	21,96	6,03	17,44	62,41	25,33	46,31	4,99	1,48	3,81	116,95	36,60	75,24	0,440	0,201	0,125	0,011	0,005	0,005	0,090	0,026	0,053
	Músculo	2,96	1,14	0,97	0,21	0,07	0,23	2,21	0,92	0,35	4,49	0,62	3,56	2,21	0,59	1,24	6,56	2,10	3,94	0,091	0,028	0,042	0,002	0,000	0,002	0,534	0,182	0,309
FRD3	Brânquia	5,34	1,59	1,29	2,05	0,30	1,59	9,45	1,38	6,94	66,90	10,18	60,28	1,06	9,57	39,70	9,42	22,56	0,394	0,111	0,195	0,011	0,004	0,006	0,378	0,099	0,141	
	Fígado	2,85	1,21	0,47	3,72	0,58	3,22	11,87	1,91	9,31	69,42	5,92	71,63	10,14	1,77	7,05	106,83	24,58	41,57	0,242	0,066	0,103	0,015	0,005	0,004	0,376	0,083	0,243
	Músculo	1,74	0,28	1,69	0,29	0,06	0,21	0,61	0,10	0,47	4,73	0,32	4,37	1,20	0,12	1,00	3,95	0,22	3,85	0,038	0,005	0,035	0,008	0,001	0,006	0,830	0,139	0,725
FRD6	Brânquia	4,07	1,46	0,82	0,51	0,11	0,35	6,24	1,19	4,54	26,33	5,85	25,68	4,33	1,17	1,89	110,93	33,20	42,65	0,115	0,022	0,071	0,007	0,002	0,005	0,167	0,047	0,097
	Fígado	1,99	0,61	0,98	2,46	0,77	0,28	20,70	5,36	13,25	48,22	9,05	33,31	5,77	1,38	4,09	130,44	27,96	68,31	0,255	0,065	0,109	0,018	0,005	0,009	0,138	0,029	0,106
	Músculo	2,40	0,24	2,14	0,10	0,02	0,08	0,77	0,47	0,19	4,31	0,55	4,25	0,79	0,11	0,67	3,59	0,42	3,15	0,054	0,012	0,041	0,009	0,001	0,010	0,119	0,017	0,096
FRD8	Brânquia	0,21	0,05	0,17	3,28	0,70	2,19	9,87	3,17	5,34	30,20	2,65	28,83	12,20	3,09	7,92	58,13	31,04	20,80	0,171	0,080	0,025	0,013	0,002	0,011	0,363	0,102	0,223
	Fígado	1,24	0,47	0,22	4,89	2,40	1,74	16,93	7,46	5,16	104,50	16,89	97,53	22,30	10,67	7,05	53,03	24,42	15,79	0,086	0,029	0,042	0,022	0,010	0,005	0,586	0,257	0,201
	Músculo	1,58	0,71	0,85	0,67	0,17	0,50	0,51	0,27	0,16	3,54	0,64	2,68	1,97	0,23	2,13	7,40	3,19	3,63	0,039	0,008	0,033	0,001	0,000	0,001	0,027	0,018	0,003
FRD9	Brânquia	18,95	4,65	13,26	1,30	1,06	0,34	4,24	2,47	1,67	35,36	6,73	29,42	13,26	3,18	11,84	16,14	2,47	16,71	0,191	0,047	0,127	0,019	0,004	0,018	0,715	0,453	0,033
	Fígado	17,93	3,16	16,55	0,20	0,07	0,26	5,28	0,78	4,67	49,36	8,96	42,66	10,33	1,74	11,68	19,87	2,86	20,11	0,103	0,021	0,091	0,027	0,006	0,023	1,388	0,441	1,279
	Músculo	3,50	1,67	2,21	0,04	0,01	0,04	1,38	0,50	0,59	5,71	1,12	4,04	0,85	0,13	0,85	3,45	0,51	2,96	0,070	0,043	0,014	0,003	0,001	0,002	0,500	0,238	0,036
FRD10	Brânquia	3,22	1,08	1,17	1,74	0,49	1,16	9,86	1,42	10,52	22,33	3,16	21,51	6,46	2,99	1,30	16,88	7,95	1,34	0,129	0,033	0,081	0,004	0,001	0,003	0,124	0,029	0,104
	Fígado	7,90	3,63	2,62	0,84	0,43	0,12	16,19	5,52	9,18	42,96	10,16	32,55	2,46	1,45	0,39	3,79	2,10	2,00	0,168	0,054	0,067	0,005	0,002	0,002	0,200	0,088	0,056
	Músculo	1,59	0,29	1,44	0,24	0,07	0,20	0,52	0,15	0,25	3,86	0,93	2,94	1,10	0,13	0,94	3,80	0,43	3,50	0,032	0,007	0,030	0,002	0,000	0,002	0,749	0,148	0,730
DE62	Brânquia	0,49	0,16	0,28	2,09	0,31	2,02	0,45	0,08	0,42	23,98	3,50	19,21	8,61	3,04	2,61	71,34	24,67	49,47	0,209	0,109	0,031	0,014	0,004	0,008	0,398	0,050	0,400
	Fígado	1,80	0,49	0,87	4,03	0,64	3,30	4,25	1,58	3,04	66,12	5,34	69,19	6,17	1,56	4,20	91,84	21,85	73,01	0,087	0,016	0,085	0,025	0,009	0,014	0,918	0,195	1,019
	Músculo	0,49	0,12	0,34	1,02	0,10	0,92	0,17	0,03	0,12	2,79	0,27	3,04	0,84	0,23	0,79	13,50	2,50	17,50	0,023	0,007	0,013	0,005	0,001	0,005	0,375	0,092	0,251

Ponto	Tecido	Metais (µg/g peso úmido)																										
		Cr			Cd			Cu			Fe			Mn			Zn			Pb			Hg			As		
		Mé di a	EP	Med iana	Mé di a	EP	Media na	Mé di a	EP	Med iana	Mé di a	EP	Media na	Mé di a	EP	Media na	Mé di a	EP	Media na	Mé di a	EP	Media na	Mé di a	EP	Media na	Mé di a	EP	Media na
BN1	Brânquia	1,01	0,37	0,45	1,85	0,31	1,95	3,43	0,51	3,73	28,63	3,02	29,71	7,59	1,24	5,99	158,93	35,21	113,94	0,047	0,021	0,013	0,004	0,001	0,003	0,127	0,041	0,068
	Fígado	0,49	0,15	0,61	1,71	0,50	1,75	6,30	1,23	7,08	89,90	30,55	58,29	3,74	0,82	4,12	122,20	42,63	104,11	0,009	0,004	0,005	0,002	0,001	0,003	0,137	0,042	0,086
	Músculo	0,35	0,10	0,26	1,09	0,13	0,90	0,24	0,05	0,19	2,59	0,38	2,29	1,95	0,41	1,76	9,55	2,01	6,81	0,023	0,006	0,019	0,001	0,000	0,001	0,010	0,003	0,006
BN2	Brânquia	1,31	0,42	0,87	1,34	0,24	1,39	6,67	1,20	5,18	31,36	4,24	31,45	6,12	0,86	5,58	100,00	31,00	64,52	0,064	0,033	0,022	0,008	0,001	0,008	0,223	0,046	0,198
	Fígado	0,50	0,10	0,47	3,08	0,72	2,72	8,39	1,44	7,66	22,04	4,33	20,66	6,81	0,91	7,79	149,95	63,47	108,17	0,108	0,073	0,033	0,008	0,002	0,006	0,259	0,045	0,261
	Músculo	0,24	0,09	0,13	0,75	0,15	0,64	1,27	0,23	1,53	4,64	0,85	3,61	1,04	0,12	0,98	6,41	2,56	3,89	0,017	0,006	0,017	0,002	0,001	0,001	0,033	0,008	0,035
ITA1	Brânquia	4,57	1,80	3,86	2,45	0,26	2,45	9,23	5,82	3,46	41,01	8,19	46,29	10,65	3,63	10,02	306,93	80,31	269,57	0,106	0,043	0,142	0,008	0,002	0,007	0,354	0,206	0,209
	Fígado	17,76	4,68	22,22	4,37	0,94	3,58	10,26	2,70	8,09	120,26	10,32	120,26	8,60	1,44	8,60	299,14	94,66	246,60	0,538	0,456	0,134	0,037	0,027	0,014	1,249	0,676	1,250
	Músculo	1,59	0,52	1,03	0,89	0,13	0,78	0,11	0,07	0,07	2,74	0,58	2,61	1,44	0,25	1,54	22,30	7,92	27,13	0,072	0,019	0,078	0,002	0,001	0,002	0,042	0,018	0,018

Fonte: Autoria própria.

Figura 32: Concentrações ( $\mu\text{g/g}$  peso úmido) de Cromo em diferentes tecidos de peixe, (a) Brânquia, (b) Fígado e (c) Músculo. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho.



Fonte: Autoria própria.

No Quadro 7 as concentrações mínimas e máximas de metais, de acordo com os dados da Tabela 20, nos tecidos dos peixes foram confrontadas com dados descritos na literatura para a concentração dos

metais coincidentes em espécies de peixes marinhos coletados no presente relatório. Surpreendentemente, o levantamento bibliográfico evidenciou que as concentrações máximas de Cr, Mn, Cd e Zn estavam elevadas em todos os tecidos quando comparados as concentrações máximas já encontradas para esses metais em outros estudos. Concentrações elevadas também foram observadas para o metal Fe no músculo e para o Cu na brânquia e no músculo.

Quadro 7: Concentração mínima e máxima dos metais, de acordo com a Tabela 20, na brânquia, fígado e músculo ( $\mu\text{g/g}$  de peso úmido) de peixes marinhos coletados na Campanha Marinha 1 comparados com outros estudos em peixes marinhos compilados a partir da literatura. Os dados da literatura estão expressos em valores ( $\mu\text{g/g}$  de peso úmido) mínimos e máximos encontrados. Valores acima dos encontrados na literatura foram destacados.

Peixes Marinhos	Tecido	Metais ( $\mu\text{g/g}$ peso úmido)								
		Cr	Fe	Mn	Cd	Cu	Zn	Pb	Hg	As
		Min - Máx	Min - Máx	Min - Máx	Min - Máx	Min - Máx	Min - Máx	Min - Máx	Min - Máx	Min - Máx
Campanha Marinha 1 Anexo 1	Brânquia	0,14 – 18,95	10,53 – 66,89	0,73 – 14,36	0,07 – 3,27	0,15 – 9,87	4,18 – 306,92	0,04 – 0,49	0,001 – 0,021	0,06 – 1,14
	Hepatopâncreas	0,08 – 17,92	9,70 – 120,26	0,49 – 22,29	0,04 – 4,88	0,15 – 27,96	2,64 – 299,13	0,009 – 0,78	0,002 – 0,03	0,09 – 4,58
	Músculo	0,07 – 3,52	1,78 – 7,05	0,61 – 3,50	0,03 – 1,21	0,06 – 2,21	2,32 – 31,99	0,01 – 0,14	0,0007 – 0,009	0,009 – 0,94
Bibliografia	Brânquia	0,76 <sup>h</sup> – 2,1 <sup>h</sup>	46,9 <sup>h</sup> – 70,9 <sup>h</sup>	0,16 <sup>i</sup> – 0,36 <sup>i</sup>	0,15 <sup>g</sup> – 0,88 <sup>h</sup>	0,17 <sup>g</sup> – 4,02 <sup>h</sup>	0,65 <sup>g</sup> – 16,04 <sup>h</sup>	4,14 <sup>h</sup> – 5,30 <sup>h</sup>	0,002 <sup>k</sup> – 0,032 <sup>l</sup>	1,12 <sup>j</sup> – 3,22 <sup>j</sup>
	Fígado	0,21 <sup>b</sup> – 0,85 <sup>h</sup>	36,6 <sup>h</sup> – 141,5 <sup>h</sup>	0,59 <sup>i</sup> – 2,43 <sup>j</sup>	0,42 <sup>g</sup> – 1,61 <sup>h</sup>	1,3 <sup>b</sup> – 508 <sup>e</sup>	9,03 <sup>e</sup> – 103 <sup>e</sup>	0,008 <sup>b</sup> – 4,26 <sup>h</sup>	0,05 <sup>k</sup> – 0,041 <sup>l</sup>	2,52 <sup>e</sup> – 14,9 <sup>e</sup>
	Músculo	0,12 <sup>a</sup> – 0,33 <sup>b</sup>	2,57 <sup>c</sup> – 4,62 <sup>b</sup>	0,16 <sup>a</sup> – 0,25 <sup>a</sup>	0,001 <sup>b</sup> – 0,026 <sup>d</sup>	0,14 <sup>b</sup> – 0,72 <sup>e</sup>	0,69 <sup>b</sup> – 9,45 <sup>f</sup>	0,001 <sup>b</sup> – 0,27 <sup>d</sup>	0,04 <sup>e</sup> – 0,41 <sup>c</sup>	1,45 <sup>e</sup> – 10,3 <sup>a</sup>

Fonte: Autoria própria.

Os resultados da Campanha Marinha 1 do Anexo 1 apresentados neste quadro foram comparados com os valores Mín e Máx dos seguintes estudos: Kaya e Turkoglu, 2017<sup>a</sup>, Coimbra, 2018<sup>b</sup>, Griboff, 2018<sup>c</sup>, Joyeux et al., 2004<sup>d</sup>, Corales, 2016<sup>e</sup>, Angeli et al., 2013<sup>f</sup>, Hamza-chaffai et al., 1995<sup>g</sup>, Kalai e Kanli, 1999<sup>h</sup>, Hause-Davies et al., 2016<sup>i</sup>, Basir et al., 2012<sup>j</sup>, Luczynska et al., 2016<sup>k</sup>, Luczynska Kuprowaski, 2009<sup>l</sup>.

### 3.2.5 Análise de Biomarcadores

#### 3.2.5.1 Fitoplâncton

A Tabela 21 descreve os resultados obtidos para fitoplâncton e zooplâncton nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1, a partir de biomarcadores dano oxidativo em lípidios (LPO) e níveis de metalotioneína (MT).

No fitoplâncton, a concentração de metalotioneínas (MT) atingiu seus picos em FRD1 e FRD3 (médias e medianas, Tabela 21), quando comparados aos níveis do ponto mais distante da Foz do Rio Doce (ex: ABRC1). Os maiores níveis de dano oxidativo em lípidios (LPO), por sua vez, foram observados em ITA2, DEG2 e FRD1.

No zooplâncton, a concentração de metalotioneínas (MT) não teve um padrão espacial definido e atingiu seus picos em FRD6, ITA, CA e ABR (médias e medianas, Tabela 21). Os maiores níveis de dano oxidativo em lípidios (LPO), por sua vez, foram observados em DEG1 e ABR02.

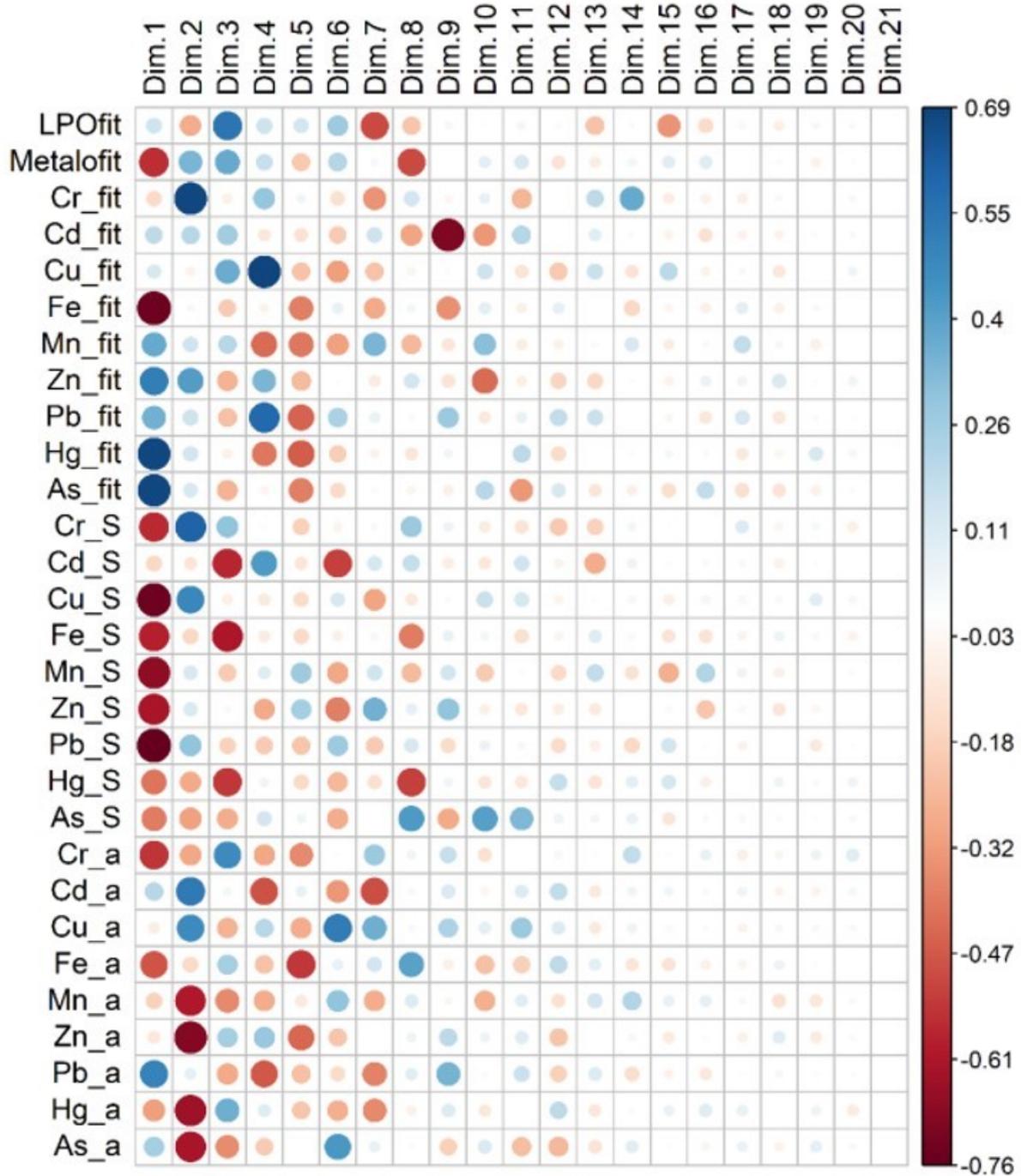
Tabela 21: Biomarcadores de lipoperoxidação (LPO) e concentração de metalotioneínas (MT) mensurados em amostras de fito e zooplâncton (pools) coletados nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1- estação seca (set/out 2018). Os resultados são expressos em média,  $\pm$  erro padrão e mediana. Em negrito destacam-se as médias mais elevadas encontradas para cada parâmetro biológico.

Biomarcadores	Ponto	Fitoplâncton				Zooplâncton			
		LPO (nmol MDA/mg prot.)		MT ( $\mu$ g MT /mg prot.)		LPO (nmol MDA/mg prot.)		MT ( $\mu$ g MT /mg prot.)	
		Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana
	GUA1	1,02 $\pm$ 0,23	0,94	3,22 $\pm$ 0,38	3,15	1,49 $\pm$ 0,22	1,71	6,58 $\pm$ 1,31	6,05
	GUA2	3,51 $\pm$ 1,36	2,42	6,89 $\pm$ 0,99	6,71	1,24 $\pm$ 0,21	1,16	8,90 $\pm$ 2,55	5,92
	VIX1	0,90 $\pm$ 0,18	1,00	5,64 $\pm$ 1,25	6,32	1,56 $\pm$ 0,56	1,11	9,20 $\pm$ 4,26	5,64
	VIX2	2,68 $\pm$ 0,66	2,27	6,25 $\pm$ 0,56	6,01	1,71 $\pm$ 0,20	1,65	<b>11,47 <math>\pm</math> 1,60</b>	10,81
	CA1	1,30 $\pm$ 0,44	0,70	3,41 $\pm$ 0,23	3,28	1,00 $\pm$ 0,21	0,80	3,88 $\pm$ 0,39	3,88
	CA2	1,56 $\pm$ 0,24	1,43	3,82 $\pm$ 0,84	2,91	2,05 $\pm$ 0,69	1,65	7,78 $\pm$ 0,81	7,51
	CA3	<b>7,76 <math>\pm</math> 3,16</b>	7,11	7,55 $\pm$ 0,27	7,55	1,29 $\pm$ 0,14	1,39	5,97 $\pm$ 1,76	4,43
	CA4	1,60 $\pm$ 0,26	1,84	7,84 $\pm$ 1,75	9,42	5,09 $\pm$ 2,29	4,81	<b>33,12 <math>\pm</math> 16,15</b>	33,12
	CA5	3,41 $\pm$ 1,00	2,47	<b>9,82 <math>\pm</math> 1,94</b>	8,81	1,38 $\pm$ 0,24	1,27	7,16 $\pm$ 1,07	6,79
	FRD1	<b>7,45 <math>\pm</math> 1,71</b>	7,01	<b>16,29 <math>\pm</math> 7,49</b>	14,41	1,47 $\pm$ 0,72	0,79	<b>13,40 <math>\pm</math> 4,57</b>	10,72
	FRD3	1,06 $\pm$ 0,29	0,76	<b>10,04 <math>\pm</math> 1,24</b>	10,87	1,21 $\pm$ 0,38	1,07	5,96 $\pm$ 1,99	5,96
	FRD6	2,74 $\pm$ 0,75	2,26	8,70 $\pm$ 3,75	5,50	5,02 $\pm$ 0,96	5,84	<b>18,34 <math>\pm</math> 4,98</b>	21,46
	FRD8	3,44 $\pm$ 0,98	3,18	<b>9,37 <math>\pm</math> 3,16</b>	5,33	1,00 $\pm$ 0,06	1,00	5,96 $\pm$ 1,13	5,97
	FRD9	1,90 $\pm$ 0,51	1,51	9,15 $\pm$ 3,04	5,72	1,08 $\pm$ 0,21	0,93	<b>12,06 <math>\pm</math> 2,57</b>	11,73
	FRD10	3,20 $\pm$ 0,78	2,99	0,82 $\pm$ 0,29	0,71	1,34 $\pm$ 0,40	1,49	7,03 $\pm$ 3,40	4,70
	DEG1	0,78 $\pm$ 0,14	0,74	<b>13,21 <math>\pm</math> 4,07</b>	7,97	<b>11,66 <math>\pm</math> 4,99</b>	11,50	<b>19,14 <math>\pm</math> 8,04</b>	19,14
	DEG2	<b>7,27 <math>\pm</math> 1,31</b>	7,19	2,68 $\pm$ 0,74	2,96	2,58 $\pm$ 1,52	1,18	<b>12,10 <math>\pm</math> 5,16</b>	6,45
	BN1	2,96 $\pm$ 0,76	3,67	6,32 $\pm$ 1,41	5,92	6,87 $\pm$ 3,23	5,16	<b>15,27 <math>\pm</math> 6,53</b>	11,41
	BN2	5,38 $\pm$ 1,50	4,66	7,79 $\pm$ 2,33	7,81	1,12 $\pm$ 0,49	0,72	<b>10,07 <math>\pm</math> 5,10</b>	10,08
	ITA1	1,78 $\pm$ 0,94	0,93	4,87 $\pm$ 1,33	5,95	2,09 $\pm$ 0,63	1,99	<b>14,45 <math>\pm</math> 2,64</b>	14,96
	ITA2	<b>11,29 <math>\pm</math> 2,13</b>	10,13	<b>13,02 <math>\pm</math> 6,07</b>	7,44	3,23 $\pm$ 1,06	2,79	<b>32,13 <math>\pm</math> 10,12</b>	24,60
	ABR01	2,86 $\pm$ 0,88	2,04	7,56 $\pm$ 2,47	5,95	1,13 $\pm$ 0,11	1,09	<b>17,29 <math>\pm</math> NC</b>	17,30
	ABR02	<b>32,00 <math>\pm</math> 5,05</b>	34,03	<b>10,78 <math>\pm</math> 2,58</b>	8,22	<b>10,49 <math>\pm</math> 1,24</b>	10,49	<b>18,88 <math>\pm</math> 7,72</b>	21,68
	ABR04	<b>21,07 <math>\pm</math> 2,37</b>	22,14	5,89 $\pm$ 1,06	4,98	3,92 $\pm$ 1,69	3,03	<b>24,57 <math>\pm</math> 4,21</b>	22,08
	ABRC1	1,95 $\pm$ 0,67	1,05	2,31 $\pm$ NC	2,32	0,61 $\pm$ 0,06	0,61	<b>10,30 <math>\pm</math> 1,65</b>	10,81

Fonte: Autoria própria.



Figura 34: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente



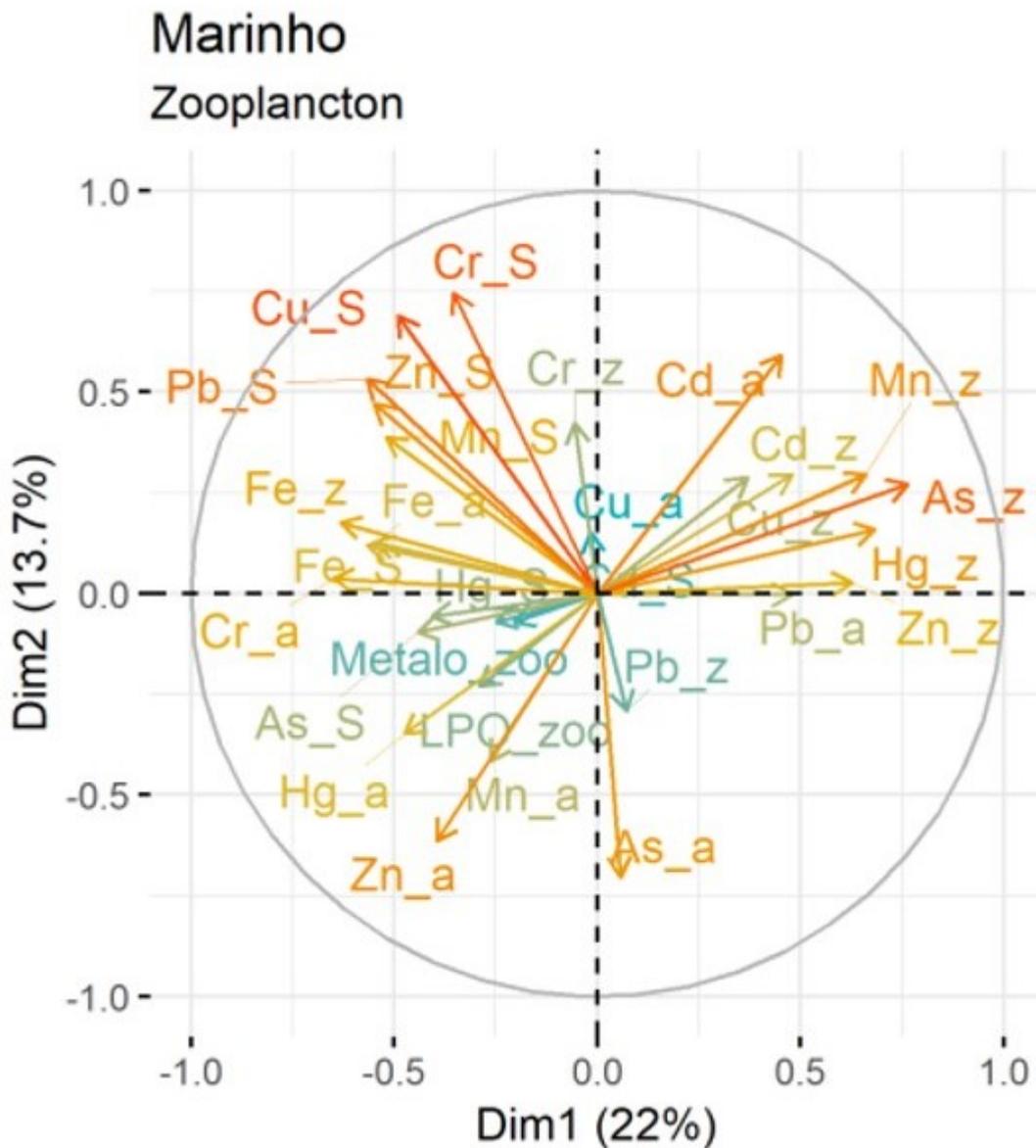
Fonte: Autoria própria.

### 3.2.5.2 Zooplâncton

A integração de dados de contaminação e efeitos biológicos no zooplâncton foram integrados por uma Análise de Componentes Principais (PCA), e seus resultados são apresentados na Figura 35 e Figura 36. O segundo componente (Dim2 [vertical]) explicou 13,7% da variabilidade total e observa-se que os dados de contaminação ambiental e de respostas biológicas do zooplâncton seguindo padrões muito

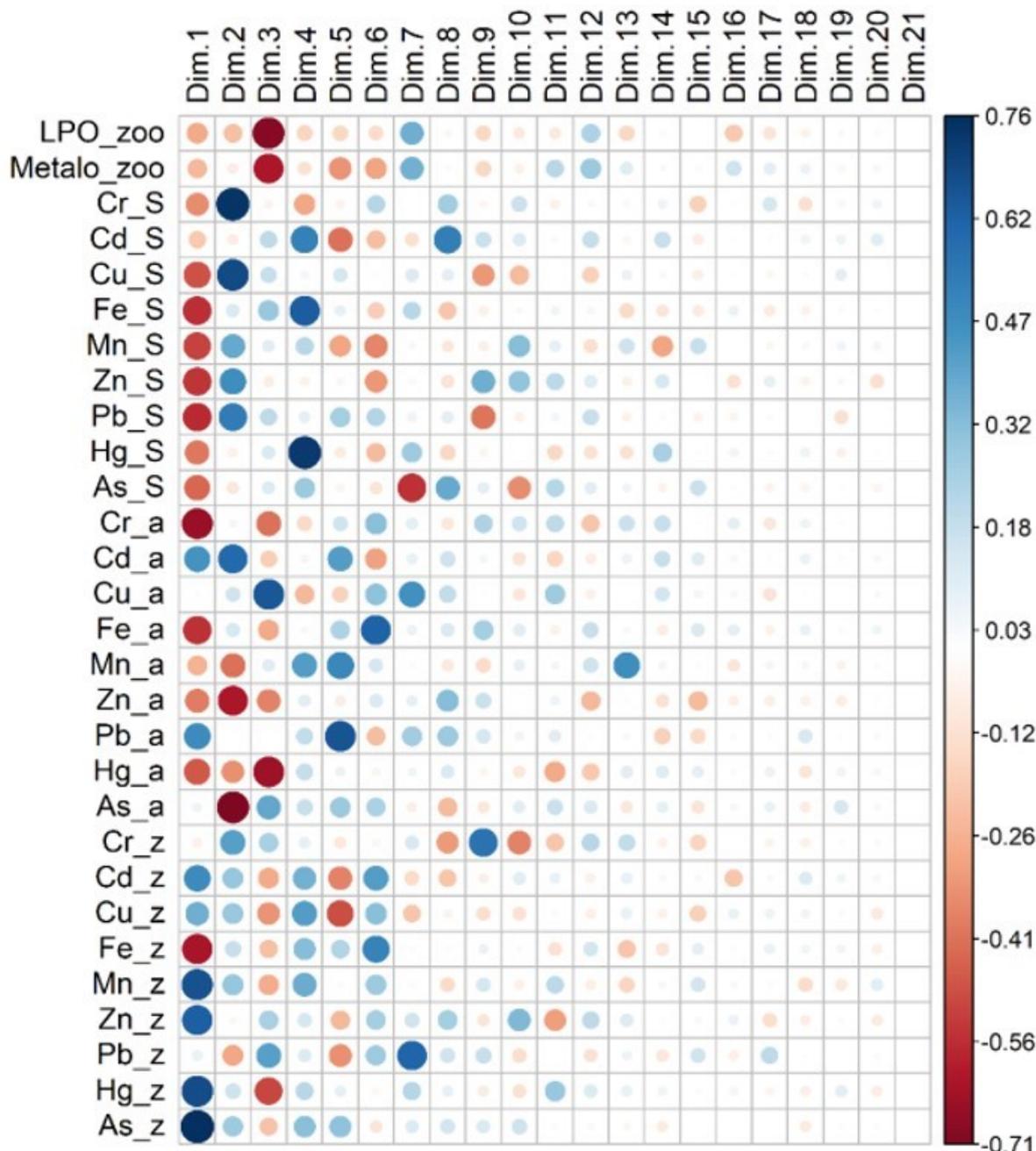
semelhantes aos encontrados para o fitoplâncton. De forma geral, níveis crescentes de lipoperoxidação (LPO) e de concentração de metalotioneínas (MT) agruparam na direção oeste do componente principal 1, onde também se agrupam os metais Cr, Fe e Mn tanto na biota quanto no ambiente, assim como o Hg e Zn na água.

Figura 35: Diagrama de ordenação (biplot) a partir da análise de componentes principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) em amostras de água (a), sedimento (S) e no zooplâncton (zoo), e biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (Metalto) nos organismos.



Fonte: Autoria própria.

Figura 36: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente.



Fonte: Autoria própria.

A principal função do PCA é a discriminação das variáveis ambientais que mais captaram variância nos eixos de ordenação. Neste caso, as variáveis Cr na água e no sedimento, Fe na água, sedimento e zooplâncton, apresentaram correlações significativas com o componente principal 1 (Figura 35).

As respostas biológicas encontradas para o plâncton indicam uma relação de causa-efeito com metais, mas também uma alta variabilidade associada às diferentes comunidades planctônicas observadas entre em pontos costeiros e pontos mais oceânicos. Algumas espécies planctônicas apresentam

elevados níveis de capacidade antioxidante, o que em conjunto com outros fatores genéticos e fisiológicos, permite com que essas espécies se sobressaiam frente a condições ambientais alteradas e dominem comunidades (Vega-López et al., 2013). Estações amostrais expostas continuamente a metais podem ter sua comunidade planctônica alterada e dominada por espécies com alto grau de tolerância ao estresse oxidativo.

### 3.2.5.3 Camarão

A Tabela 22, descreve os resultados de biomarcadores, dano oxidativo em lipídios (LPO) e níveis de metalotioneína (MT) e níveis de proteínas carboniladas obtidos para camarão marinho coletados nas 25 estações amostrais da Campanha Marinha 1.

Os resultados indicam que de forma geral respostas biológicas determinadas no hepatopâncreas de camarões marinhos não seguiram padrão espacial definido.

Os danos oxidativos em lipídios na brânquia, e em proteínas no músculo tiveram a maioria dos picos em estações amostrais localizadas perto da Foz do Rio Doce.

Tabela 22: Análise em diferentes tecidos (brânquia, hepatopâncreas e músculo), dos biomarcadores de dano oxidativo em lípidios (LPO), níveis de metalotioneína (MT) e níveis de proteínas carboniladas nos camarões coletados em estações amostrais da Campanha Marinha 1.

Biomarcadores	Ponto	Camarão							
		Brânquia		Hepatopâncreas				Músculo	
		LPO ( $\mu\text{M}$ MDA/mg proteína)		LPO ( $\mu\text{M}$ MDA/mg proteína)		MT ( $\mu\text{M}$ /mg proteína)		PCO (mM Pc/mg proteína)	
		Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana
	<b>GUA2</b>	1,82 $\pm$ 0,36	1,26	5,90 $\pm$ 1,57	5,06	20,11 $\pm$ 6,88	22,38	10,95 $\pm$ 1,65	10,65
	<b>VIX1</b>	2,69 $\pm$ 1,02	2,01	4,78 $\pm$ 0,57	4,86	24,07 $\pm$ 9,47	13,83	15,65 $\pm$ 2,48	13,41
	<b>CA1</b>	4,79 $\pm$ 1,64	5,84	4,59 $\pm$ 0,78	4,13	21,89 $\pm$ 4,65	19,40	10,48 $\pm$ 1,81	12,61
	<b>CA2</b>	3,82 $\pm$ 1,06	2,07	2,97 $\pm$ 0,28	2,72	11,67 $\pm$ 2,29	9,34	EA	EA
	<b>FRD1</b>	3,10 $\pm$ 0,92	2,86	5,80 $\pm$ 1,15	6,02	22,56 $\pm$ 5,65	13,98	22,23 $\pm$ 14,37	7,40
	<b>FRD3</b>	4,07 $\pm$ 0,87	3,42	3,65 $\pm$ 0,39	4,17	11,65 $\pm$ 1,60	10,02	7,87 $\pm$ 0,49	8,25
	<b>FRD6</b>	4,59 $\pm$ 1,30	2,70	4,48 $\pm$ 0,75	4,48	23,47 $\pm$ 4,27	18,80	6,77 $\pm$ 1,36	6,77
	<b>FRD9</b>	2,31 $\pm$ 0,34	2,05	2,92 $\pm$ 0,25	2,74	16,52 $\pm$ 3,66	14,09	9,03 $\pm$ 1,79	8,18
	<b>FRD10</b>	4,54 $\pm$ 0,52	4,92	3,96 $\pm$ 0,46	3,46	19,02 $\pm$ 4,39	17,90	EA	EA
	<b>DEG1</b>	1,93 $\pm$ 0,35	1,74	1,90 $\pm$ 0,14	1,93	8,70 $\pm$ 0,10	8,67	5,66 $\pm$ 0,94	6,89
	<b>ITA1</b>	3,65 $\pm$ 0,94	5,32	2,42 $\pm$ 0,72	2,39	16,99 $\pm$ 7,79	12,68	EA	EA

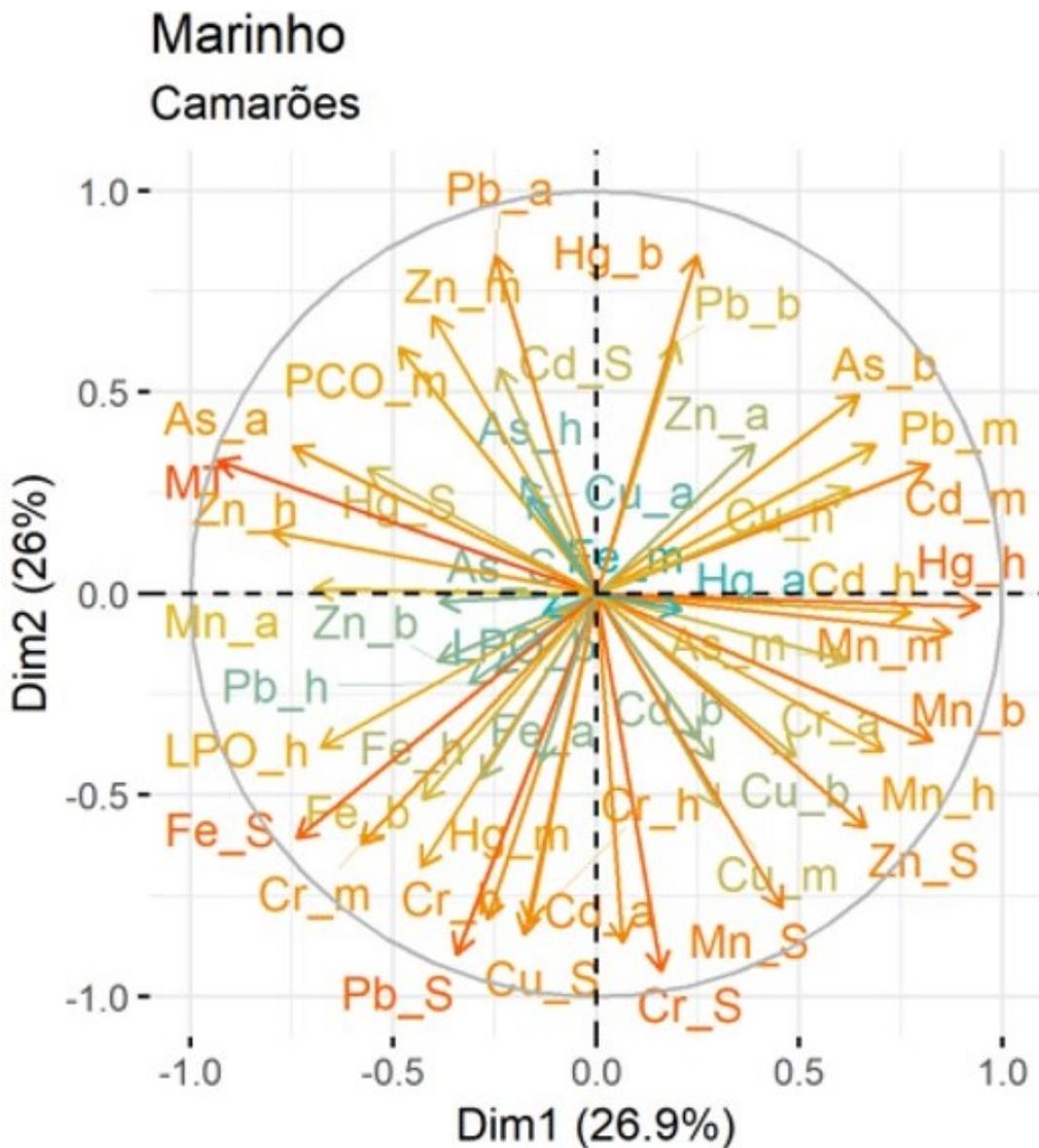
Fonte: Autoria própria.

EA= Em análise

**Análise integrada**

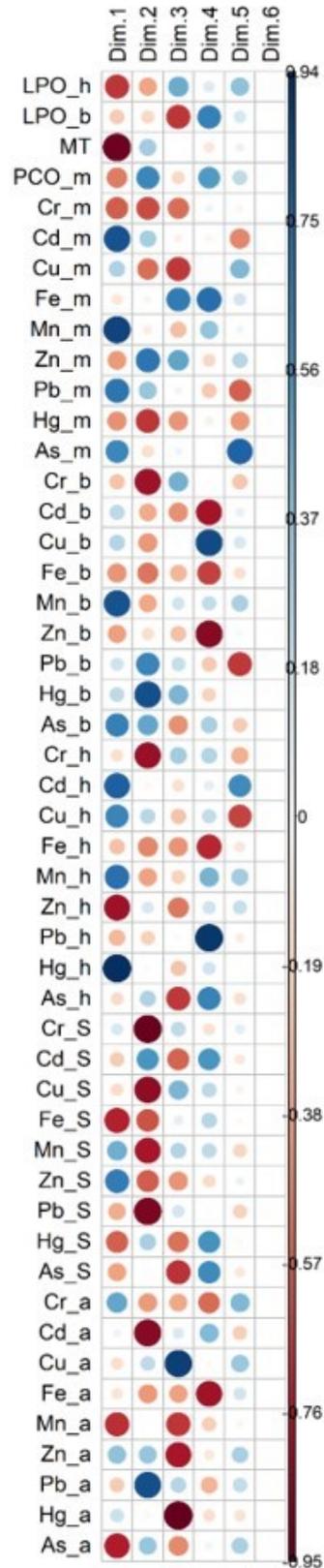
Considerando os resultados obtidos das amostras de camarões e dos dados de contaminação ambiental, a Análise de Componentes Principais (Figura 37 e Figura 38) captou 52% da variância total. O eixo 1 foi responsável por 31.3% da variância, e separou principalmente os metais do sedimento e água no lado positivo, e a bioconcentração de Pb, Mn e Fe nos tecidos de camarões no lado negativo. O segundo componente, que explicou 20.7% da variação, ordenou os metais Cr, Fe e Mn nos tecidos, assim como o Fe, Cr e Pb no sedimento no lado positivo.

Figura 37: Análise de Componentes Principais para os dados de contaminação ambiental e dados de camarões coletados na Campanha I.



Fonte: Autoria própria.

Figura 38: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente.



Fonte: Autoria própria.

A análise multivariada foi utilizada para diminuir a dimensionalidade dos dados e identificar padrões de similaridades entre variáveis. A PCA para os dados de camarões evidenciou a natureza variável das respostas mensuradas nestes organismos, e a falta de padrões espaciais marcados. Os marcadores de efeito biológico LPO, PCO e concentração de metalotioneínas se correlacionaram negativamente com o componente 1 (Figura 37), assim como os níveis de Cr no músculo e branquias, e os níveis de Pb, Hg e As no sedimento. O agrupamento dessas variáveis no mesmo setor da PCA, assim como suas significativas correlações com o eixo principal são indicativas de associação entre a contaminação ambiental, a bioacumulação e os efeitos biológicos.

O marcado aumento da concentração de metalotioneína na mesma direção que os aumentos de Zn é uma resposta clássica, visto que a gama de metais capazes de se ligarem à MT é ampla, e dentre estes Zinco é um dos que apresenta maior afinidade (Stillman, 1995; Noel-Lambot et al., 1978; Kági e Schäffer, 1988; Roméo et al., 1997; Linde et al, 2001). No camarão, uma correlação positiva entre o aumento dos níveis de Zn no animal (hepatopâncreas e músculo) foi acompanhada dos aumentos no conteúdo de MT e PCO, respectivamente.

O Cr, o Fe e o Hg são metais de destaque uma vez que seus níveis em vários compartimentos (água, sedimento e diversos tecidos) estão fortemente correlacionados ao eixo principal (Figura 37), sendo, portanto, os principais direcionadores das respostas biológicas encontradas.

#### 3.2.5.4 Peixes

A Tabela 23, descreve os resultados dos biomarcadores de dano oxidativo em lípidios (LPO) e níveis de metalotioneína (MT), e níveis de proteínas carboniladas e frequência de Micronúcleos (MN) obtidos para peixes marinhos coletados nas estações amostrais da Campanha Marinha 1.

O dano oxidativo em lípidios e proteínas em peixes marinhos foi maior em estações amostrais na área da Foz do Rio Doce, Degredo e Costa das algas. Metalotioneínas e Micronúcleo por sua vez não responderam com um padrão espacial definido.

Além dos biomarcadores descritos anteriormente, também foram analisadas, nos peixes marinhos, enzimas biomarcadoras do estresse oxidativo e do metabolismo energético. Entre estas uma enzima antioxidante, catalase (CAT), e duas enzimas do metabolismo energético, lactato desidrogenase (LDH), malato desidrogenase (MDH). Os valores médios destas enzimas, de cada ponto, foram comparados com a média global, sendo essa a média de cada parâmetro da mesma espécie em todos os pontos do ambiente marinho. Desta avaliação foram identificadas as espécies com índices médios acima e abaixo da média global. Com a classificação proposta pode-se perceber, para cada espécie, o contraste entre os pontos com maiores e menores valores médios em relação à média global. O perfil obtido das três enzimas nos órgãos dos peixes marinhos analisados pode ser observado nas tabelas a seguir (Tabela 24, Tabela 25 e Tabela 26).

Tabela 23: Análise em diferentes tecidos (brânquia, fígado e músculo), dos biomarcadores de dano oxidativo em lípidios (LPO), níveis de metalotioneína (MT) e níveis de proteínas carboniladas e frequência de Micronúcleos (MN) nos peixes marinhos coletados em estações amostrais da Campanha Marinha 1.

Biomarcadores	Ponto	Peixes							
		Fígado				Músculo		Sangue	
		LPO ( $\mu\text{M}$ MDA/mg proteína)		MT ( $\mu\text{M}$ /mg proteína)		PCO (mM Pc/mg proteína)		MN (‰)	
		Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana
	<b>GUA2</b>	1,62 $\pm$ 0,15	1,63	4,41 $\pm$ 1,00	3,87	20,48 $\pm$ 3,57	17,80	7,00 $\pm$ 1,73	6,00
	<b>VIX1</b>	1,49 $\pm$ 0,25	1,39	7,13 $\pm$ 4,26	2,69	15,65 $\pm$ 1,94	14,55	1,44 $\pm$ 0,39	1,00
	<b>VIX2</b>	1,39 $\pm$ 0,02	1,39	2,70 $\pm$ NC	2,70	33,84 $\pm$ 1,70	35,54	1,00 $\pm$ 0,58	1,00
	<b>CA1</b>	1,17 $\pm$ 0,27	0,88	6,49 $\pm$ 2,46	3,48	14,46 $\pm$ 3,41	8,47	1,00 $\pm$ 0,44	1,00
	<b>CA2</b>	1,96 $\pm$ 0,17	1,95	1,93 $\pm$ 0,31	1,76	15,71 $\pm$ NC	15,71	0,33 $\pm$ 0,22	0,00
	<b>CA3</b>	EA	EA	EA	EA	EA	EA	2,50 $\pm$ 2,50	2,50
	<b>CA4</b>	2,23 $\pm$ 0,85	2,01	2,97 $\pm$ 0,90	3,64	31,67 $\pm$ 4,78	31,67	0,50 $\pm$ 0,50	0,00
	<b>FRD1</b>	0,82 $\pm$ 0,06	0,81	0,90 $\pm$ 0,26	0,90	57,10 $\pm$ 11,94	60,43	0,80 $\pm$ 0,37	1,00
	<b>FRD3</b>	2,02 $\pm$ 0,41	1,84	1,78 $\pm$ 0,20	1,75	EA	EA	0,81 $\pm$ 0,25	0,50
	<b>FRD6</b>	1,12 $\pm$ 0,13	1,04	2,14 $\pm$ 0,96	1,28	48,53 $\pm$ 8,23	41,18	0,40 $\pm$ 0,19	0,00
	<b>FRD8</b>	1,81 $\pm$ 0,20	1,61	2,39 $\pm$ 0,39	2,69	32,30 $\pm$ 7,95	23,25	0,50 $\pm$ 0,34	0,00
	<b>FRD9</b>	1,65 $\pm$ 0,32	1,50	2,34 $\pm$ 0,43	2,46	57,06 $\pm$ 9,02	45,22	0,33 $\pm$ 0,33	0,00
	<b>FRD10</b>	2,37 $\pm$ 0,71	0,88	1,57 $\pm$ 0,25	1,41	EA	EA	0,25 $\pm$ 0,14	0
	<b>DEG1</b>	0,38 $\pm$ NC	0,38	1,03 $\pm$ NC	1,03	EA	EA	1,00 $\pm$ NC	1,00
	<b>DEG2</b>	2,66 $\pm$ 0,33	2,43	2,12 $\pm$ 0,38	1,68	86,50 $\pm$ 14,52	77,65	0,14 $\pm$ 0,10	0,00
	<b>BN1</b>	1,27 $\pm$ 0,31	0,99	3,96 $\pm$ 1,95	2,45	2,68 $\pm$ 1,08	1,00	0,09 $\pm$ 0,09	0,00
	<b>BN2</b>	1,00 $\pm$ 0,26	0,81	1,39 $\pm$ 0,16	1,27	13,61 $\pm$ 2,32	12,05	0,80 $\pm$ 0,58	0,00
	<b>ITA1</b>	1,16 $\pm$ NC	1,16	3,10 $\pm$ NC	3,10	EA	EA	0,50 $\pm$ 0,50	0,00

Fonte: Autoria própria.

EA= Em análise

Tabela 24: Valores médios e médias globais da enzima catalase de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) dos valores e número de órgãos (nº) analisados. Médias dos valores acima da média global foram destacadas.

Ponto		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys sp. (Linguado)	Balistes capriscus (Peroá)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralonchurus brasiliensis (Maria Luiza)	Stellifer rastrifer (cabeçadura)	Diplectrum radiale (Michole)	Lutjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
	nº total de tecidos (Brq)	24	18	1	18	21	23	5	2	0	19	3	4
	nº total de tecidos (Fig)	25	16	2	26	31	34	6	2	1	17	2	5
	Média global entre pontos (Brq)	0,24	0,23	0,10	0,22	0,21	0,20	0,27	0,46	-	0,20	0,39	0,14
	Média global entre pontos (Fig)	2,13	1,97	3,19	2,05	2,56	1,57	2,98	2,05	6,51	2,22	2,28	2,52
GUA2	(Brq) média ± DP (nº)		0,11 ± 0,11 (2)			0,21 ± 0,2 (2)							
	(Fig) média ± DP (nº)		2,62 ± 2,24 (3)			4,72 ± 5,77 (4)							
VIX1	(Brq) média ± DP (nº)	0,23 ± 0,25 (4)			0,16 ± 0,12 (3)	0,17 ± 0,1 (5)	0,08 ± 0 (1)						
	(Fig) média ± DP (nº)	2,15 ± 1,51 (4)			0,94 ± 0,37 (6)	1,74 ± 1,62 (6)	1,19 ± 0,66 (4)						
VIX2	(Brq) média ± DP (nº)		0,11 ± 0,01 (2)										
	(Fig) média ± DP (nº)		2,39 ± 1,19 (2)										
CA1	(Brq) média ± DP (nº)			0,1 ± 0 (1)	0,18 ± 0 (1)	0,16 ± 0,09 (3)							
	(Fig) média ± DP (nº)			4,08 ± 0 (1)	7,26 ± 0 (1)	4,97 ± 6,05 (5)	2,78 ± 1,42 (4)						
CA2	(Brq) média ± DP (nº)		0,28 ± 0,19 (6)				0,15 ± 0,05 (4)						
	(Fig) média ± DP (nº)		1,16 ± 0,74 (2)				1,70 ± 0,58 (5)						
CA3	(Brq) média ± DP (nº)		0,31 ± 0 (1)										
	(Fig) média ± DP (nº)		2,26 ± 2,18 (2)										
CA4	(Brq) média ± DP (nº)								0,46 ± 0,44 (2)				
	(Fig) média ± DP (nº)							6,83 ± 0 (1)	2,05 ± 1,99 (2)	6,51 ± 0 (1)			
FRD1	(Brq) média ± DP (nº)					0,15 ± 0,06 (2)	0,34 ± 0,14 (5)					0,39 ± 0,48 (3)	
	(Fig) média ± DP (nº)					0,36 ± 0,1 (4)	0,25 ± 0,1 (5)					2,28 ± 1,09 (2)	

Ponto		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys sp. (Linguado)	Balistes capriscus (Peroá)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralonchurus brasiliensis (Maria Luiza)	Stellifer rastrifer (cabeçadoura)	Diplectrum radiale (Michole)	Lutjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
FRD3	(Brq) média ± DP (nº)	0,15 ± 0,06 (5)			0,28 ± 0,14 (3)	0,31 ± 0,23 (4)	0,17 ± 0,11 (5)						
	(Fig) média ± DP (nº)	1,18 ± 0,83 (5)		2,31 ± 0 (1)	1,17 ± 0,76 (3)	1,45 ± 1,11 (5)	1,34 ± 1,55 (6)						
FRD6	(Brq) média ± DP (nº)	0,2 ± 0,18 (4)			0,25 ± 0,1 (6)	0,26 ± 0,12 (3)					0,28 ± 0,36 (5)		
	(Fig) média ± DP (nº)	3,98 ± 1,84 (5)			2,10 ± 0,86 (6)	3,37 ± 2,45 (5)					2,62 ± 1,49 (4)		
FRD8	(Brq) média ± DP (nº)	0,39 ± 0,22 (3)	0,39 ± 0,34 (2)					0,15 ± 0,05 (4)					
	(Fig) média ± DP (nº)	0,97 ± 0,56 (2)	2,48 ± 1,1 (4)					1,79 ± 0,71 (4)					
FRD9	(Brq) média ± DP (nº)				0,39 ± 0,08 (2)	0,2 ± 0,16 (2)	0,21 ± 0,14 (4)						
	(Fig) média ± DP (nº)				1,28 ± 0,62 (3)	1,3 ± 1,06 (2)	1,91 ± 0,97 (2)						
FRD10	(Brq) média ± DP (nº)	0,30 ± 0,17 (3)			0,09 ± 0,02 (2)		0,22 ± 0,11 (3)						
	(Fig) média ± DP (nº)	0,92 ± 0,46 (4)			0,74 ± 0,82 (5)		0,7 ± 0,33 (5)						
DEG1	(Brq) média ± DP (nº)												
	(Fig) média ± DP (nº)												
DEG2	(Brq) média ± DP (nº)	0,16 ± 0,18 (5)									0,11 ± 0,04 (3)		0,14 ± 0,03 (4)
	(Fig) média ± DP (nº)	3,55 ± 5,04 (5)									2,2 ± 0,57 (3)		2,52 ± 0,37 (5)
BN1	(Brq) média ± DP (nº)		0,19 ± 0,13 (5)								0,15 ± 0,1 (6)		
	(Fig) média ± DP (nº)		0,92 ± 1,13 (3)								1,41 ± 1,85 (5)		
BN2	(Brq) média ± DP (nº)							0,39 ± 0 (1)			0,24 ± 0,14 (5)		
	(Fig) média ± DP (nº)							0,31 ± 0 (1)			2,63 ± 2,21 (5)		
ITA1	(Brq) média ± DP (nº)				0,2 ± 0 (1)		0,2 ± 0 (1)						
	(Fig) média ± DP (nº)				0,86 ± 0,9 (2)		2,67 ± 2,46 (3)						

Fonte: Autoria própria.

Tabela 25: Valores médios e médias globais da enzima lactato desidrogenase de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) dos valores e número de órgãos (nº) analisados. Médias dos valores acima da média global foram destacadas.

		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys sp. (Linguado)	Balistes capriscus (Peroá)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralanchurus brasiliensis (Maria Luíza)	Stellifer rastrifer (cabeçadura)	Diplectrum radiale (Michole)	Lutjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
	nº total de tecidos (Brq)	28	25	2	28	30	37	6	2	0	20	3	5
	nº total de tecidos (Fig)	27	16	1	25	29	34	7	2	1	17	3	5
	Média global entre pontos (Brq)	0,62	0,49	0,11	0,66	0,35	0,47	0,69	0,41	-	0,45	0,16	0,18
	Média global entre pontos (Fig)	0,05	0,06	0,09	0,05	0,04	0,06	0,03	0,01	0,18	0,03	0,04	0,03
GUA2	(Brq) média ± DP (nº)		0,10 ± 0,04 (3)			0,35 ± 0,48 (3)							
	(Fig) média ± DP (nº)		0,01 ± 0,01 (3)			0,06 ± 0,08 (3)							
VIX1	(Brq) média ± DP (nº)	0,27 ± 0,23 (4)			0,37 ± 0,2 (6)	0,39 ± 0,32 (5)	0,28 ± 0,14 (3)						
	(Fig) média ± DP (nº)	0,05 ± 0,05 (4)			0,03 ± 0,02 (6)	0,03 ± 0,02 (6)	0,05 ± 0,06 (5)						
VIX2	(Brq) média ± DP (nº)		0,26 ± 0,19 (3)										
	(Fig) média ± DP (nº)		0,17 ± 0,19 (2)										
CA1	(Brq) média ± DP (nº)			0,16 ± 0 (1)	0,25 ± 0 (1)	0,4 ± 0,43 (6)	0,34 ± 0,05 (3)						
	(Fig) média ± DP (nº)			0,09 ± 0 (1)	0,04 ± 0 (1)	0,03 ± 0,02 (5)	0,05 ± 0,04 (4)						
CA2	(Brq) média ± DP (nº)		0,50 ± 0,29 (6)				0,39 ± 0,15 (5)						
	(Fig) média ± DP (nº)						0,05 ± 0,02 (5)						
CA3	(Brq) média ± DP (nº)		1,34 ± 0 (1)										
	(Fig) média ± DP (nº)		0,06 ± 0,07 (2)										
CA4	(Brq) média ± DP (nº)								0,41 ± 0,1 (2)				
	(Fig) média ± DP (nº)						0,07 ± 0 (1)		0,01 ± 0,01 (2)	0,18 ± 0 (1)			
FRD1	(Brq) média ± DP (nº)					0,15 ± 0,09 (3)	0,41 ± 0,28 (6)					0,16 ± 0,1 (3)	
	(Fig) média ± DP (nº)					0,11 ± 0,15 (4)	0,04 ± 0,02 (4)					0,04 ± 0,01 (3)	

		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys sp. (Linguado)	Balistes capriscus (Peroá)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralonchurus brasiliensis (Maria Luiza)	Stellifer rastrifer (cabeçadura)	Diplectrum radiale (Michole)	Lutjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
FRD3	(Brq) média ± DP (n°)	0,51 ± 0,19 (6)			0,83 ± 0,79 (4)	0,53 ± 0,40 (5)	0,49 ± 0,44 (6)						
	(Fig) média ± DP (n°)	0,05 ± 0,08 (5)			0,03 ± 0,03 (3)	0,02 ± 0,01 (5)	0,02 ± 0,02 (6)						
FRD6	(Brq) média ± DP (n°)	0,84 ± 0,81 (6)			0,49 ± 0,43 (6)	0,31 ± 0,25 (6)					0,67 ± 0,35 (6)		
	(Fig) média ± DP (n°)	0,05 ± 0,04 (5)			0,05 ± 0,07 (6)	0,06 ± 0,04 (5)					0,02 ± 0,01 (4)		
FRD8	(Brq) média ± DP (n°)	0,47 ± 0,19 (3)	0,24 ± 0,14 (6)					0,36 ± 0,08 (5)					
	(Fig) média ± DP (n°)	0,05 ± 0,05 (3)	0,04 ± 0,05 (6)					0,02 ± 0,02 (5)					
FRD9	(Brq) média ± DP (n°)				0,60 ± 0,37 (4)	0,33 ± 0,25 (2)	0,88 ± 0,24 (5)						
	(Fig) média ± DP (n°)				0,02 ± 0,01 (3)	0,01 ± 0 (1)	0,01 ± 0 (2)						
FRD10	(Brq) média ± DP (n°)	0,87 ± 0,37 (4)			0,47 ± 0,22 (5)		0,65 ± 0,37 (6)						
	(Fig) média ± DP (n°)	0,03 ± 0,02 (4)			0,02 ± 0,01 (5)		0,04 ± 0,05 (5)						
DEG1	(Brq) média ± DP (n°)				1,02 ± 0 (1)								
	(Fig) média ± DP (n°)												
DEG2	(Brq) média ± DP (n°)	0,74 ± 0,62 (5)									0,42 ± 0,21 (3)		0,18 ± 0,09 (5)
	(Fig) média ± DP (n°)	0,05 ± 0,06 (6)									0,05 ± 0,04 (3)		0,03 ± 0,04 (5)
BN1	(Brq) média ± DP (n°)		0,53 ± 0,19 (6)								0,32 ± 0,11 (6)		
	(Fig) média ± DP (n°)		0,01 ± 0,01 (3)								0,02 ± 0,04 (5)		
BN2	(Brq) média ± DP (n°)							1,02 ± 0 (1)			0,39 ± 0,27 (5)		
	(Fig) média ± DP (n°)							0,01 ± 0 (1)			0,03 ± 0,02 (5)		
ITA1	(Brq) média ± DP (n°)				1,23 ± 0 (1)		0,34 ± 0,20 (3)						
	(Fig) média ± DP (n°)				0,19 ± 0 (1)		0,24 ± 0,30 (3)						

Fonte: Autoria própria.

Tabela 26: Valores médios e médias globais da enzima malato desidrogenase de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada ponto amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) dos valores e número de órgãos (n°) analisados. Médias dos valores acima da média global foram destacadas.

Ponto		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys sp. (Linguado)	Balistes capriscus (Peraó)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralonchurus brasiliensis (Maria Luíza)	Stellifer rastrifer (cabeçadura)	Diplectrum radiale (Michole)	Lutjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
	n° total de tecidos (Brq)	28	23	2	24	29	34	6	2	0	19	3	5
	n° total de tecidos (Fig)	23	23	2	26	31	34	7	2	1	12	3	4
	Média global entre pontos (Brq)	0,57	0,45	0,21	0,75	0,52	0,57	0,91	0,80	-	0,42	0,30	0,24
	Média global entre pontos (Fig)	1,61	1,31	0,57	2,20	1,07	1,45	1,47	0,60	3,72	1,56	0,86	2,75
GUA2	(Brq) média ± DP (n°)		0,22 ± 0,14 (3)			0,44 ± 0,52 (3)							
	(Fig) média ± DP (n°)		<b>0,61 ± 0,57 (3)</b>			<b>0,68 ± 0,48 (4)</b>							
VIX1	(Brq) média ± DP (n°)	0,12 ± 0,14 (4)			0,41 ± 0,25 (5)	0,51 ± 0,36 (5)	0,34 ± 0,09 (3)						
	(Fig) média ± DP (n°)	<b>2,10 ± 1,66 (4)</b>			1,77 ± 0,59 (6)	1,2 ± 0,6 (6)	1,61 ± 0,82 (5)						
VIX2	(Brq) média ± DP (n°)		0,35 ± 0,15 (3)										
	(Fig) média ± DP (n°)		<b>1,93 ± 1,17 (2)</b>										
CA1	(Brq) média ± DP (n°)			0,25 ± 0 (1)	0,55 ± 0 (1)	0,53 ± 0,45 (6)	0,35 ± 0,04 (2)						
	(Fig) média ± DP (n°)			<b>0,58 ± 0 (1)</b>	<b>4,73 ± 0 (1)</b>	<b>1,06 ± 0,68 (5)</b>	<b>1,10 ± 0,52 (4)</b>						
CA2	(Brq) média ± DP (n°)		<b>0,52 ± 0,27 (6)</b>				0,47 ± 0,14 (5)						
	(Fig) média ± DP (n°)		1,66 ± 1,14 (5)				<b>2,05 ± 0,57 (5)</b>						
CA3	(Brq) média ± DP (n°)		<b>0,77 ± 0 (1)</b>										
	(Fig) média ± DP (n°)		<b>1,25 ± 0,82 (2)</b>										
CA4	(Brq) média ± DP (n°)								0,8 ± 0,55 (2)				
	(Fig) média ± DP (n°)							<b>2,21 ± 0 (1)</b>	0,6 ± 0,46 (2)	3,72 ± 0 (1)			
FRD1	(Brq) média ± DP (n°)					0,34 ± 0,21 (3)	<b>0,64 ± 0,36 (5)</b>					0,3 ± 0,17 (3)	
	(Fig) média ± DP (n°)					1,08 ± 0,3 (4)	2,09 ± 1,54 (5)					0,86 ± 0,62 (3)	

Ponto		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys sp. (Linguado)	Balistes capriscus (Peraó)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralanchurus brasiliensis (Maria Luíza)	Stellifer rastrifer (cabeçadoura)	Diplectrum radiale (Michole)	Lutjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
FRD3	(Brq) média ± DP (nº)	0,54 ± 0,11 (6)			0,86 ± 0,3 (3)	0,84 ± 0,55 (5)	0,54 ± 0,43 (6)						
	(Fig) média ± DP (nº)	1,15 ± 0,68 (5)		0,57 ± 0 (1)	0,97 ± 0,85 (3)	0,89 ± 0,68 (5)	0,97 ± 1,13 (6)						
FRD6	(Brq) média ± DP (nº)	0,57 ± 0,49 (6)			0,47 ± 0,35 (5)	0,47 ± 0,23 (5)					0,34 ± 0,28 (5)		
	(Fig) média ± DP (nº)	1,10 ± 0,68 (5)			1,87 ± 0,6 (6)	1,67 ± 0,92 (5)					0,68 ± 0,21 (4)		
FRD8	(Brq) média ± DP (nº)	0,65 ± 0,17 (3)	0,31 ± 0,21 (5)					0,52 ± 0,11 (5)					
	(Fig) média ± DP (nº)	1,18 ± 0,83 (3)	1,2 ± 0,38 (6)					1,75 ± 1,15 (5)					
FRD9	(Brq) média ± DP (nº)				0,58 ± 0,41 (3)	0,55 ± 0,46 (2)	1,03 ± 0,33 (5)						
	(Fig) média ± DP (nº)				2,24 ± 0,79 (4)	0,93 ± 1,07 (2)	1,83 ± 0,94 (2)						
FRD10	(Brq) média ± DP (nº)	0,79 ± 0,24 (4)			1,06 ± 1,24 (5)		0,6 ± 0,33 (5)						
	(Fig) média ± DP (nº)	0,94 ± 0,31 (4)			1,83 ± 1,19 (5)		0,39 ± 0,2 (5)						
DEG1	(Brq) média ± DP (nº)				1,03 ± 0 (1)								
	(Fig) média ± DP (nº)												
DEG2	(Brq) média ± DP (nº)	0,76 ± 0,75 (5)									0,39 ± 0,12 (3)		0,24 ± 0,14 (5)
	(Fig) média ± DP (nº)	3,15 ± 2,9 (2)									1,41 ± 0,26 (3)		2,75 ± 1,84 (4)
BN1	(Brq) média ± DP (nº)		0,54 ± 0,23 (5)								0,36 ± 0,12 (6)		
	(Fig) média ± DP (nº)		1,23 ± 0,92 (5)								1,05 ± 0,49 (4)		
BN2	(Brq) média ± DP (nº)							1,30 ± 0 (1)			0,6 ± 0,53 (5)		
	(Fig) média ± DP (nº)							0,45 ± 0 (1)			3,09 ± 0 (1)		
ITA1	(Brq) média ± DP (nº)				1,02 ± 0 (1)		0,55 ± 0,18 (3)						
	(Fig) média ± DP (nº)				1,96 ± 0 (1)		1,57 ± 1,02 (2)						

Fonte: Autoria própria.

O Quadro 8 apresenta a porcentagem de tecidos analisados que tiveram valores superiores à média global para os biomarcadores antioxidantes e de metabolismo energético, no ambiente marinho.

Quadro 8: Porcentagem das amostras de brânquia e fígado, coletados nos diferentes pontos amostrais do ambiente marinho, com destaque para os pontos classificados como acima da média global das enzimas CAT, LDH e MDH.

Pontos	Catalase		LDH		MDH	
	Brânquia	Fígado	Brânquia	Fígado	Brânquia	Fígado
GUA2	0,00	<b>100,00</b>	<b>50,00</b>	<b>50,00</b>	0,00	0,00
VIX1	0,00	20,00	27,78	19,05	0,00	<b>71,43</b>
VIX2	0,00	<b>100,00</b>	0,00	<b>100,00</b>	0,00	<b>100,00</b>
CA1	20,00	<b>100,00</b>	<b>63,64</b>	0,00	<b>70,00</b>	18,18
CA2	<b>60,00</b>	<b>71,43</b>	<b>54,55</b>	0,00	<b>54,55</b>	<b>100,00</b>
CA3	<b>100,00</b>	<b>100,00</b>	0,00	0,00	<b>100,00</b>	0,00
CA4	0,00	25,00	33,33	25,00	33,33	25,00
FRD1	<b>50,00</b>	0,00	25,00	36,36	<b>72,73</b>	<b>75,00</b>
FRD3	41,18	0,00	<b>68,18</b>	26,32	38,10	25,00
FRD6	<b>77,78</b>	<b>100,00</b>	47,83	<b>50,00</b>	<b>52,38</b>	25,00
FRD8	<b>55,56</b>	40,00	0,00	21,43	23,08	35,71
FRD9	<b>75,00</b>	<b>71,43</b>	36,36	0,00	<b>70,00</b>	<b>75,00</b>
FRD10	<b>75,00</b>	0,00	<b>66,67</b>	0,00	<b>100,00</b>	0,00
DEG1	0,00	0,00	<b>100,00</b>	0,00	<b>100,00</b>	0,00
DEG2	0,00	38,46	38,46	<b>64,29</b>	38,46	22,22
BN1	0,00	0,00	<b>50,00</b>	0,00	45,45	0,00
BN2	<b>100,00</b>	<b>83,33</b>	16,67	<b>83,33</b>	<b>100,00</b>	<b>50,00</b>
ITA1	<b>50,00</b>	<b>60,00</b>	25,00	<b>100,00</b>	25,00	<b>66,67</b>
GUA2	0,00	<b>100,00</b>	<b>50,00</b>	<b>50,00</b>	0,00	0,00
VIX1	0,00	20,00	27,78	19,05	0,00	<b>71,43</b>
VIX2	0,00	<b>100,00</b>	0,00	<b>100,00</b>	0,00	<b>100,00</b>

Fonte: Autoria própria.

Para as brânquias de peixes marinhos, nove (CA2, CA3, FRD1, FRD6, FRD8, FRD9, FRD10, BN2 e ITA1) dos 18 pontos apresentaram 50% ou mais de suas amostras com valores acima da média global para o biomarcador catalase.

As análises do tecido hepático mostraram o mesmo comportamento que as de brânquias, totalizando nove (GUA2, VIX2, CA1, CA2, CA3, FRD6, FRD9, BN2 e ITA1) dos 18 pontos com valores acima da média global.

A enzima do metabolismo energético LDH, no ambiente marinho para o tecido branquial resultou em sete (GUA2, CA1, CA2, FRD3, FRD10, DEG1 e BN1) dos 18 pontos com 50% ou mais das amostras com valores acima da média global, o que indica tendência na redução da enzima em brânquias.

Em tecido hepático do ambiente marinho, seis (GUA2, VIX2, FRD6, DEG2, BN2 e ITA1) dos 18 pontos apresentaram valores acima da média global. Demonstrando, portanto, que houve tendência de redução da enzima LDH no tecido.

Para a enzima MDH, os resultados demonstraram que nove (CA1, CA2, CA3, FRD1, FRD6, FRD9, FRD10, DEG1 e BN2) dos 18 pontos obtiveram 50% ou mais de amostras teciduais de brânquias com valores acima da média global. Portanto, não houve tendência de aumento ou redução da enzima no ambiente em questão.

No tecido hepático, sete (VIX1, VIX2, CA2, FRD1, FRD9, BN2 e ITA1) dos 18 pontos apresentaram valores acima da média global para MDH. Esse resultado demonstra tendência na redução da enzima no ambiente marinho.

### Histopatologia

As alterações de fígado e brânquia foram determinadas de acordo com o método proposto por Bernet e colaboradores (1999). Esse método baseia-se na relevância patológica e na extensão das lesões observadas nos órgãos analisados. As alterações foram classificadas em cinco padrões de reação e cada lesão possui um grau de importância (Quadro 9). No caso dos resultados das análises histopatológicas também foram calculados os valores médios em cada órgão de todos os indivíduos da mesma espécie, em cada ponto amostral. Adicionalmente, foram apresentados o desvio-padrão (DP) e o número de órgãos analisados de cada espécie.

Os valores médios de cada parâmetro, de cada ponto, foram comparados com a média global, sendo essa a média de cada parâmetro da mesma espécie em todos os pontos. Desta avaliação foram identificadas as espécies com índices médios acima e abaixo da média global. Com a classificação proposta pode-se perceber, para cada espécie, o contraste entre os pontos com maiores e menores valores médios em relação à média global. Para auxiliar na apresentação de alguns resultados, foram escolhidas as espécies de fundo e superfície mais frequentes em cada ambiente. Além disso, foram calculadas as frequências (%) de indivíduos que apresentaram parâmetros médios acima da média global.

Quadro 9: Classificação das alterações histopatológicas do fígado e brânquia quanto ao tipo de lesão e grau de importância de acordo com Bernet et. al (1999).

Alterações histopatológicas hepáticas e branquial	Grau importância
1. Distúrbios Circulatórios	I
Aneurisma	I
Congestão	I
Hemorragia	I
2. Mudanças Regressivas	I
Alterações citoplasmáticas	I
Inclusões citoplasmáticas	I
Descamação do epitélio	I

Alterações histopatológicas hepáticas e branquial	Grau importância
Deslocamento da lamela primária	I
Fusão das lamelas secundárias	I
Alterações nucleares	II
Atrofia	II
Necrose	III
3. Mudanças Progressivas	
Hipertrofia	II
Hiperfasia das células interlamelares	I
4. Inflamação	
Centro melanomacrófago	I
Infiltração de leucócitos	II
5. Tumor	
Benigno	II
Maligno	III

Fonte: Autoria própria.

O Índice do Órgão ( $I_{org}$ ) representa o grau de dano apresentado pelo órgão e foi calculado pela fórmula:  $I_{org} = \sum_{rp} \sum_{alt} (a \times w)$ , onde: rp = padrão de reação, alt = alteração, a = extensão da lesão e w = grau de importância. Já o Índice de Reação ( $I_{rp}$ ) avalia a gravidade das alterações identificadas e foi obtido pelo somatório do produto da multiplicação do tamanho da lesão pela relevância patológica ( $I_{rp} = \sum_{alt} (a \times w)$ , onde rp = padrão de reação, alt = alteração, a = extensão da lesão e w = grau de importância).

Os índices médios de lesões do fígado dos animais coletados no ambiente marinho (Tabela 27) foram superiores aos índices médios da brânquia, assim como verificado no ambiente dulcícola. A espécie *Eucinostomus gula* (carapicu) apresentou o maior índice global de lesão nas brânquias (26,2), enquanto que o *Diplectrum radiale* (michole) apresentou o maior índice global de lesões no fígado (43,6). A ocorrência de altos índices de lesões em ambos os órgãos foi identificada nas diferentes espécies coletadas nas estações amostrais da Foz do Rio Doce (FRD1, FRD3, FRD6, FRD8, FRD9, FRD10), CA1, DEG2 e ITA1). Considerando-se as espécies separadamente, os maiores índices de lesões identificados em ambos os órgãos para a espécie *Stellifer rastrifer* (cabeça dura) ocorrem nas estações amostrais CA1, ITA1, FRD1 e FRD9, para a *Cynoscion* sp. (pescadinha) nas estações FRD6 e FRD9 e para a *Diplectrum radiale* (michole) em FRD8. Desta forma, percebe-se que as espécies que foram coletadas tanto na foz quanto em estações mais distantes apresentam altos índices de lesões em ambos os órgãos estudados. O que indica uma ampla dispersão de poluentes e/ou a ocorrência de condições ambientais desfavoráveis em uma ampla extensão, que são lesivas a ictiofauna estudada. Os animais coletados nas estações GUA2, VIX2, CA2 e BN2 apresentaram altos índices de lesões nas brânquias, enquanto os animais coletados em VIX1 e CA3 apresentaram índices acima da média global no fígado. Os animais coletados na região da unidade de conservação Costa das Algas (CA4), que é um ponto distante da costa, apresentaram baixos índices de lesão, tanto para brânquia quanto para fígado.

Tabela 27: Índices médios de lesões dos órgãos e médias globais das espécies de peixes coletadas no ambiente marinho. Em cada estação amostral foram apresentados o desvio-padrão (DP) do índice de lesões e número de órgãos (nº) analisados. Médias de lesões acima da média global foram destacadas.

Ponto		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys spp. (Linguado)	Balistes caprisculus (Peraó)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralonchurus brasiliensis (Maria Luíza)	Stellifer rastrifer (cabeçadura)	Diplectrum radiale (Michole)	Luțjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
	nº total de tecidos (Brq)	30	26	1	30	36	42	9	2	1	21	3	6
	nº total de tecidos (Fig)	30	26	2	31	36	42	9	2	1	21	3	6
	Média global entre pontos (Brq)	20,3	18,0	12,0	21,3	18,6	17,1	15,6	4,5	13,0	19,5	22,0	26,2
	Média global entre pontos (Fig)	29,7	30,3	30,5	25,2	26,4	30,5	43,6	32,0	34,0	31,8	30,7	35,5
GUA2	(Brq) média ± DP (nº)		23 ± 19 (3)			19,5 ± 19,9 (4)							
	(Fig) média ± DP (nº)		19 ± 19 (3)			25,3 ± 20,6 (4)							
VIX1	(Brq) média ± DP (nº)	15,3 ± 12,6 (4)			9,7 ± 5,4 (6)	11,2 ± 6,9 (6)	9,8 ± 7,1 (5)						
	(Fig) média ± DP (nº)	20,3 ± 12,3 (4)			32,8 ± 9,7 (6)	27,7 ± 11,6 (6)	24,8 ± 9,8 (5)						
VIX2	(Brq) média ± DP (nº)		19 ± 2,6 (3)										
	(Fig) média ± DP (nº)		26 ± 13 (3)										
CA1	(Brq) média ± DP (nº)			12 ± 0 (1)	38 ± 0 (1)	21,7 ± 15 (6)	18,3 ± 15,4 (4)						
	(Fig) média ± D (nº)			21 ± 0 (1)	11 ± 0 (1)	36,7 ± 7,6 (6)	31,3 ± 9 (4)						
CA2	(Brq) média ± DP (nº)		20,7 ± 12,5 (6)				10,7 ± 13,7 (6)						
	(Fig) média ± DP (nº)		29,7 ± 12,7 (6)				23,8 ± 17,1 (6)						
CA3	(Brq) média ± DP (nº)		8,5 ± 6,4 (2)										
	(Fig) média ± DP (nº)		39 ± 1,4 (2)										
CA4	(Brq) média ± DP (nº)							13 ± 0 (1)	4,5 ± 6,4 (2)	13 ± 0 (1)			
	(Fig) média ± DP (nº)							42 ± 0 (1)	32 ± 0 (2)	34 ± 0 (1)			
FRD1	(Brq) média ± DP (nº)					18,5 ± 5,3 (4)	19 ± 8,6 (6)					22 ± 14 (3)	
	(Fig) média ± DP (nº)					23,5 ± 19,8 (4)	33,8 ± 9,6 (6)					30,7 ± 10,1 (3)	
FRD3	(Brq) média ± DP (nº)	21,3 ± 10,7 (6)			22,7 ± 5,5 (3)	20,7 ± 9,6 (6)	25 ± 18,8 (6)						
	(Fig) média ± DP (nº)	38,7 ± 7,3 (6)		40 ± 0 (1)	25 ± 18,5 (4)	34,3 ± 8,5 (6)	27,5 ± 18 (6)						
FRD6	(Brq) média ± DP (nº)	15,3 ± 18,7 (6)			26,5 ± 15,3 (6)	9,3 ± 7,5 (6)					17,3 ± 9,5 (6)		

Ponto		Conodon nobilis (Roncador)	Paralichthys spp. (Linguado)	Balistes capriscus (Peroá)	Cynoscion sp. (Pescadinha)	Paralonchurus brasiliensis (Maria Luíza)	Stellifer rastrifer (cabeçadura)	Diplectrum radiale (Michole)	Lutjanus sp. (Pargo Rosa)	Triacanthus Arenatus (Olho de vidro)	Chorroscombrus chrysurus (Palombeta)	Genidens genidens (Bagre)	Eucinostomus gula (Carapicu)
	(Fig) média ± DP (n°)	19,7 ± 15,9 (6)			28,3 ± 11,9 (6)	12,3 ± 17,2 (6)					32,5 ± 17,3 (6)		
FRD8	(Brq) média ± DP (n°)	14,7 ± 3,1 (3)	20 ± 13 (6)					16,8 ± 15,6 (6)					
	(Fig) média ± DP (n°)	26,3 ± 11,2 (3)	34 ± 8,9 (6)					45,8 ± 4,6 (6)					
FRD9	(Brq) média ± DP (n°)				27 ± 20,5 (5)	29,5 ± 11,9 (4)	21,5 ± 22,7 (6)						
	(Fig) média ± DP (n°)				30,2 ± 9,1 (5)	25,3 ± 15,6 (4)	33,2 ± 18 (6)						
FRD10	(Brq) média ± DP (n°)	35,2 ± 10,2 (5)			11,5 ± 13,1 (6)		12,8 ± 9 (6)						
	(Fig) média ± DP (n°)	44,4 ± 8,7 (5)			28,5 ± 11,3 (6)		32 ± 9,2 (6)						
DEG1	(Brq) média ± DP (n°)				10 ± 0 (1)								
	(Fig) média ± DP (n°)				21 ± 0 (1)								
DEG2	(Brq) média ± DP (n°)	20 ± 13,1 (6)									22 ± 6,6 (3)		26,2 ± 12,5 (6)
	(Fig) média ± DP (n°)	28,8 ± 12,2 (6)									38,3 ± 5,5 (3)		35,5 ± 15 (6)
BN1	(Brq) média ± DP (n°)		16,8 ± 8,8 (6)								22 ± 21 (6)		
	(Fig) média ± DP (n°)		34,2 ± 12,3 (6)								25,8 ± 20,2 (6)		
BN2	(Brq) média ± DP (n°)							17 ± 9,9 (2)			16,8 ± 15,9 (6)		
	(Fig) média ± DP (n°)							43 ± 1,4 (2)			30,3 ± 18,2 (6)		
ITA1	(Brq) média ± DP (n°)				25 ± 5,7 (2)		19,7 ± 14,6 (3)						
	(Fig) média ± DP (n°)				24,5 ± 4,9 (2)		38 ± 14,8 (3)						

Fonte: Autoria própria.

As médias dos índices de reações dos animais de superfície e de fundo mais frequente coletados no ambiente marinho foram apresentadas no Quadro 10. O índice de reação de mudanças regressivas foi maior nas duas espécies avaliadas. Nesse grupo de alterações encontram-se lesões com grau II e III de importância (Bernet et al., 1999), como necroses, alterações nucleares e atrofia. Portanto, os altos valores encontrados nesse índice contribuíram para o alto índice de lesões do fígado e brânquia dessas espécies.

Quadro 10: Índices médios de reações dos peixes mais frequentes no ambiente marinho.

Ambiente	Espécie	Índice Reação Circulatório		Índice Reação Regressiva		Índice Reação Progressiva		Índice Reação Inflamação		Índice Reação Tumor	
		Brq	Fíg	Brq	Fíg	Brq	Fíg	Brq	Fíg	Brq	Fíg
Mar	<i>Chloroscombrus chrysurus</i>	1,5	5,0	14,1	22,3	2,8	0,9	0,9	2,6	0,0	0,0
	<i>Stellifer rastrifer</i>	1,8	5,1	7,3	21,7	3,1	0,3	3,2	3,0	1,0	0,0

Fonte: Autoria própria.

As alterações histopatológicas mais frequentes encontradas nos fígados dos peixes marinhos (Tabela 28) foram: necrose, infiltrado inflamatório, congestão de vaso, alterações nucleares, hemorragia, alterações citoplasmáticas (vacuolização e esteatose), hipertrofia dos hepatócitos, parasitas, centro de melanomacrófagos, inclusões citoplasmáticas, atrofia, tumores benigno e maligno. Nas brânquias foram identificadas as seguintes lesões mais frequentes (Tabela 29): aneurisma, descamação do epitélio, deslocamento da lamela primária, fusão das lamelas secundárias, atrofia da lamela primária, atrofia da lamela secundária, necrose, hipertrofia da célula de muco, hiperplasia das células interlamelares, infiltrado inflamatório, tumores benignos e malignos. Estas patologias parecem constituir uma resposta comum em peixes de ambientes aquáticos degradados ou em testes em laboratório onde se utiliza metais e agrotóxicos (Gundersen et al., 2000; Paris-Palacios et al., 2000; Schwaiger, 2001).

Tabela 28: Frequência (%) de alterações morfológicas no fígado de peixes coletados em diferentes estações amostrais do ambiente marinho.

Lesões hepáticas (%)	Pontos Amostrais Marinho																
	GUA2	VIX1	VIX2	CA1	CA2	CA3	CA4	FRD1	FRD3	FRD6	FRD8	FRD9	FRD10	BN1	BN2	ITA1	Média
<b>Distúrbios Circulatórios</b>																	
Hemorragia	83	75	67	<u>100</u>	73	50	75	<u>100</u>	<u>95</u>	<u>85</u>	<u>93</u>	79	76	<u>100</u>	<u>100</u>	80	84
Congestão	17	<u>42</u>	33	<u>42</u>	9	<u>50</u>	25	<u>46</u>	<u>43</u>	30	<u>73</u>	<u>43</u>	<u>53</u>	<u>60</u>	29	0	37
<b>Mudanças Regressivas</b>																	
Alterações Citoplasmáticas	33	62	<u>67</u>	58	45	<u>100</u>	50	38	48	<u>65</u>	<u>93</u>	<u>71</u>	<u>71</u>	<u>90</u>	57	60	63
Inclusões Citoplasmáticas	<u>50</u>	4	0	0	0	0	0	0	0	<u>10</u>	0	0	0	0	0	0	4
Alterações Nucleares	67	58	67	<u>83</u>	<u>100</u>	50	<u>75</u>	<u>92</u>	<u>81</u>	70	67	<u>100</u>	<u>76</u>	70	57	<u>80</u>	74
Atrofia	<u>17</u>	4	0	<u>17</u>	<u>17</u>	0	0	0	<u>24</u>	5	<u>13</u>	<u>14</u>	0	<u>20</u>	<u>14</u>	0	9
Necrose	50	62	67	67	73	<u>100</u>	<u>100</u>	54	<u>81</u>	65	0	<u>79</u>	<u>76</u>	<u>90</u>	<u>100</u>	<u>80</u>	73
<b>Mudanças Progressivas</b>																	
Hipertrofia dos Hepatócitos	<u>17</u>	4	0	0	<u>18</u>	0	0	<u>31</u>	<u>19</u>	5	0	7	<u>12</u>	<u>20</u>	<u>14</u>	0	9
<b>Inflamação</b>																	
Centro de Melanomacrófagos	0	4	0	<u>17</u>	<u>27</u>	0	<u>50</u>	8	0	0	0	0	6	0	0	<u>20</u>	8
Infiltrado de Leucócitos	50	58	33	58	45	<u>100</u>	50	<u>69</u>	48	55	40	<u>71</u>	53	50	<u>71</u>	<u>100</u>	60
<b>Tumor</b>																	
Benigno	<u>17</u>	<u>4</u>	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<u>14</u>	0	3
Maligno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<u>6</u>	0	0	0	<1
<b>Parasitas</b>	0	8	0	<u>25</u>	<u>27</u>	0	<u>25</u>	<u>31</u>	<u>14</u>	10	0	<u>29</u>	<u>29</u>	0	0	<u>20</u>	13

Fonte: Autoria própria.

Tabela 29: Frequência (%) de alterações morfológicas nas brânquias de peixes coletados em diferentes estações amostrais do ambiente marinho.

Lesões Branquiais (%)	Pontos Amostrais Marinho																
	GUA2	VIX1	VIX2	CA1	CA2	CA3	CA4	FRD1	FRD3	FRD6	FRD8	FRD9	FRD10	BN1	BN2	ITA1	Média
<b>Distúrbios Circulatórios</b>																	
Aneurisma	43	33	<u>100</u>	<u>73</u>	56	50	<u>67</u>	<u>69</u>	<u>65</u>	<u>59</u>	<u>86</u>	<u>71</u>	<u>65</u>	36	57	40	57
<b>Mudanças Regressivas</b>																	
Descamação de epitélio	43	42	<u>100</u>	27	<u>56</u>	50	33	<u>61</u>	48	50	<u>64</u>	50	53	<u>91</u>	<u>86</u>	<u>80</u>	55
Deslocamento da lamela primária	0	<u>12</u>	<u>33</u>	<u>18</u>	<u>22</u>	<u>50</u>	0	0	4	4	0	7	6	0	0	0	9
Fusão da Lamela secundária	<u>29</u>	8	<u>67</u>	9	<u>33</u>	<u>50</u>	<u>33</u>	23	<u>30</u>	<u>27</u>	21	14	18	9	<u>43</u>	0	24
Atrofia da Lamela primária	14	17	0	0	<u>22</u>	0	<u>33</u>	0	17	<u>27</u>	<u>21</u>	<u>29</u>	18	<u>27</u>	<u>29</u>	<u>60</u>	<u>19</u>
Atrofia da Lamela secundária	<u>29</u>	8	<u>33</u>	0	22	0	0	8	<u>22</u>	<u>36</u>	7	<u>21</u>	12	<u>36</u>	0	<u>40</u>	<u>16</u>
Necrose	<u>29</u>	12	0	27	11	0	0	<u>31</u>	13	<u>14</u>	0	<u>29</u>	6	9	<u>14</u>	<u>20</u>	<u>13</u>
<b>Mudanças Progressivas</b>																	
Hipertrofia da célula de muco	<u>29</u>	4	<u>33</u>	<u>36</u>	<u>67</u>	0	0	8	<u>22</u>	9	<u>29</u>	7	<u>23</u>	<u>36</u>	0	0	18
Hiperplasia das células interlamelares	<u>57</u>	<u>46</u>	33	<u>73</u>	33	0	0	<u>46</u>	<u>74</u>	<u>64</u>	36	<u>64</u>	<u>53</u>	<u>45</u>	<u>86</u>	20	43
<b>Inflamação</b>																	
Infiltração	<u>29</u>	17	0	<u>64</u>	0	0	<u>33</u>	<u>38</u>	<u>35</u>	4	14	<u>71</u>	<u>41</u>	9	14	0	22
<b>Tumor</b>																	
Benigno	<u>14</u>	4	0	<u>27</u>	<u>11</u>	0	0	<u>23</u>	<u>9</u>	<u>14</u>	0	<u>14</u>	6	0	0	0	7
Maligno	0	0	0	0	0	0	0	0	0	<u>4</u>	0	0	<u>6</u>	0	0	0	<1
<b>Parasitas</b>	29	21	0	<u>45</u>	<u>89</u>	<u>50</u>	33	<u>38</u>	<u>39</u>	<u>45</u>	29	<u>50</u>	<u>41</u>	<u>55</u>	29	20	36

Fonte: Autoria própria.

No ambiente marinho, a lesão hepática mais frequente foi a hemorragia (Figura 6F). Essa patologia pode ser causada por lesão do endotélio devido a infecções, inflamação ou necrose (Abalaka et al., 2015). Alterações nucleares, segunda alteração mais frequente nas espécies marinhas, são decorrentes de mudanças no formato do núcleo e na estrutura da cromatina. São classificadas como lesão de grau de importância II, podendo ocasionar redução ou perda de função do órgão. As alterações citoplasmáticas foram identificadas como esteatose hepática (Figura 6G) e vacuolização. As inclusões citoplasmáticas, caracterizadas pelo acúmulo de substâncias derivadas dos processos degenerativos no interior das células, também foram observadas no fígado dos animais marinhos (Figura 7D).

A hipertrofia de hepatócitos (Figura 7H) é caracterizada pelo aumento do volume destas células (Thomson, 1978). Já a atrofia é a redução no número ou volume das células ou volume extracelular. Ambas alterações refletem o estado funcional do fígado e são notavelmente diferentes em estados hiper ou hipofuncionais. A hipertrofia celular ou nuclear indica a grande atividade da célula em decorrência da presença de algum composto químico ou ausência de alguma substância (Meyer & Hendricks, 1985; Hinton et al., 1992; Hibiya, 1995) e pode resultar em necrose (Fanta et al., 2003; Takashima & Hibiya, 1995). Foi observada a presença de tumores em baixa frequência em algumas espécies. Os tumores benignos (Figura 7F) apresentam células diferenciadas, porém parecidas com as normais, que substituem ou deslocam o tecido original, enquanto os tumores malignos (Figura 7G) possuem células pouco diferenciadas, de rápida multiplicação, que invadem e destroem os tecidos. As lesões neoplásicas são consideradas alterações graves e irreversíveis (grau de importância III) e estão correlacionadas com exposições crônicas a poluentes (Bernet et al., 1999; Liebel et al., 2013).

A morfologia das brânquias dos peixes marinhos apresentou estruturas similares já descritas na literatura para os peixes teleósteos. O aneurisma nas lamelas secundárias (Figura 8A), alteração mais frequente nas brânquias dos animais e, resulta no acúmulo de eritrócitos e morte das células dos pilares, levando a perda da integridade estrutural da lamela. Pode estar associado a traumas físicos e químicos em resposta aguda a agentes estressores ambientais (Lopes et al. 2005; Liebel et al., 2013).

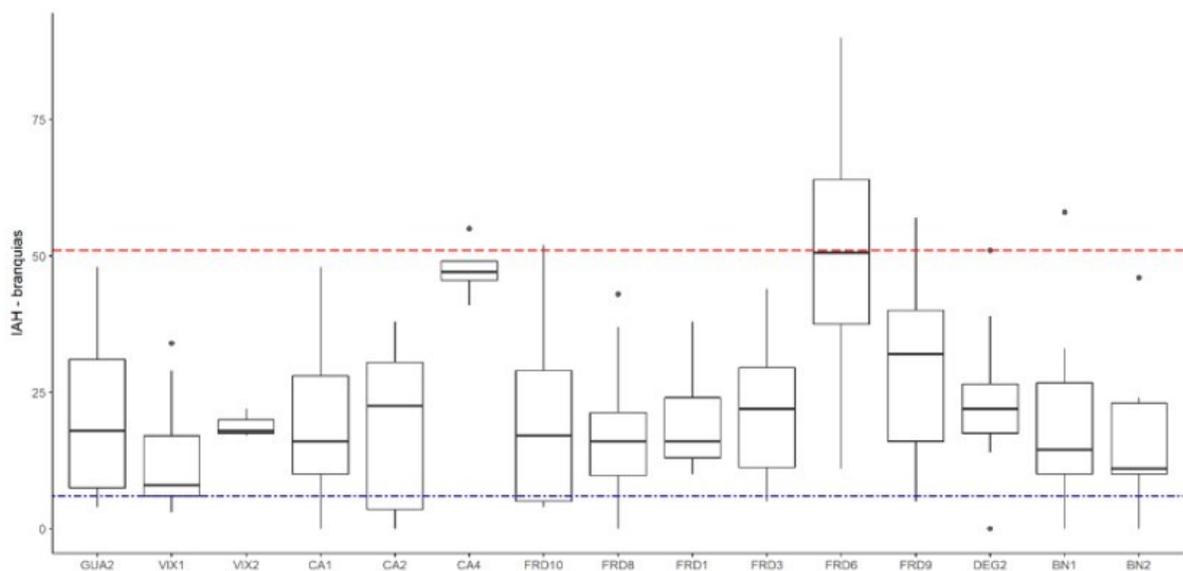
Foram observados deslocamento (Figura 9B), descamação (Figura 8B) e hiperplasia (Figura 8C) no epitélio lamelar. Essas lesões podem ser desencadeadas por estresse químico, causando disfunção respiratória por afetar as trocas gasosas devido à redução da superfície do epitélio respiratório e também provocar distúrbios osmorregulatórios (Campos, 2007; Zeni, 2016).

A presença de células leucocitárias nas lamelas (Figura 8C), lesão de grau de importância II, sugere a ocorrência de processo inflamatório no tecido branquial (Bernet et al., 1999; Campos, 2007; Zeni, 2016). No epitélio lamelar secundário foram observadas áreas necrosadas. A necrose afeta o órgão de forma severa e irreversível (Figura 8F). A hipertrofia das células de muco pode indicar que está ocorrendo hipersecreção de muco na tentativa de proteger as brânquias de agentes tóxicos, podendo levar à redução funcional ou perda de função do órgão. Santos (2009) e Lopes e colaboradores (2005) associam infiltrado inflamatório, necrose e hipertrofia das células de muco à presença de metais pesados e poluentes orgânicos.

A infestação parasitária (Figura 8D) observada no o tecido branquial dos peixes pode ser uma resposta a estímulos estressores do ambiente e pode desencadear futuras infecções secundárias, embora esse órgão possua mecanismos de defesa parasitária (Zanolo & Yamamura, 2006). A atrofia do epitélio lamelar (lamela primária e secundária) (Figura 9A), classificada com grau de importância II, caracteriza-se pela diminuição do número e/ou volume extracelular. Essa alteração está associada à presença de parasitas que podem causar atrofia compressiva das brânquias (Thatcher & Brites-Neto, 1994; Bernet et al, 1999).

O Índice de Alteração Histológica (IAH) das brânquias de todas as espécies coletadas em cada estação amostradas foram agrupados para a visualização de respostas gerais dos peixes (Figura 39).

Figura 39: Índice de Alteração Histológica da brânquia de peixes coletados na campanha I. As estações amostrais estão dispostas da esquerda para a direita seguindo os sentidos Sul-Norte e costeiro-marinho. Valores de IAH acima do indicado pela linha azul (10) são indicativos de dano leve a moderado; Valores acima da linha vermelha (50) são indicativos de dano severo ao tecido.



Fonte: Autoria própria.

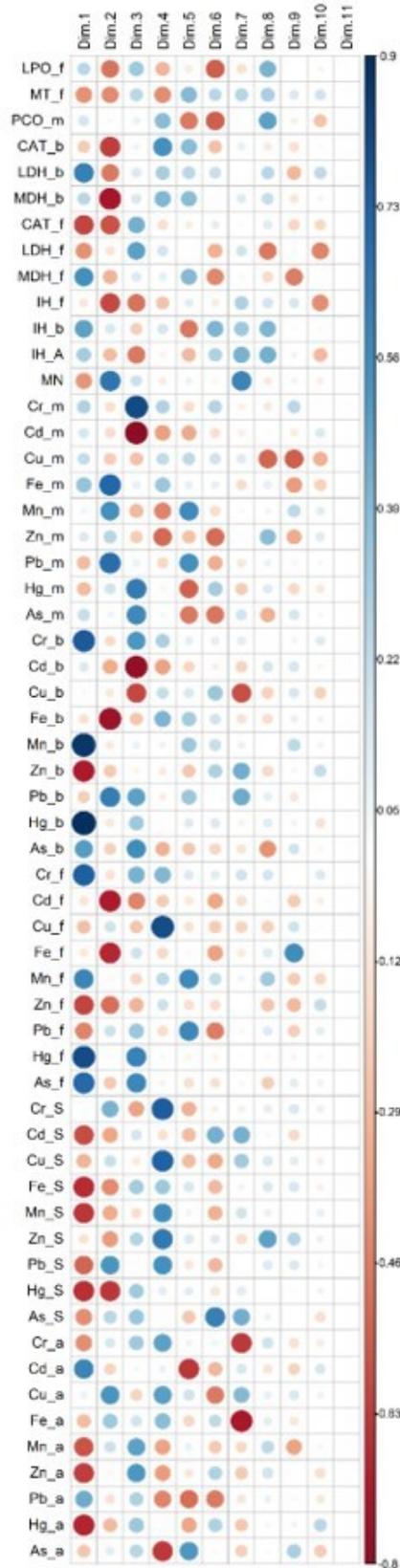
### Análise integrada

Para diminuir a dimensionalidade dos dados, uma Análise de Componentes Principais (PCA) foi realizada com dados de efeitos biológicos e bioacumulação de metais em peixes, assim como com os dados de contaminação no ambiente.

Os resultados descritos a seguir se referem-se ao agrupamento de todos os peixes coletados ao longo da Campanha I- Estação Seca (Figura 40). Os dois primeiros eixos da PCA captaram 37% da variação total. Cr, Fe, Mn e Hg nos tecidos tiveram uma expressiva correlação positiva com o primeiro componente, que explicou 21.4% da variância. No lado oeste do componente principal, se agruparam variáveis relacionadas ao Pb, assim como as variáveis determinadas na água e sedimento.



Figura 41: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente.



Fonte: Autoria própria.

### 3.2.6 Unidades de Conservação

Dentre as 25 estações amostrais contempladas pelo Anexo I do PMBA, 8 estão localizadas na área de unidades de conservação brasileiras. As Unidades de conservação contempladas no Monitoramento Ambiental Marinho do Anexo I são: a. Área de Proteção Ambiental de Setiba (Guarapari, ES), b. Refugio de Vida Silvestre de Santa Cruz (Fundão, ES), c. Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (Serra, ES), d. Reservas Indígenas de Comboios e Tupiniquim (Aracruz, ES), e. Parque Estadual de Itaúnas (Conceição da Barra, ES), f. Reserva Extrativista de Cassurubá, g. Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (Caravelas, BA) e h. Parque Nacional Marinho de Abrolhos (BA). As estações amostrais da área de Guarapari, GUA1 e GUA 2, estão localizadas dentro da Área de Proteção Ambiental de Setiba, não tendo sido observados impactos significativos nestas estações.

A região de Abrolhos abriga o maior sistema recifal do Atlântico Sul (Castro e Pires, 1999). O Anexo 1 monitora 4 estações amostrais dentro desta área, sendo estas: ABR01 (Reserva Extrativista de Cassurubá), ABR02 (Parque Nacional Marinho de Abrolhos), ABR04 (Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia) e ABRC1 (fora de unidades de conservação). O arrasto de fundo, principal arte de pesca utilizada pelo Anexo I, é proibido em recifes de coral e por isso nestas estações amostrais não foram coletados peixes e camarões. Além disso, espécies fototróficas calcificadoras são as principais representantes deste ecossistema, o que justifica a coleta de espécies de coral, hidrocoral e do plâncton como únicos bioindicadores nestes pontos amostrais.

Fragmentos de 6 colônias do coral *Mussismilia harttii* e do hidrocoral *Millepora alcicornis* foram coletados via mergulho autônomo em 3 recifes ao sul do Parque Nacional Marinho de Abrolhos e em um ponto ao norte do parque. O ponto ao norte é considerado como recife “controle” por estar localizado a uma distância maior de possíveis rotas de dispersão dos sedimentos oriundos do rompimento da barragem de Fundão – Mariana (MG). No entanto, cabe ressaltar que não existe evidência suficiente de que essa estação amostral não sofreu influência da pluma de sedimentos decorrente do rompimento da barragem.

Os resultados de efeito biológico (atividade de enzimas relacionadas à fotossíntese e calcificação - Anidrase carbônica,  $Ca^{2+}$ - e  $Mg^{2+}$ -ATPase; e análise de dano oxidativo - LPO) foram integrados com dados de contaminação ambiental por metal (água e sedimento) em uma Análise de Componentes Principais (PCA). Dados de acumulação de metais nesses organismos ainda estão em processamento e por esse motivo não foram incorporados à análise.

Os resultados de biomarcadores obtidos a partir de amostras de *Mussismilia harttii* e *Millepora alcicornis* foram agrupados na categoria “corais”. A PCA para este grupo (Figura 42) explicou 75,1% da variância total. O componente 1, responsável por 49,1% da variância, separou principalmente as variáveis mensuradas no sedimento das mensuradas na água. No lado positivo do segundo componente, níveis de lipoperoxidação em *M. alcicornis* aumentam de forma associada à concentração de Cr, Cd, Fe e Zn no sedimento, e também ao nível de Pb na água. As enzimas envolvidas na calcificação para *M. alcicornis* se agruparam no lado negativo do segundo componente (Figura 43).

Figura 42: Análise de Componentes Principais (PCA) realizada com as concentrações totais de ferro (Fe), manganês (Mn), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), zinco (Zn), As (arsênio), mercúrio (Hg) e chumbo (Pb) na água de fundo (FT), no sedimento (S), e biomarcadores de dano lipídico (LPO), Ca<sup>2+</sup>-ATPase (CaATP), Mg<sup>2+</sup>-ATPase (MgATP), atividade da anidrase carbônica (AC) em amostras de corais e hidrocorais. A escala de cores representa a importância de cada uma das variáveis para a explicação de cada componente principal.

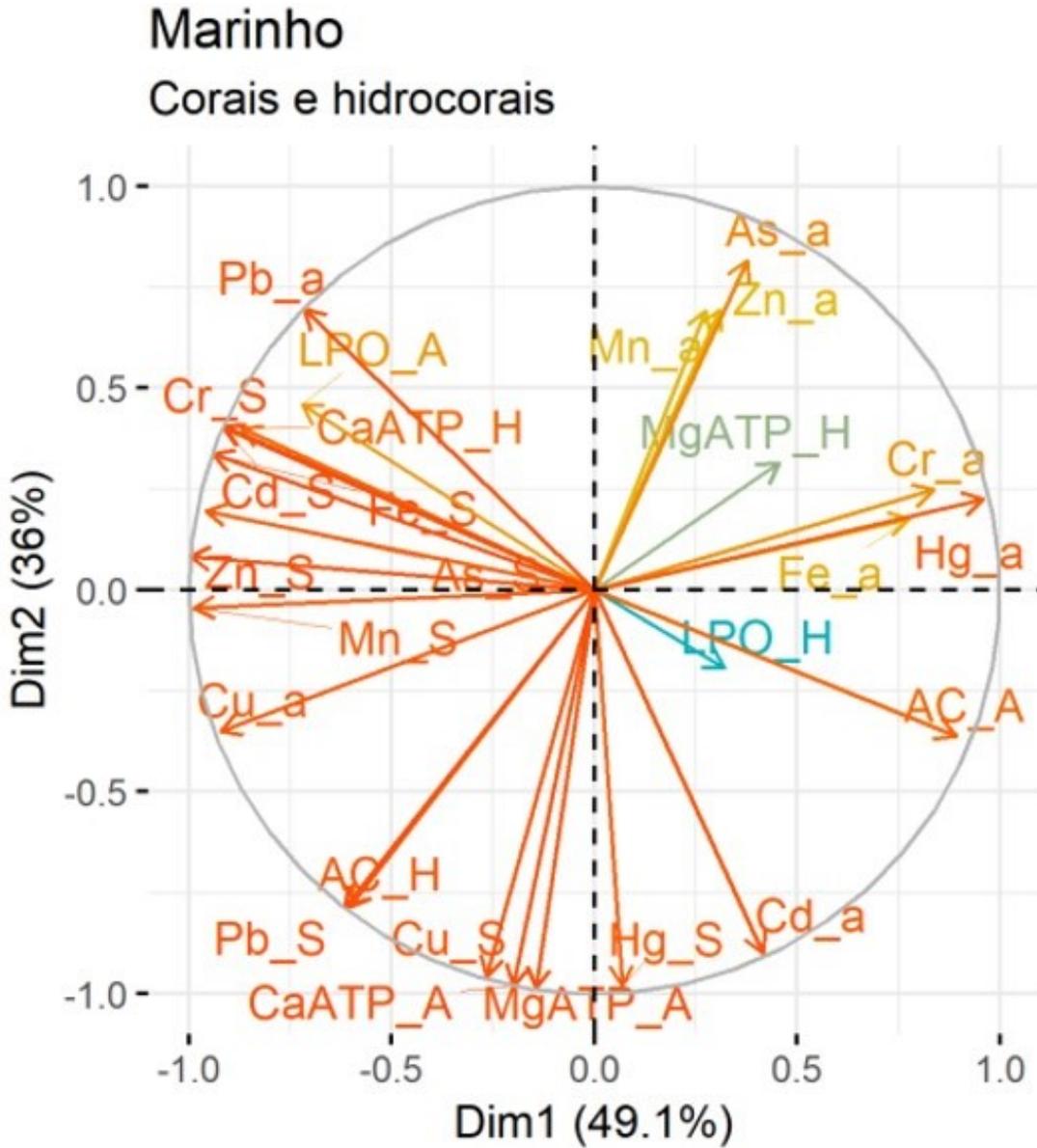
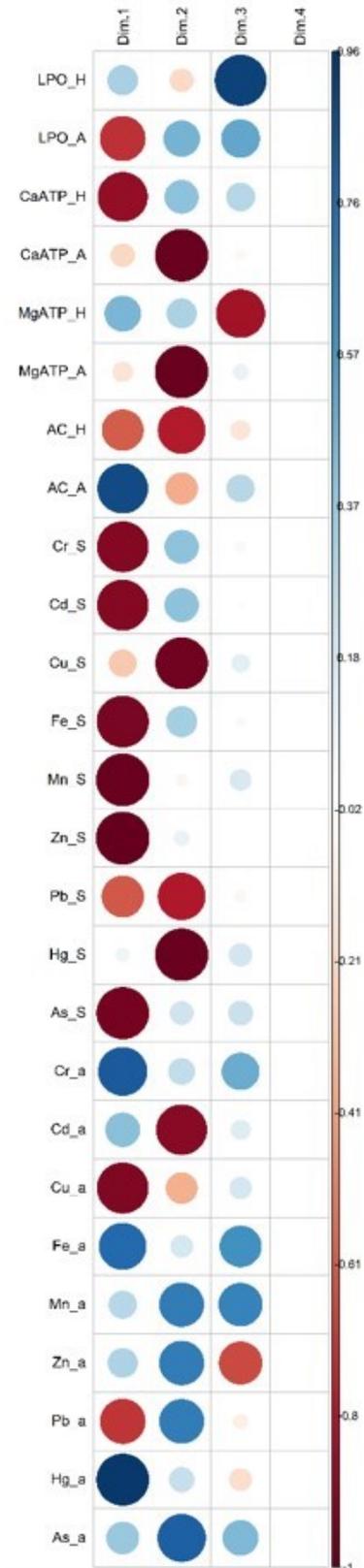


Figura 43: Painel de correlação de cada variável com os componentes principais (Dim1 e Dim2), extraídos da PCA. O tamanho dos círculos representa o grau de correlação de cada variável para determinado componente individual e a escala de cores representa o quão positivamente (azul) ou negativamente (vermelho) a variável está associada com cada componente.



Fonte: Autoria própria.

Observa-se um padrão na posição e direcionamento das variáveis contempladas na PCA, com valor crescente de dano oxidativo associado a valores crescentes de diversos metais. O dano oxidativo em lipídios (LPO) é um clássico marcador de estresse ambiental e dano biológico direto (Lushchak, 2011; Oakes and Kraak, 2003), o qual já foi associado a efeitos populacionais em espécies bioindicadoras da saúde de recifes de coral (Marques et al., 2019; Prazeres et al., 2012).

Apesar das associações observadas na PCA serem fortes (considerando os parâmetros extraídos da PCA) e alertarem para a relação entre metais e dano oxidativo, os níveis de LPO não diferiram entre estações amostrais da mesma forma como observado em campanhas realizadas em 2016 (Bianchini et al., 2016; Bianchini, 2019). Além disso, a concentração ambiental de metais na região diminuiu, em comparação com os encontrados para a região em campanhas anteriores.

A média de Cu dissolvido na água na região de Abrolhos, neste estudo, foi de 0,32 a 2,13  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Trabalhos avaliando o efeito fisiológico do cobre no coral *Mussismilia harttii* não encontraram efeito significativo nos níveis de LPO nem na atividade das enzimas envolvidas na calcificação (Anidrase carbônica e  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase) em corais expostos a até 6,7  $\mu\text{g Cu L}^{-1}$  (Marangoni et al., 2017). No entanto, esses mesmos autores relataram danos oxidativos em DNA como marcador mais sensível, e que também indica maior risco para a saúde organismal.

Um estudo anterior que tratou de organismos calcificadores com endossimbiontes (Prazeres et al., 2011) detectou dano oxidativo em lipídios em foraminíferos expostos a concentrações de Zn maiores que 68  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , enquanto que nesta campanha os níveis de Zn na água em Abrolhos não passaram de 47,04  $\mu\text{g.L}^{-1}$ . Esses dados da literatura justificam a ausência de fortes danos em DNA em corais coletados nesta campanha amostral, em comparação com campanhas anteriores realizadas em colaboração com o ICMBio.

A associação entre efeitos biológicos e a concentração de metais observada na PCA chama atenção para os riscos que a contaminação por metais representa para o sistema recifal de Abrolhos. Nesta campanha, efeitos biológicos não foram detectados de forma tão marcada em corais, tal qual visto em expedições anteriores. Esse resultado está relacionado à diminuição dos níveis de metais na região após 3 anos da chegada da lama em ambiente marinho. No entanto, o monitoramento destas Unidades de Conservação deve ser mantido ativo e constante, uma vez que a ressuspensão de sedimentos da Foz do Rio Doce associado a eventos climáticos e oceanográficos que favoreçam o transporte de sedimentos para o sul da Bahia, como já observado anteriormente (Bianchini, 2019), pode causar efeitos tóxicos agudos em corais e hidrocorais e em outras espécies chave de recifes de coral.

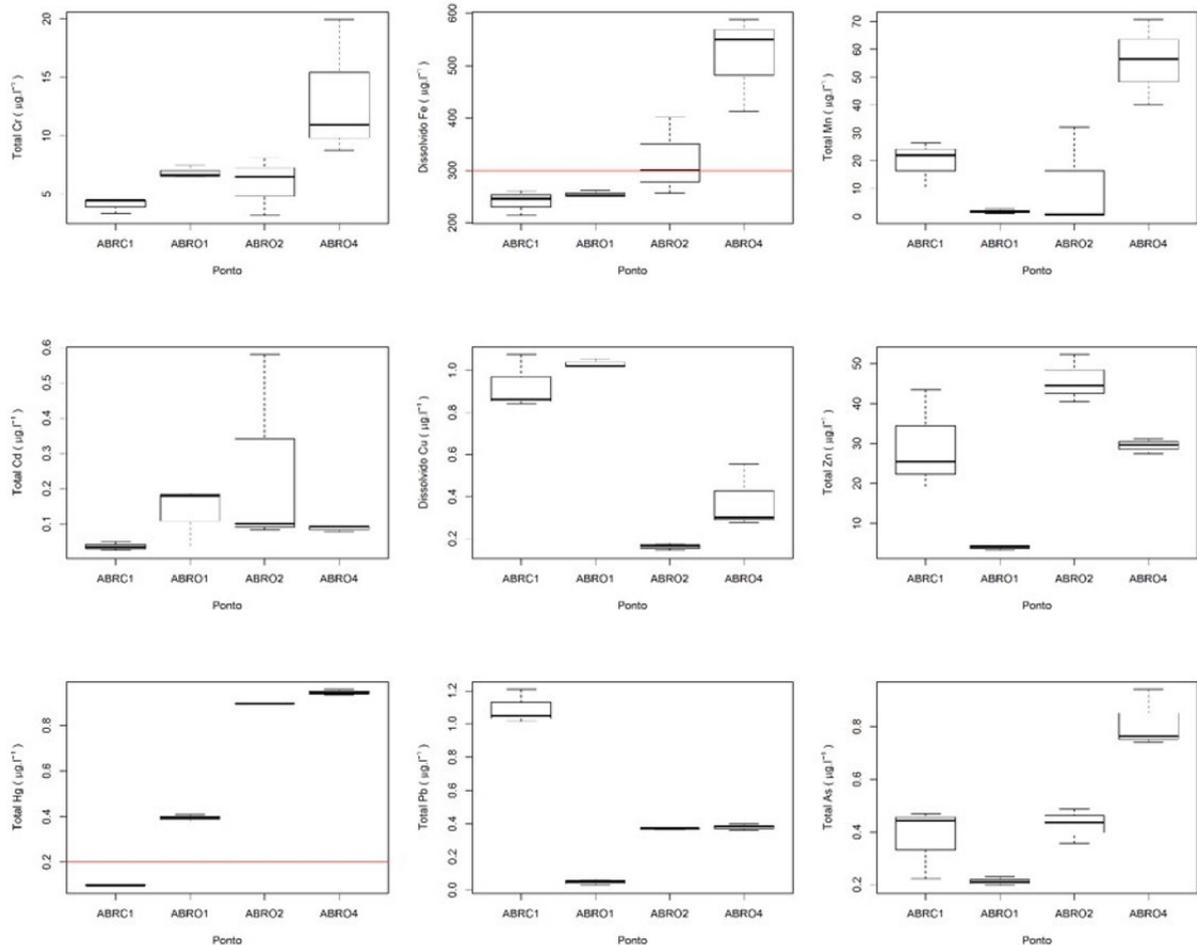
Para uma avaliação mais completa do impacto ambiental no PNMA, resultados já apresentados neste relatório serão explorados com mais detalhe, enfocando a região de interesse. A figura a seguir (Figura 44) representa um recorte de dados apresentados nas seções anteriores deste relatório. As concentrações de Cr, Fe, Mn, Cd, Cu, Zn, Pb, Hg e As na água são apresentados para os pontos localizados dentro ou próximo ao Parque Marinho Nacional de Abrolhos. Como já relatado anteriormente, os níveis de Fe e de Hg na água estão acima do limite aceitável para a conservação da

biodiversidade marinha, de acordo com o CONAMA 357. Estes resultados indicam que, apesar de não apresentarem níveis altamente tóxicos de metais, nenhum dos recifes amostrados pode ser considerado prístino.

Considerando a literatura nacional e internacional, espera-se que recifes mais próximos à costa, e consequentemente mais expostos à drenagem continental, apresentem maiores níveis de metais na água (Costa Junior et al., 2006; Fabricius, 2005; Marques et al., 2019). Espera-se, ainda, que metais comumente associados ao esgoto doméstico e a atividades agrícolas, como Cu, Zn e Pb, marquem um gradiente espacial de influência da drenagem continental em recifes (Jones, 2010; Machado et al., 2016; Marques et al., 2019; Prazeres et al., 2012; Rocha et al., 2017). No entanto, as estações amostrais mais distantes da costa e localizadas próximas ao Arquipélago de Abrolhos apresentaram concentrações de Cr, Fe, Mn, Zn e Hg maiores do que as estações mais costeiras e teoricamente mais expostas à contaminação pelo continente. A alta contaminação por Fe, seguida do perfil de contaminação do Cr e do Mn, sugerem que este padrão espacial de contaminação esteja associado à influência do rompimento da barragem (Queiroz et al., 2018).

Esses resultados indicam que a qualidade da água nas Unidades de Conservação da região de Abrolhos está degradada por metais. Considerando que estações amostrais próximas e mais distantes do continente foram amostradas, e que um claro padrão de contaminação foi observado entre recifes costeiros e recifes oceânicos, conclui-se que o Parque Nacional Marinho de Abrolhos e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia sofrem influência de material proveniente de atividades de mineração.

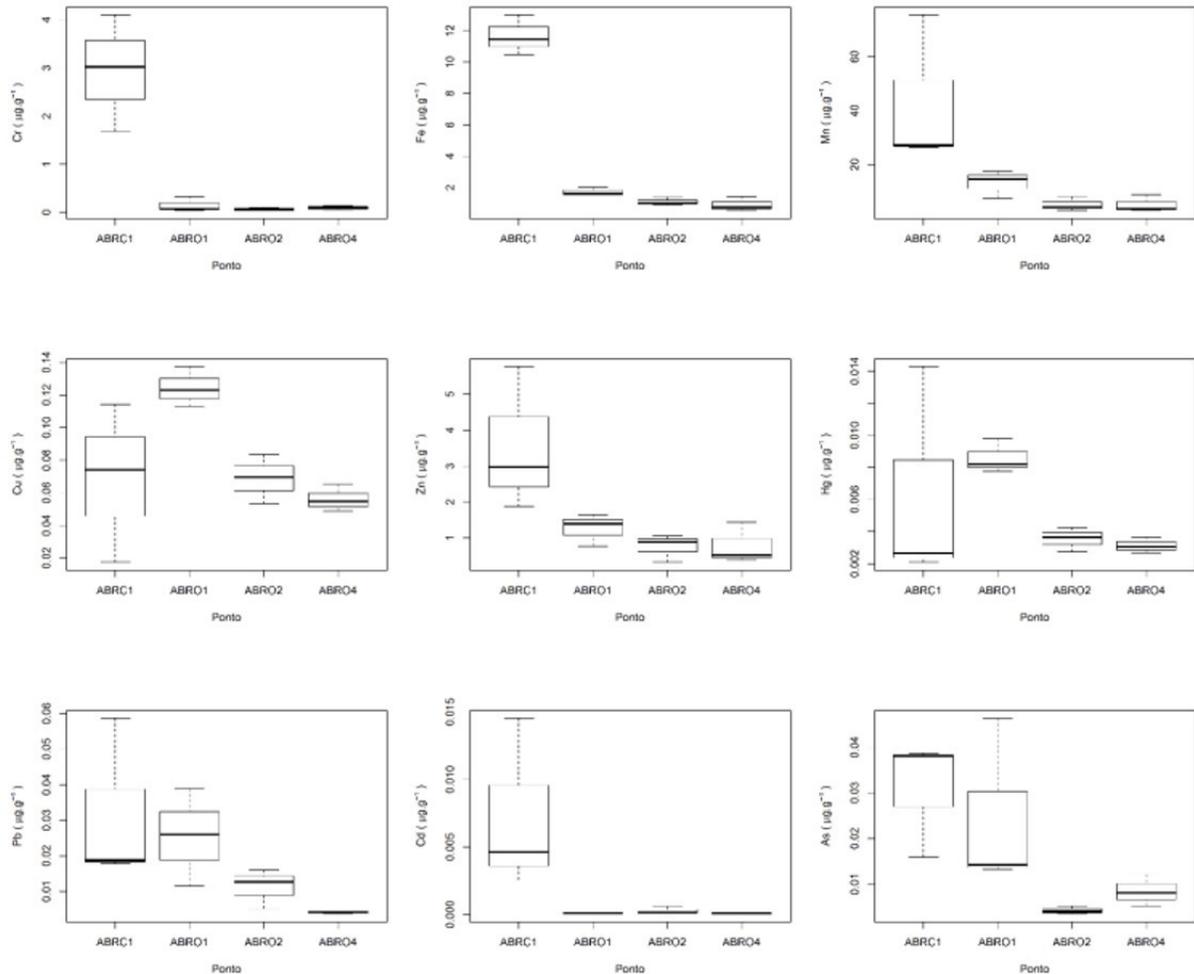
Figura 44: Concentração dos metais analisados na água de quatro pontos amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04). Cada metal foi confrontado com os valores máximos (representado no gráfico como linha em vermelho) estabelecidos pela resolução do CONAMA 357/2005 para água salobra (convertido para unidade  $\mu\text{g/L}$ ).



Fonte: Autoria própria.

As concentrações de metais no sedimento coletado em estações amostrais na região de Abrolhos estão sumarizadas na Figura 45. Nenhum dos metais está desconforme com a legislação brasileira para sedimento. Além disso, o padrão espacial de contaminação no sedimento seguiu o reverso do padrão observado na água e na biota. É importante salientar que o sedimento de recifes próximos à costa apresenta níveis maiores de matéria orgânica e sedimento siliciclástico, enquanto o sedimento de recifes offshore é predominantemente composto por carbonatos. Sedimento carbonático tem menor afinidade e menor potencial para se ligar a contaminantes de forma geral, e comumente uma correlação negativa é encontrada em níveis de  $\text{CaCO}_3$  e níveis de metais no sedimento (Cagnin et al., 2017).

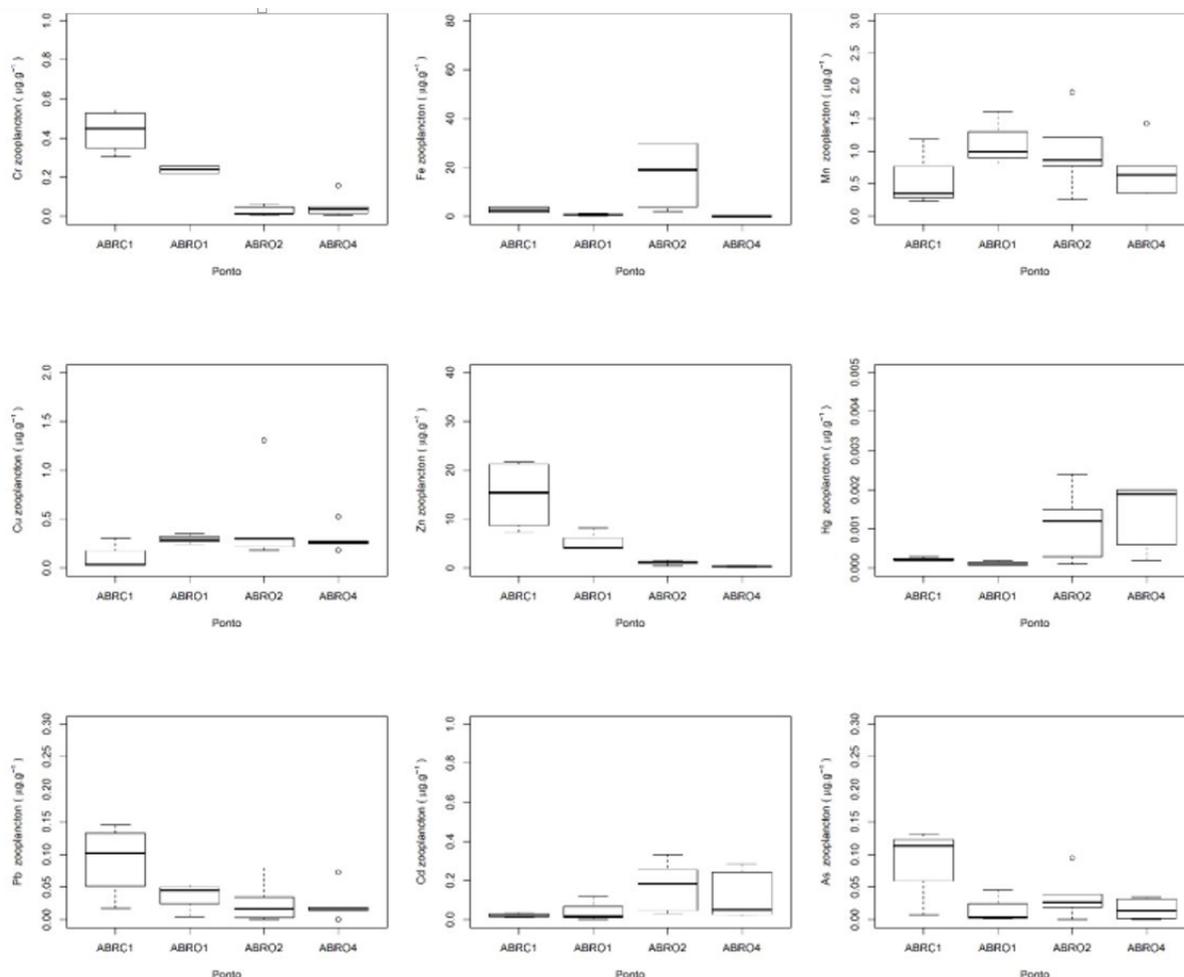
Figura 45: Concentração dos metais analisados no sedimento de pontos amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04). Para cada metal os valores estão apresentados como média  $\pm$  erro padrão ( $\mu\text{g/g}$ ).



Fonte: Autoria própria.

Os padrões de acúmulo de metais no plâncton, já mostrados anteriormente neste relatório, estão recortados para a região de Abrolhos na Figura 46. Os menores valores de acúmulo de Cd, Cu, Fe, Mn, Cd e Hg são encontrados no plâncton coletado em estações amostrais próximas à costa, na estação amostral mais distante da Foz do Rio Doce. A acumulação de Fe na região de Abrolhos está menor que o relatado em expedições realizadas 60 e 360 dias após a chegada da lama do mar (média geral de todos os pontos), ainda assim os níveis de Fe encontrados no plâncton coletado próximo ao Arquipélago (UC Ponta da Baleia e PNMA) são considerados altos e indicam contaminação ambiental. O acúmulo de Hg observado em organismos de base de cadeia trófica também é um resultado preocupante quanto aos riscos ambientais presentes no PNMA e Ponta da Baleia.

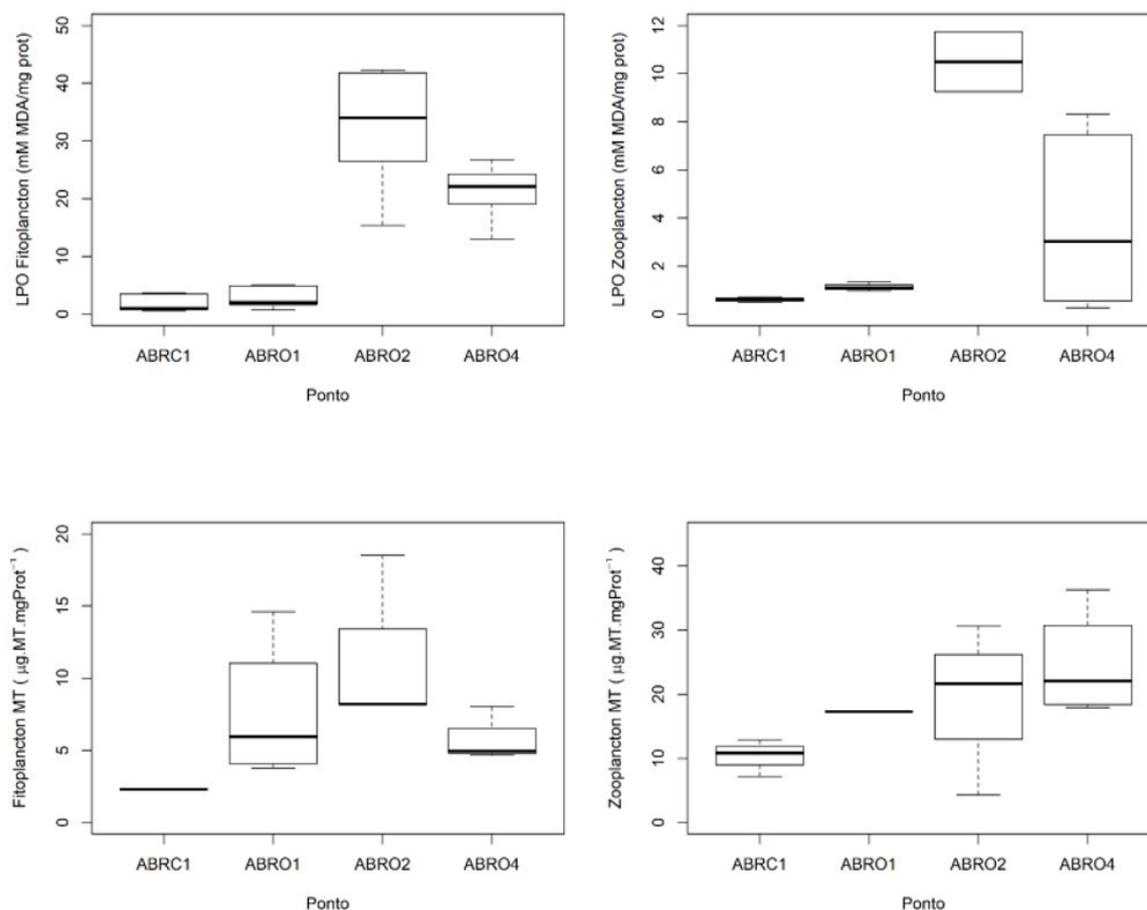
Figura 46: Concentração dos metais analisados no fitoplâncton nos pontos amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04).



Fonte: Autoria própria.

Ao focar em efeitos fisiológicos observados na comunidade zooplanctonica coletada na região de Abrolhos, observa-se um aumento no dano oxidativo (LPO) e uma indução de Metalotioneínas, proteína que atua no combate ao estresse oxidativo e no metabolismo de metais, nas estações amostrais com maior contaminação por Hg, Cu, Cr, Zn e Pb na água e biota (Figura 47).

Figura 47: Biomarcadores de dano lipídico (LPO) e conteúdo de metalotioneínas (MT) mensurados em amostras de pool de fitoplâncton e zooplâncton amostrados nas Unidades de Conservação Reserva extrativista de Cassurubá (ABR01), Parque Nacional Marinho de Abrolhos (ABR02) e Área de Proteção Ambiental Ponta da Baleia (ABR04).



Fonte: Autoria própria.

Em resumo, as estações amostrais localizadas na região do PNMA e APA Ponta da Baleia estão sob pressão da influência de metais, com contaminação na água e em organismos da base da cadeia alimentar. A contaminação da água, para Fe e Hg, é superior a níveis permitidos para a legislação vigente. Ainda, a acumulação de metais na água e biota está associada aos efeitos biológicos, o que representa um potencial dano para o ecossistema recifal.

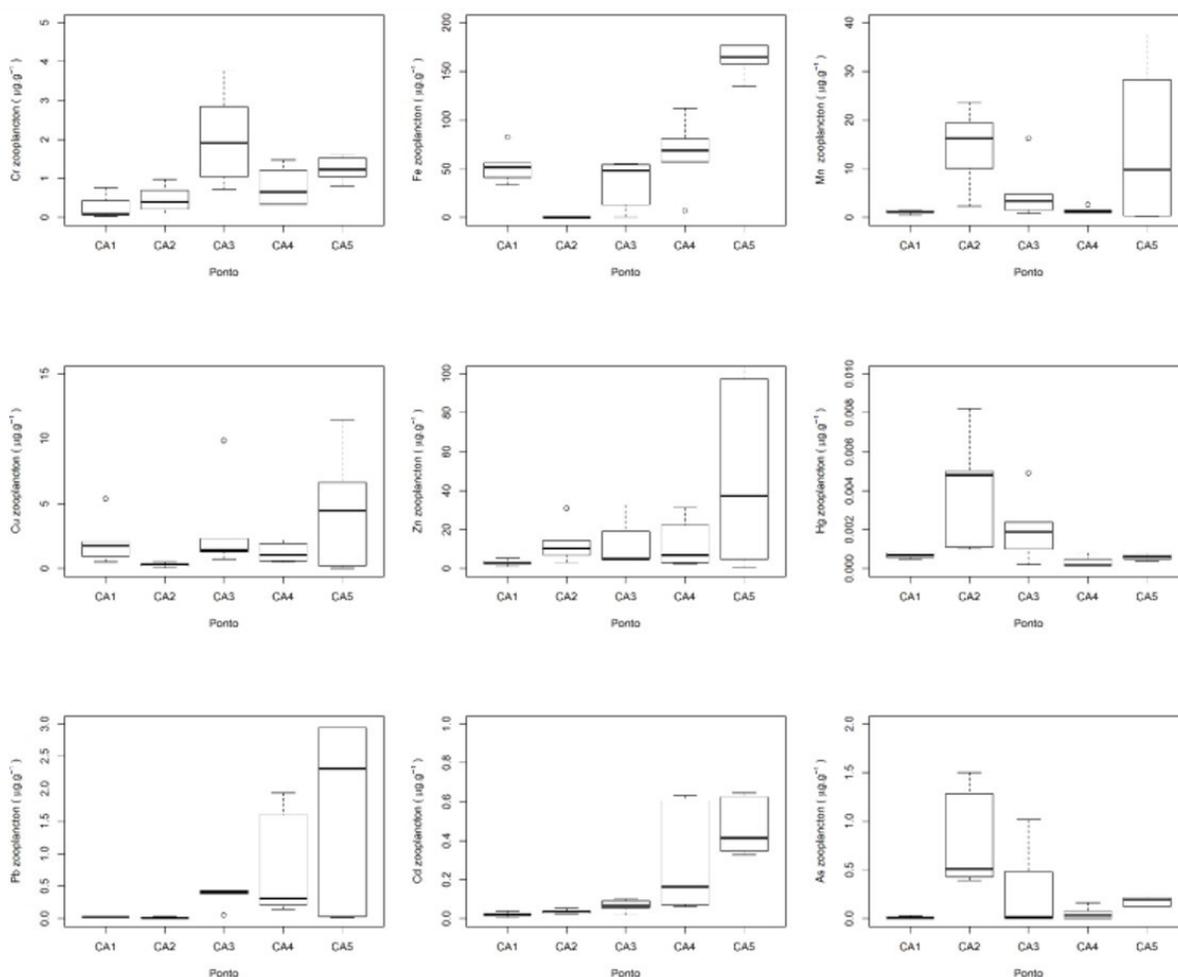
Ao se tratar de uma Unidade de Conservação Nacional que abriga o maior sistema recifal do Atlântico Sul, os níveis de contaminação por metal e consequente efeitos biológicos encontrados e apresentados no presente relatório, somados aos resultados oriundos de expedições anteriores, em colaboração com o ICMBIO (Bianchini et al., 2016), sugerem que se deve manter o monitoramento dos níveis de metais e de biomarcadores de efeitos tóxicos na região de Abrolhos.

Na área da Costa das Algas, as estações amostrais CA1 e CA2 estão dentro da área da Revis de Santa Cruz, enquanto as estações amostrais CA3, CA4 e CA5, estão localizadas dentro da APA Costa das Algas. Dados obtidos na campanha amostral I- Estação Seca evidenciaram que em várias estações

amostrais desta região, os níveis de Hg e Fe na água estavam acima dos limites permitidos pela legislação vigente (CONAMA 357), incluindo as estações CA1, CA2, CA3 e CA4 para o Hg, e as estações CA1, CA4 e CA5 para o Fe. Por sua vez, Cu, Fe e Mn no sedimento também apresentaram valores relativamente altos em amostras coletadas nesta região.

O plâncton, base da cadeia trófica, apresentou acumulação de Cr e Fe em níveis semelhantes ou maiores que os encontrados na Foz do Rio Doce (FRD). O acúmulo de Cr e Fe em níveis similares ao da FRD, e maiores que os encontrados em UCs distantes da foz do Rio Doce, também foi visualizado para camarões e peixes, assim como um considerável nível de dano oxidativo em lipídios (LPO) (Figura 48).

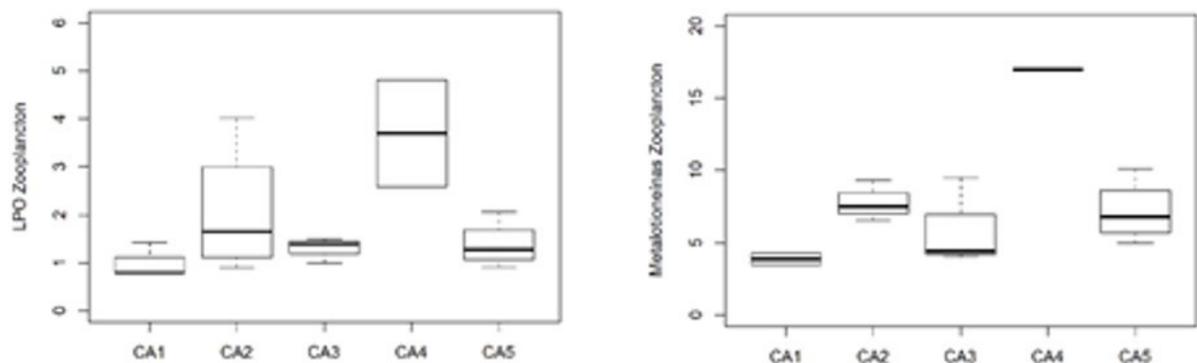
Figura 48: Níveis de acúmulo de metais no zooplâncton coletado dentro da área de Revis de Santa Cruz (CA1 e CA2) e APA Costa das Algas (CA3, CA4 e CA5).



Fonte: Autoria própria.

O zooplâncton apresentou níveis oxidação de lipídios (LPO) e concentração de Metalotioneínas semelhantes dentro da área da Costa das Algas (Figura 49).

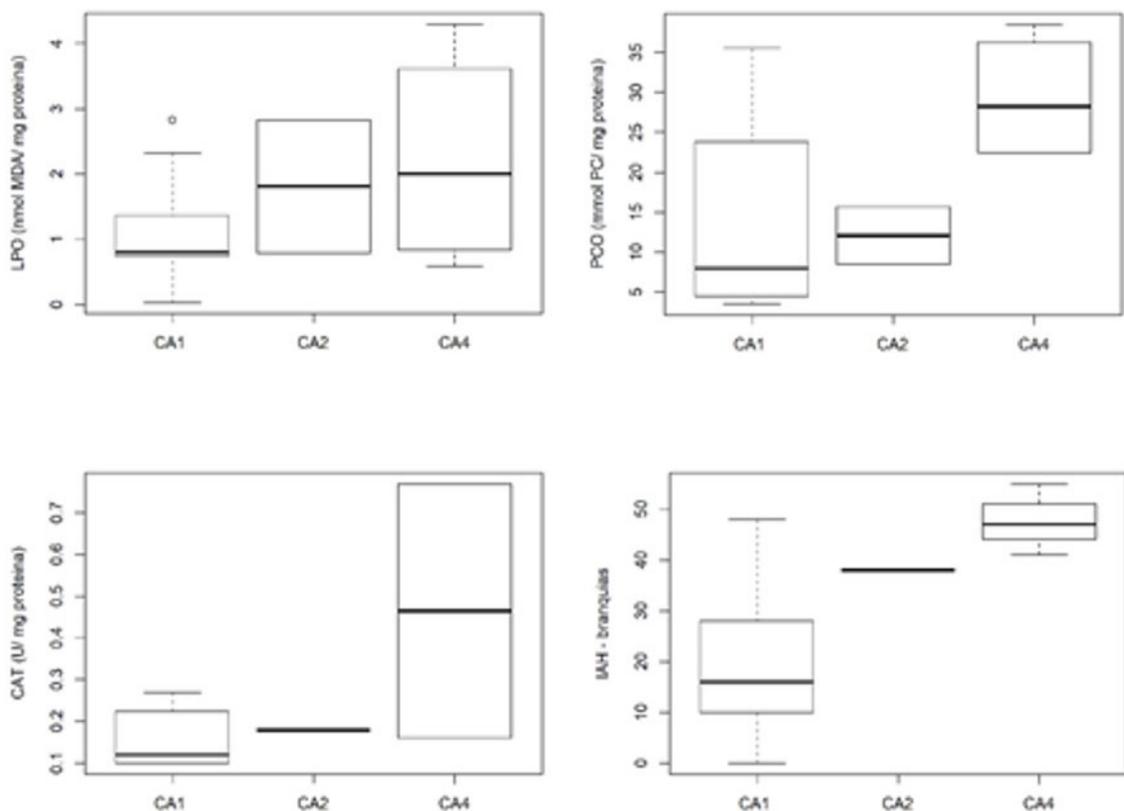
Figura 49: LPO e MT no zooplâncton coletado dentro da área de Revis de Santa Cruz e APA Costa das Algas.



Fonte: Autoria própria.

Peixes coletados dentro da APA Costa das Algas apresentaram indução de estresse oxidativo maior dentro da estação amostral CA4. Danos histopatológicos (IAH) também foram maiores nesta estação, em comparação com outras estações dentro da região, sendo que em todos os pontos o IAH médio foi maior que 10, indicativo de condições alteradas (Figura 50).

Figura 50: Danos oxidativos (em lipídios e proteínas), atividade da enzima antioxidante Catalase, e índice de alterações histopatológicas em peixes coletados em estações amostrais dentro da área de Revis de Santa Cruz (CA1 e CA2) e APA Costa das Algas (CA4).



Fonte: Autoria própria.

Além do padrão espacial observado para o IAH de peixes, o zooplâncton e os peixes do ponto CA4 apresentaram dano oxidativo maior que outras estações amostrais dentro da área da Costa das Algas. As concentrações de Cu, Cr e Fe no sedimento foram maiores nesta estação, evidenciando os efeitos

da exposição a múltiplos metais. Em resumo, riscos ambientais relacionados a contaminação por metais, especialmente Cr, Fe, Mn e Hg, ameaçam a qualidade ambiental da APA Costa das Algas e REVIS Santa Cruz.

A estação amostral próxima a Foz do Rio Doce, FRD10, está localizada próxima ( $\pm 5$  Km) a Reserva Indígena de Comboios. De maneira geral, os metais Fe, Mn e Hg na água estavam com níveis acima do permitido pela legislação.

A estação amostral DEG1 está localizada a  $\pm 2$  Km da UC Área de Relevante Interesse Ecológico do Degredo. Nesta estação amostral, os níveis de Fe e Hg estavam acima do permitido pela legislação. No sedimento, apesar de não ultrapassar o permitido pela legislação, foram encontrados níveis elevados de Cr no sedimento.

Nas proximidades ( $\pm 4$  Km) do Parque Estadual de Itaúnas, a estação amostral ITA1 apresentou níveis de Fe na água acima do permitido pela legislação.

### **3.2.7 Discussão geral**

Após o derramamento de rejeitos de minério no Rio Doce, os níveis de metais como ferro, chumbo, cobre e cromo, por exemplo, foram maiores que os níveis aceitáveis (Fernandes et al, 2016; Carvalho et al., 2017). A pluma de sedimentos enriquecida com diversos metais chegou ao ambiente marinho, causando diversos efeitos deletérios (Marta-Almeida et al., 2016; Quadra et al., 2019) e chegando a ser visualizada até mesmo na costa da Bahia (Bianchini et al., 2015; Bianchini, 2019).

Em geral, os metais participam ativamente na catálise de reações de oxirredução capazes de gerar espécies reativas de oxigênio (ERO). Um aumento na produção de espécies reativas de oxigênio (ERO) acima de níveis basais, pode ultrapassar a capacidade antioxidante dos tecidos e gerar danos em macromoléculas (lipoperoxidação, oxidação de proteínas e dano de DNA), caracterizando a situação de “estresse oxidativo” (Halliwell & Gutteridge, 1999). O estresse oxidativo pode desencadear inúmeras alterações celulares provocando danos oxidativos importantes principalmente às biomoléculas, tais como lipídios, proteínas e DNA. Sendo assim, parâmetros do estresse oxidativo são amplamente utilizados para avaliar estresse fisiológico e a saúde ambiental (Lesser, 2006; Monserrat et al., 2007). Ainda, ocorrência de dano oxidativo já foi associada a declínios populacionais de algumas espécies (Prazeres et al, 2012), evidenciando a aplicabilidade do dano oxidativo como biomarcador de degradação ambiental. Em resumo, neste relatório, os principais efeitos biológicos observados nos organismos marinhos foram os relacionados ao dano oxidativo, especialmente em lípidios (LPO). O dano oxidativo esteve fortemente correlacionado a diversos metais, em diversos grupos de organismos.

Outro biomarcador bastante utilizado para avaliação de estresse oxidativo é a enzima catalase (CAT). Neste relatório, a CAT em peixes após análise multivariada, demonstrou forte correlação com metais como Cromo e Ferro. A CAT é uma enzima antioxidante encontrada nos peroxissomos, sendo responsável pela desintoxicação celular pela decomposição de peróxido de hidrogênio a água e oxigênio (Aebi, 1984). Em geral, os metais, especialmente os de transição como Fe, Cu e Cr participam

ativamente na catálise de reações de oxirredução capazes de gerar espécies reativas de oxigênio (ERO), incluindo o peróxido de hidrogênio, e desta forma, a resposta observada na atividade da CAT serve como mais um parâmetro indicativo do aumento na produção de ERO desencadeada pela exposição a metais presentes nos ambientes de estudo.

Destacaram-se neste estudo a incidência elevada de alterações morfológicas no tecido branquial e hepático nos peixes coletados em todas as estações amostrais investigadas. Assim, percebe-se que a metodologia analítica e os procedimentos executados foram capazes de detectar impactos nos órgãos analisados, o que permite estabelecer uma ligação entre os índices de lesão e a dispersão de poluentes nestes pontos.

Na hemolinfa de camarões e caranguejos não foi possível realizar a análise micronúcleo, apesar de ter sido padronizado com sucesso em laboratório. O protocolo padronizado foi devidamente executado em campo nos diferentes ambientes, entretanto as lâminas geradas não estavam adequadas para análise e poderiam prejudicar a interpretação dos dados e gerar falsos positivos. Entre os principais problemas encontrados na análise ressaltamos a baixa quantidade de células que em geral estavam com suas estruturas deformadas. A bibliografia atual utilizando hemolinfa alerta para o fato de que a principal limitação deste tecido é a complexidade dos tipos de células, dificultando assim as análises e também sugere que os organismos sejam rapidamente transportados para o laboratório para posterior execução do protocolo (Bolognesi and Fenech, 2012). Sendo assim identificamos que o teste de Micronúcleo especificamente na hemolinfa devido a sua complexidade exige para sua adequada realização condições favoráveis em um ambiente controlado, o que o torna inviável de ser realizado neste tipo de monitoramento, onde as amostras tem de ser processadas em campo sob condições desfavoráveis, como por exemplo o monitoramento marinho onde a coleta e processamento do material é realizado no barco em movimento constante e condições climáticas variáveis.

A variabilidade ambiental e mesmo biológica entre as comunidades amostradas em pontos desde o sul do Espírito Santo até a Bahia dificulta o estabelecimento de relações lineares entre os resultados encontrados. Por exemplo, as comunidades planctônicas de regiões oligotróficas como Itaúnas e Abrolhos são significativamente diferentes das comunidades encontradas em áreas estuarinas. Essa diferenciação entre populações leva a diferentes graus de resistência a estressores ambientais, assim como diferentes graus de capacidade antioxidante. Essa variabilidade ambiental dificulta a visualização de respostas claras entre a contaminação ambiental e os danos oxidativos. Ainda sim, a integração dos dados foi capaz de reduzir a dimensionalidade deste contexto de múltiplas covariáveis e encontrar padrões claros de associação entre metais e respostas biológicas.

A ocorrência de danos morfológicos indica exposição crônica a contaminantes. A avaliação de danos oxidativos na estação chuvosa deve fornecer um cenário propício para avaliação de efeitos agudos da pluma contendo resíduos de atividade mineradora, e assim fornecer quadros mais nítidos para as relações já encontradas neste trabalho e previamente já determinadas na análise de material coletado anteriormente.

### 3.3 CONCLUSÃO

Os resultados descritos neste relatório podem estar subestimando efeitos do aporte de água proveniente do Rio Doce no ambiente marinho, uma vez que a campanha avaliada aqui foi realizada na estação seca. É fundamental que variabilidade temporal seja considerada na avaliação de efeitos ecotoxicológicos associados a resíduos oriundos do rompimento da barragem.

Com os resultados obtidos até o momento é possível identificar marcadores padrões de associação entre os níveis de metais no ambiente, na biota e efeitos ecofisiológicos em organismos chave. Das 25 estações amostradas, 22 apresentaram pelo menos um metal em desconformidade com a legislação CONAMA 357. O padrão espacial desse perfil de contaminação, assim como o padrão espacial geral das concentrações de metais na água e sedimento, indica altos níveis de metais relacionados à atividade mineradora na Foz do Rio Doce e em ambientes marinhos próximos. As estações amostrais mais próximas à Foz, ao sul (Costa das Algas) e ao norte (Degredo), também apresentam marcada contaminação ambiental por Cr, Fe, Mn e Hg com consequentes efeitos na biota.

No que se refere às Unidades de Conservação, a Revis de Santa Cruz, a Área de Preservação Costa das Algas, a APA da Ponta da Baleia/Abrolhos e o Parque Nacional Marinho de Abrolhos apresentaram contaminação da água acima dos limites permitidos pela legislação vigente para alguns metais. Além disso, efeitos biológicos foram detectados nessas unidades de conservação.

O padrão espacial da bioacumulação de metais foi similar tanto em fito como em zooplâncton. Em geral, diversos metais estavam mais altos em amostras de plâncton, camarão e peixes coletadas em estações mais próximas a Foz do Rio Doce (FRD) e na Costa das Algas (CA), quando comparadas a regiões mais distantes como Guarapari e o Parque Nacional Marinho de Abrolhos, seguindo assim, um gradiente decrescente de bioacumulação corporal em direção ao Sul e ao Norte da Foz do Rio Doce.

Associações encontradas entre a variação na concentração ambiental e tecidual de metais, e seus efeitos biológicos evidenciam condições de estresse. Os prejuízos em nível celular e fisiológico, quando persistentes, podem acarretar em impactos sobre o desempenho fisiológico do organismo, podendo afetar a dinâmica populacional e padrões de abundância. Tais impactos sobre as populações influenciam a composição e biodiversidade das comunidades, e podem culminar em alterações na escala ecossistêmica. Sendo assim, os danos biológicos descritos neste relatório indicam condição de saúde alterada com potencial consequência em níveis mais altos de organização biológica (populações e comunidades).

Compostos inorgânicos presentes em alta concentração em rejeitos da mineração, permanecem por longos períodos no ambiente devido a suas características físico-químicas. Considerando isso e a ação da variabilidade climática/sazonal no aporte de contaminantes de origem continental para o ambiente marinho, o monitoramento ambiental de regiões impactadas por compostos inorgânicos (metais) deve ser longo.

### 3.4 REFERÊNCIAS

Abalaka, S.E., Fatihu, M.Y., Ibrahim, N.D.G., & Ambali, S.F. (2015). Gills and skin histopathological evaluation in African sharptooth catfish, *Clarias gariepinus* exposed to ethanol extract of *Adenium obesum* stem bark. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, 41, 119-127.

Aebi, H. (1984). Catalase in Vitro. *Methods in Enzymology*, 105, 21-126.

Ameur, W. B., Megdiche, Y.E., Lapuente, J., Barhoumi, B., Trabelsi, S., Ennaceur, S., Camps, L., Serret, J., Ramos-López, D., Gonzalez-Linares, J., Driss, M.R., & Borràs, M. (2015). Oxidative stress, genotoxicity and histopathology biomarker responses in *Mugil cephalus* and *Dicentrarchus labrax* gill exposed to persistent pollutants. A field study in the Bizerte Lagoon: Tunisia. *Chemosphere*, 135, 67-74.

Bashir, F. A., Shuhaimi-Othman, M., & Mazlan, A. G. (2012). Evaluation of trace metal levels in tissues of two commercial fish species in Kapar and Mersing coastal waters, Peninsular Malaysia. *Journal of environmental and public health*.

Bernet, D., Schmidt, H., Meier, W., Burkhardt-Holm, P., & Wahli, T. (1999). Histopathology in fish: proposal for a protocol to assess aquatic pollution. *Journal of Fish Diseases*, 22, 25-34.

Bianchini, A., da Silva, C.C., Lauer, M.M., Jorge, M.B., Costa, P.G., Marques, J.A., Marangoni, L.F.B., Jesulich, A.C., Taylor, A.J., Luz, D.C., da Silva, J.F., Zebal, Y.D., & Pinto M.M.Z.N. (2016). Avaliação do impacto da lama/pluma Samarco sobre os ambientes costeiros e marinhos (ES e BA) com ênfase nas Unidades de Conservação. Brasília.

Bianchini A (2019). Monitoramento dos efeitos ecotoxicológicos da pluma de sedimentos oriunda da foz do Rio Doce sobre o ambiente marinho. Relatório Técnico-Científico - FURG/ICMBio, Rio Grande, RS.

Campos, D.Y.F. (2007). Análises das respostas citogenéticas e histopatológicas de peixe *Trematomus newnesi* exposto à água do mar diante da Estação Antártica Brasileira "Comandante Ferraz", Ilha Rei George, Antártica. Dissertação de Mestrado. Universidade de São Paulo, Instituto Oceanográfico. São Paulo, SP. 112p.

Castro, C.B., Pires, D.O. (1999). Brazilian coral reefs: what we ready know and what is still missing. *Bulletin of Marine Science*. 69, 357–371.

Carvalho, M.S., Moreira, R.M., Ribeiro, K. D., & Almeida, A.M. (2017) Concentração de metais no rio Doce em Mariana, Minas Gerais, Brasil. *Acta Brasiliensis*, 1 (201), 37-41.

Coimbra, R. S. C., Mascarenhas, M. S., Saraiva, V. B., Santos, C. R., Lopes, R. M., Hauser-Davis, R. A., & Carvalho, C. E. V. (2018). Metal loads and biomarker suite responses in a tropical carnivorous fish indicative of anthropogenic impacts in a Southeastern Brazilian lagoon. *Environmental monitoring and assessment*, 190(9), 564

CONAMA. 2012. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução No. 454, de 1 de novembro 2012. Diário Oficial da União de 08/11/12.

CONAMA. 2005. Conselho Nacional de Meio Ambiente. Resolução No. 357, de 17 de março de 2005. Diário Oficial da União de 18/03/05.

Corales, D., Acuña, A., Salhi, M., Saona, G., & Brugnoli, E. (2016). Copper, zinc, mercury and arsenic content in *Micropogonias furnieri* and *Mugil platanus* of the Montevideo coastal zone, Río de la Plata. *Brazilian Journal of Oceanography*, 64(1), 57-65.

Costa Junior, O.S., Attrill, M.J., Nimmo, M. (2006). Seasonal and spatial controls on the delivery of excess nutrients to nearshore and offshore coral reefs of Brazil. *Journal of Marine Systems*. 60, 63–74.

Dadar, M., Peyghan, R., & Memari, H. R. (2014). Evaluation of the bioaccumulation of heavy metals in white shrimp (*Litopenaeus vannamei*) along the Persian Gulf coast. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 93(3), 339-343.

Darmono, D., & Denton, G. R. W. (1990). Heavy metal concentrations in the banana prawn, *Penaeus merguensis*, and leader prawn, *P. monodon*, in the Townsville region of Australia. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 44(3), 479-486.

Di Lena, G., Casini, I., Caproni, R., & Orban, E. (2018). Total mercury levels in crustacean species from Italian fishery. *Food Additives & Contaminants: Part B*, 11(3), 175-182.

Fabricius, K.E. (2005). Effects of terrestrial runoff on the ecology of corals and coral reefs: review and synthesis. *Marine Pollution Bulletin*. 50, 125–46.

Fanta, E., Rios, F.S., Romão, S., Vianna, A.C.C., & Freiburger, S. (2003). Histopathology of the fish *Corydoras paleatus* contaminated with sublethal levels of organophosphorus in water and food. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 54, 119–130.

Fernandes, G.W., Goulart, F.F., Ranieri, B.D., et al. (2016). Deep into the mud: ecological and socio-economic impacts of the dam breach in Mariana, Brazil. *Brazilian Journal of Nature Conservation*, 14, 35–45.

Firat, Ö., Gök, G., Çoğun, H. Y., Yüzereroğlu, T. A., & Kargin, F. (2008). Concentrations of Cr, Cd, Cu, Zn and Fe in crab *Charybdis longicollis* and shrimp *Penaeus semisulcatus* from the Iskenderun Bay, Turkey. *Environmental monitoring and assessment*, 147(1-3), 117-123.

Gao, M., Klerks, P. L., Wu, X., Chen, H., & Xie, L. (2016). Metal concentrations in sediment and biota of the Huludao Coast in Liaodong Bay and associated human and ecological health risks. *Archives of environmental contamination and toxicology*, 71(1), 87-96.

Griboff, J., Horacek, M., Wunderlin, D. A., & Monferran, M. V. (2018). Bioaccumulation and trophic transfer of metals, As and Se through a freshwater food web affected by anthropic pollution in

- Halliwell, B., & Gutteridge, J.M.C. (1999). *Free Radicals in Biology and Medicine*. First Edition. University Press, Oxford, USA.
- Hamza-Chaffai, A., Cosson, R. P., Amiard-Triquet, C., & El Abed, A. (1995). Physico-chemical forms of storage of metals (Cd, Cu and Zn) and metallothionein-like proteins in gills and liver of marine fish from the Tunisian coast: ecotoxicological consequences. *Comparative Biochemistry and Physiology Part C: Pharmacology, Toxicology and Endocrinology*, 111(2), 329-341.
- Hinton, D.E., Baumann, P.C., Gardner, G.R., Hawkins, W.E., Hendricks, J. D., Murchelano, R.A., Okihiro, M.S. (1992). Histopathologic biomarkers. In: *Biomarkers – biochemical, physiological and histological markers of anthropogenic stress*. Boca Raton. Lewis Publishers. 155–195.
- Hauser-Davis, R. A., Bordon, I. C., Oliveira, T. F., & Ziolli, R. L. (2016). Metal bioaccumulation in edible target tissues of mullet (*Mugil liza*) from a tropical bay in Southeastern Brazil. *Journal of Trace Elements in Medicine and Biology*, 36, 38-43.
- Jones, R. (2010). Environmental contamination associated with a marine landfill ('seafill') beside a coral reef. *Marine Pollution Bulletin*. 60, 1993–2006.
- Joyeux, J. C., Campanha Filho, E. A., & Jesus, H. C. D. (2004). Trace metal contamination in estuarine fishes from Vitória Bay, ES, Brazil. *Brazilian Archives of Biology and Technology*, 47(5), 765-774.
- Kägi, J.H.R., & Schäffer, A. (1988). Biochemistry of metallothionein. *Biochemistry*, 27, 8509–8515.
- Kalay, M., Ay, Ö., & Canli, M. (1999). Heavy metal concentrations in fish tissues from the Northeast Mediterranean Sea. *Bulletin of environmental contamination and toxicology*, 63(5), 673-681.
- Kargun, F., Dönmez, A., & Çoğun, H. Y. (2001). Distribution of heavy metals in different tissues of the shrimp *Penaeus semiculatus* and *Metapenaeus monocerus* from the Iskenderun Gulf, Turkey: seasonal variations. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 66(1), 102-109.
- Kaya, G. & Turkoglu, S. (2017). Bioaccumulation of heavy metals in various tissues of some fish species and green tiger shrimp (*Penaeus semisulcatus*) from Iskenderun Bay, Turkey, and risk assessment for human health. *Biological trace element research*, 180(2), 314-326.
- Leblanc, L. A., Prince, D. (2012). Metal concentrations in tissues of American lobsters (*Homarus americanus*, Milne-Edwards) with epizootic shell disease. *Journal of Shellfish Research*, 31(2), 543-554.
- Lesser, M.P. (2006). Oxidative stress in marine environments: Biochemistry and physiological ecology. *Annual Reviews in Physiology*. 68, 253–278.
- Lewtas, K. L. M., Birch, G. F., & Foster-Thorpe, C. (2014). Metal accumulation in the greentail prawn, *Metapenaeus bennettiae*, in Sydney and Port Hacking estuaries, Australia. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(1), 704-716.

- Liebel, S., Tomotake, M.E.M., & Oliveira Ribeiro, C.A. (2013) Fish histopathology as biomarker to evaluate water quality. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 8, 9-15.
- Liu, Q., Xu, X., Zeng, J., Shi, X., Liao, Y., Du, P., ... & Shou, L. (2019). Heavy metal concentrations in commercial marine organisms from Xiangshan Bay, China, and the potential health risks. *Marine Pollution Bulletin*, 141, 215-226.
- Luczynska, J., & Krupowski, M. (2009). Mercury content in organs of commercial fish (Poland)-a short report. *Polish Journal of Food and Nutrition Sciences*, 59(4).
- Luczynska, J., Luczynski, M. J., & Paszczyk, B. (2016). Assessment of mercury in muscles, liver and gills of marine and freshwater fish. *Journal of Elementology*, 21(1).
- Lushchak, V.I. (2011). Environmentally induced oxidative stress in aquatic animals. *Aquatic Toxicology* 101, 13–30.
- Linde AR, Sánchez-Galán S, Vallés-Mota P, Garcia-Vázquez E. 2001. Metallothionein as bioindicator of freshwater metal pollution: European eel and brown trout. *Ecotoxicol. Environ. Saf.* 49: 60–63.
- Lopes, F.F., Cognato, D.P., & Malabarba, L.R. (2005). Alterações histopatológicas observadas nas brânquias do lambari *Astyanax jacubiensis* (Linnaeus, 1758) (Teleostei: Characidae) sob influência de efluentes petroquímicos. *Revista Brasileira de Toxicologia*, 18 (2), 99-104.
- Macedo-Veiga, A.M., Monroy, E., Navarro, G., & Sosto, A. (2013). Metal concentrations and pathological responses of wild native fish exposed to sewage discharge in a Mediterranean river. *Science of the Total Environment*, 449, 9-19.
- Machado, A.A. de S., Spencer, K., Kloas, W., Toffolon, M., Zarfl, C. (2016). Metal fate and effects in estuaries: A review and conceptual model for better understanding of toxicity. *Science of the Total Environment*. 541: 268–281.
- Marangoni, L.F. de B., Marques, J.A., Duarte, G.A.S., Pereira, C.M., Calderon, E.N., Castro, C.B., Bianchini, A. (2017). Copper effects on biomarkers associated with photosynthesis, oxidative status and calcification in the Brazilian coral *Mussismilia harttii* (Scleractinia, Mussidae). *Marine Environmental Research*. 130:248-257
- Marques, J.A., Costa, P.G., Marangoni, L.F.B., Pereira, C.M., Abrantes, D.P., Calderon, E.N., Castro, C.B., Bianchini, A., 2019. Environmental health in southwestern Atlantic coral reefs: Geochemical, water quality and ecological indicators. *Science of the Total Environment*. 651: 261-270.
- Marta-Almeida, M., Mendes, R., Amorim, F.N., Cirano, M., Dias, J.M., 2016. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. *Marine Pollution Bulletin*. 112: 359–364.
- Meyers, T.R., & Hendricks, J.D. (1985) Histopathology. In: *Fundamentals of aquatic toxicology: methods and applications*. Hemisphere Publishing Corporation, Washington, USA. 283-331.

- Monserrat, J.M., Martinez, P.E., Geracitano, L.A., Amado, L.L., Martins, C.M.G., Pinho, G.L.L., Chaves, I.S., Ferreira-Cravo, M., Ventura-Lima, J., & Bianchini, A. (2007). Pollution biomarkers in estuarine animals: Critical review and new perspectives. *Comparative Biochemistry and Physiology C*, 146, 221-234.
- Noel-Lambot F, Gerday C, Disteche A. 1978. Distribution of Cd, Zn and Cu in liver and gills of the eel *Anguilla anguilla* with special reference to metallothioneins. *Comp. Biochem. Physiol.* 61: 177–187.
- Oakes, K.D., Kraak, G.J. Van Der, 2003. Utility of the TBARS assay in detecting oxidative stress in white sucker (*Catostomus commersoni*) populations exposed to pulp mill effluent. *Aquatic Toxicology*. 63: 447–463.
- Olgunoğlu, M. P., Olgunoğlu, İ. A., & Bayhan, Y. K. (2015). Heavy Metal Concentrations (Cd, Pb, Cu, Zn, Fe) in Giant Red Shrimp (*Aristaeomorpha foliacea* Risso 1827) from the Mediterranean Sea. *Polish Journal of Environmental Studies*, 24(2).
- Paez-Osuna, F., & Tron-Mayen, L. (1995). Distribution of heavy metals in tissues of the shrimp *Penaeus californiensis* from the northwest coast of Mexico. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 55(2), 209-215.
- Páez-Osuna, F., & Tron-Mayen, L. (1996). Concentration and distribution of heavy metals in tissues of wild and farmed shrimp *Penaeus vannamei* from the northwest coast of Mexico. *Environment International*, 22(4), 443-450.
- Paris-Palácios, S., Biagianti-Risbourg, S., & Vernet, G. (2000). Biochemical and (ultra)structural hepatic perturbations of *Brachydanio rerio* (Teleostei, Cyprinidae) exposed to two sublethal concentrations of copper sulfate. *Aquatic Toxicology*, 50, 109 -124.
- Pinto, A. M. T. P., Hirdes, I. M., & Sanches Filho, P. J. (2013). Determinação de metais pesados nos camarões (*Farfantepenaeus paulensis*) consumidos na cidade de Pelotas-RS. *Ecotoxicology and Environmental Contamination*, 8(1), 129-134.
- Prazeres, M.D.F., Martins, S.E., Bianchini, A. (2012). Assessment of water quality in coastal waters of Fernando de Noronha, Brazil: biomarker analyses in *Amphistegina lessonii*. *Journal of Foraminiferal Research*. 42: 56–65.
- Prazeres, M.D.F., Martins, S.E., Bianchini, A. (2011). Biomarkers response to zinc exposure in the symbiont-bearing foraminifer *Amphistegina lessonii* (Amphisteginidae, Foraminifera). *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*. 407, 116–121.
- Quadra, G.R., Roland, F., Barros, N., Malm, O., Lino, A.S., Azevedo, G.M., Thomaz, J.R., Andrade-Vieira, L.F., Praça-Fontes, M.M., Almeida, R.M., Mendonça, R.F., Cardoso, S.J., Guida, Y.S., Campos, J.M.S., 2019. Far-reaching cytogenotoxic effects of mine waste from the Fundão dam disaster in Brazil. *Chemosphere* 215, 753–757.

- Queiroz, H.M., Nóbrega, G.N., Ferreira, T.O., Almeida, L.S., Romero, T.B., Santaella, S.T., Rocha, M.L., Sa, F., Campos, M.S., Grassi, M.T., Combi, T., Machado, E. da C. (2017). Metals impact into the Paranaguá Estuarine Complex (Brazil) during the exceptional flood of 2011. *Brazilian Journal of Oceanography*. 65: 54–68.
- Roméo M., Cosson, R.P., Gnassia-Barelli, M., Risso, C., Stien, X., & Lafaurie, M. (1997). Metallothionein determination in the liver of the sea bass *Dicentrarchus labrax* treated with copper and B(a)P. *Marine Environmental Research*, 44, 275–284.
- Santos, D.C.M. (2009). Toxidez aguda do zinco em lambaris *Astyanax aff. bimaculatus*. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Viçosa, Pós-Graduação em Biologia Animal. Viçosa, MG. 125p.
- Schwaiger, J., Wanke, R., Adam, S., Pawert, M., Honnen, W., & Triebkorn, R. (1997) The use of histopathological indicators to evaluate contaminant related stress in fish. *Journal of Aquatic Ecosystem Stress and Recovery*, 6 (1), 75-86.
- Silva, E., Viana, Z. C. V., Onofre, C. R. E., Korn, M. G. A., & Santos, V. L. C. S. (2016). Distribution of trace elements in tissues of shrimp species *Litopenaeus vannamei* (Boone, 1931) from Bahia, Brazil. *Brazilian Journal of Biology*, 76(1), 194-204.
- Stillman M.J. (1995). Metallothioneins. *Coordination Chemistry Reviews*, 14, 461–511.
- Takashima, F., & Hibiya, T. (1995). An atlas of fish histology normal and pathological features. Second Edition. Kodansha: Gustav Fischer Verlag.
- Thatcher, V.E., & Brites-Neto, J. (1994). Diagnóstico, prevenção e tratamento das enfermidades de peixes neotropicais de água doce. *Revista Brasileira de Medicina Veterinária*, 16, 111-128.
- Thomson, R.G. (1978). *General veterinary pathology*. Philadelphia: Saunders, 444p.
- Thophon, S., Kruatrachue, M., Upatham, E.S., Pokethitiyook, P., Sahaphong, S., & Jaritkuan, S. (2003). Histopathological alterations of white seabass, *Lates calcarifer*, in acute and subchronic cadmium exposure. *Environmental Pollution*, 121, 307-320.
- Vega-López, A., Ayala-López, G., Posadas-Espadas, B.P., Olivares-Rubio, H.F., Dzul-Caamal, R. (2013). Relations of oxidative stress in freshwater phytoplankton with heavy metals and polycyclic aromatic hydrocarbons. *Comp. Biochem. Physiol. - A Mol. Integr. Physiol.* 165: 498–507.
- Zeni, T. O. (2016). O uso da histopatologia por microscopia de luz em estudos com peixes dulcícola em condições ambientais controladas Tese de Doutorado. Universidade Federal do Paraná, Pós-Graduação em Ciências Biológicas. Curitiba, PR. 182p.
- Wu, X. Y., & Yang, Y. F. (2011). Heavy metal (Pb, Co, Cd, Cr, Cu, Fe, Mn and Zn) concentrations in harvest-size white shrimp *Litopenaeus vannamei* tissues from aquaculture and wild source. *Journal of Food Composition and Analysis*, 24(1), 62-65.

## **4 SUBPROJETO: MONITORAMENTO DA COMPOSIÇÃO DA MICROBIOTA EM AMOSTRAS DE ÁGUA, SEDIMENTO E CORAL**

### **4.1 OBJETIVO**

O presente subprojeto teve como objetivo avaliar a microbiota presente em amostras de água, sedimento e coral em três ambientes previamente determinados: i) ao longo da porção capixaba do Rio Doce (amostras de água e sedimento); ii) na região costeira adjacente à foz do Rio Doce (amostras de água e sedimento); iii) ao sul do Parque Nacional Marinho de Abrolhos e recifes-controle (amostras de água, sedimento e coral). Esta análise visa a avaliação de alterações e possíveis impactos na comunidade microbiana e a identificação de possíveis bioindicadores do impacto relacionado ao rompimento da barragem de Fundão nos ambientes avaliados.

### **4.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Como planejado, o monitoramento da comunidade microbiana total em amostras de água (superfície e fundo), sedimento e coral, foi realizado utilizando-se triplicatas das amostras em cada ponto de coleta. As coletas de água e sedimento foram realizadas nos 10 pontos de amostragem do Rio Doce no estado do Espírito Santo (Quadro 1) e nos 25 pontos de amostragem na foz do Rio Doce e região costeira adjacente, incluindo a região sul do Parque Nacional Marinho de Abrolhos (Quadro 4). As coletas de corais das espécies *Millepora alcicornis* e *Mussismilia harttii* foram obtidas nos 3 pontos no Parque Nacional Marinho de Abrolhos e no ponto no recife controle ao norte do parque, fora de possíveis rotas de dispersão dos sedimentos oriundos do rompimento da barragem de Fundão – Mariana (MG). Os pontos amostrais são os mesmos já apresentados na Parte 1 (Monitoramento do ambiente dulcícola) e Parte 2 (Monitoramento do ambiente marinho) do presente relatório. O total de amostras coletadas foi 330. As análises da microbiota total em amostras de água, sedimentos e associada aos corais foram realizadas através da extração do DNA total e posterior sequenciamento de DNA, utilizando-se sequenciadores de nova geração. As sequências geradas foram processadas utilizando softwares específicos tais como Mothur v.1.33 e RStudio Version 1.1.383. O número de sequências obtidas em cada ponto amostral é apresentado nos Quadro 11, Quadro 12 e Quadro 13.

Quadro 11: Identificação dos pontos amostrais no Rio Doce e dados brutos do sequenciamento de DNA.

Amostra de Água							Amostras de Sedimento			
Localização	Estação	Profundidade	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea (%)	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea (%)
Baixo Rio Guandu	17 - BRG	S	92,190	94,0	97,3	0,2	66,765	93,6	89,4	3,7
	17 - BRG	F	90,839	94,3	97,3	0,3	-	-	-	-
Lagoa do Limão	18 - LLI	S	87,411	94,3	98,4	0,0	64,261	92,6	80,5	14,8
	18 - LLI	F	76,143	94,4	98,0	0,1	-	-	-	-
Lagoa Nova	19- LNO	S	80,305	94,3	97,4	0,2	132,921	91,7	83,8	11,0
	19- LNO	F	92,607	94,5	97,9	0,1	-	-	-	-
Lagoa Japaranã	20- LJA	S	132,778	93,2	97,6	0,5	86,107	92,9	93,3	2,8
	20- LJA	F	89,502	93,1	95,5	0,9	-	-	-	-
Rio Doce (Linhares)	21 - RDL	S	82,135	92,7	96,0	1,5	74,512	92,3	88,5	7,8
	21 - RDL	F	60,829	92,9	95,7	1,6	-	-	-	-
Rio Doce (Regência)	22 - RDR	S	96,813	93,7	97,6	0,1	66,355	92,9	89,9	7,0
	22 - RDR	F	90,893	93,9	98,1	0,1	-	-	-	-
Lagoa do Areão	23 - LAR	S	95,092	93,9	98,7	0,1	90,375	92,0	85,8	10,2
	23 - LAR	F	76,603	93,9	98,7	0,0	-	-	-	-
Lagoa do Areal	24 - LAL	S	138,376	92,3	97,6	0,3	74,645	90,3	65,5	27,3
	24 - LAL	F	115,554	92,0	95,7	1,5	-	-	-	-
Lagoa Monsaraz	25 - LMO	S	90,620	92,3	96,1	0,1	86,696	92,4	86,8	5,3
	25 - LMO	F	52,043	92,6	98,5	0,1	-	-	-	-
Rio Doce (foz)	26 - RDF	S	114,464	92,1	98,0	0,1	59,281	92,3	90,8	3,9
	26 - RDF	F	125,945	92,3	97,5	0,1	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Quadro 12: Identificação dos pontos amostrais na foz do Rio Doce e região costeira adjacente, e dados brutos do sequenciamento de DNA.

Amostras de Água							Amostras de Sedimento			
Localização	Estação	Profundidade	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea (%)	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea(%)
Vitória	VIX1	S	65,734	91,133	97,410	1,177	81,147	92,500	89,707	9,963
	VIX1	F	76,406	91,500	96,590	1,673	-	-	-	-
Vitória	VIX2	S	80,649	92,267	98,677	0,657	NC	NC	NC	NC
	VIX2	F	71,593	92,200	98,040	1,047				
Barra Nova	BN1	S	82,405	92,767	99,397	0,147	64,637	92,867	86,413	8,290
	BN1	F	76,648	93,200	98,597	0,570	-	-	-	-
Barra Nova	BN2	S	71,563	92,500	99,573	0,200	67,783	92,667	86,170	10,623
	BN2	F	92,750	92,767	99,713	0,103	-	-	-	-
Abrolhos	ABR2	S	48,404	94,600	99,150	0,047	75,113	92,867	87,730	4,677
	ABR2	F	74,595	94,333	99,117	0,097	-	-	-	-
Abrolhos	ABR4	S	67,147	93,500	99,067	0,043	63,617	92,900	88,710	4,897
	ABR4	F	77,299	93,533	99,373	0,017	-	-	-	-
Abrolhos	ABR1	S	92,362	92,933	98,603	0,470	105,243	92,067	89,350	4,143
	ABR1	F	79,773	92,600	97,967	0,403	-	-	-	-
Abrolhos	ABRC1	S	128,129	91,533	99,910	0,040	65,937	92,233	87,927	6,250
	ABRC1	F	77,835	92,100	99,450	0,220	-	-	-	-
Itaúnas	ITA1	S	95,152	92,067	99,570	0,217	84,297	92,500	90,007	6,890
	ITA1	F	97,149	92,433	99,493	0,330	-	-	-	-
Itaúnas	ITA2	S	95,036	91,200	99,850	0,037	74,057	92,233	85,993	8,070
	ITA2	F	106,400	91,067	99,880	0,017	-	-	-	-
Degredo	DEG1	S	80,430	93,033	97,847	1,570	74,977	93,100	87,777	8,337

Amostras de Água							Amostras de Sedimento			
Localização	Estação	Profundidade	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea (%)	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea(%)
	DEG1	F	94,395	92,500	98,577	1,033	-	-	-	-
Degredo	DEG2	S	74,140	92,400	98,987	0,117	78,627	93,467	88,033	7,023
	DEG2	F	91,266	91,633	99,677	0,097	-	-	-	-
Foz do Rio Doce	FRD9	S	83,353	91,800	99,740	0,063	58,933	92,967	90,633	6,480
	FRD9	F	77,869	92,267	99,433	0,230	-	-	-	-
Foz do Rio Doce	FRD6	S	72,451	93,067	95,567	0,380	63,380	91,833	84,147	11,963
	FRD6	F	80,847	93,500	97,270	0,617	-	-	-	-
Foz do Rio Doce	FRD1	S	76,778	93,500	95,610	0,563	56,380	92,267	87,703	6,587
	FRD1	F	73,997	92,900	93,223	2,453	-	-	-	-
Foz do Rio Doce	FRD3	S	97,625	93,200	96,023	0,853	128,213	92,633	85,220	9,940
	FRD3	F	85,394	92,667	94,107	1,673	-	-	-	-
Foz do Rio Doce	FRD8	S	89,367	93,000	90,600	2,813	64,813	93,000	87,687	8,737
	FRD8	F	41,224	92,967	91,613	3,127	-	-	-	-
Foz do Rio Doce	FRD10	S	119,488	93,200	97,027	0,577	57,077	92,267	85,330	13,287
	FRD10	F	87,570	93,067	91,110	3,163	-	-	-	-
Costa das Algas	CA1	S	80,668	92,300	97,980	0,933	82,383	92,633	92,407	4,583
	CA1	F	81,451	92,200	96,237	2,000	-	-	-	-
Costa das Algas	CA2	S	98,490	93,167	99,647	0,137	62,590	93,567	83,630	14,697
	CA2	F	61,396	93,567	99,373	0,317	-	-	-	-
Costa das Algas	CA3	S	72,925	92,033	97,753	0,300	NC	NC	NC	NC
	CA3	F	70,081	93,400	99,150	0,237				
Costa das Algas	CA4	S	93,594	92,867	98,290	0,510	77,117	91,500	83,230	13,710

Amostras de Água							Amostras de Sedimento			
Localização	Estação	Profundidade	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea (%)	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea(%)
	CA4	F	52,303	93,533	99,197	0,143	-	-	-	-
Costa das Algas	CA5	S	70,579	92,467	98,427	0,403	NC	NC	NC	NC
	CA5	F	67,079	92,067	95,217	0,587				
Guarapari	GUA1	S	71,825	91,900	96,530	1,483	93,403	91,933	89,533	9,810
	GUA1	F	77,646	92,233	94,630	2,483	-	-	-	-
Guarapari	GUA2	S	68,345	92,733	97,233	1,450	47,998	91,967	86,150	13,073
	GUA2	F	73,664	92,667	97,427	1,547	-	-	-	-

Fonte: Autoria própria.

Quadro 13: Identificação dos pontos amostrais dos corais na região de Abrolhos e dados brutos do sequenciamento de DNA.

Amostras de Coral						
Localização	Estação	Espécie	Total de sequências (n° de cópias)	Sequências filtradas (%)	Bactéria (%)	Archaea (%)
Abrolhos	ABR1	<i>Millepora alcicornis</i>	65,403	92,3	98,8	0,2
Abrolhos	ABR1	<i>Mussismilia harttii</i>	31,522	89,3	83,3	0,1
Abrolhos	ABR2	<i>Millepora alcicornis</i>	66,040	91,6	96,3	2,4
Abrolhos	ABR2	<i>Mussismilia harttii</i>	43,415	90,9	89,8	0,2
Abrolhos	ABR4	<i>Millepora alcicornis</i>	61,050	92,2	98,8	0,0
Abrolhos	ABR4	<i>Mussismilia harttii</i>	20,455	88,0	68,1	2,6
Abrolhos	ABRC1	<i>Millepora alcicornis</i>	55,583	91,5	97,0	0,0
Abrolhos	ABRC1	<i>Mussismilia hartti</i>	14,6	92,2	96,4	0,0

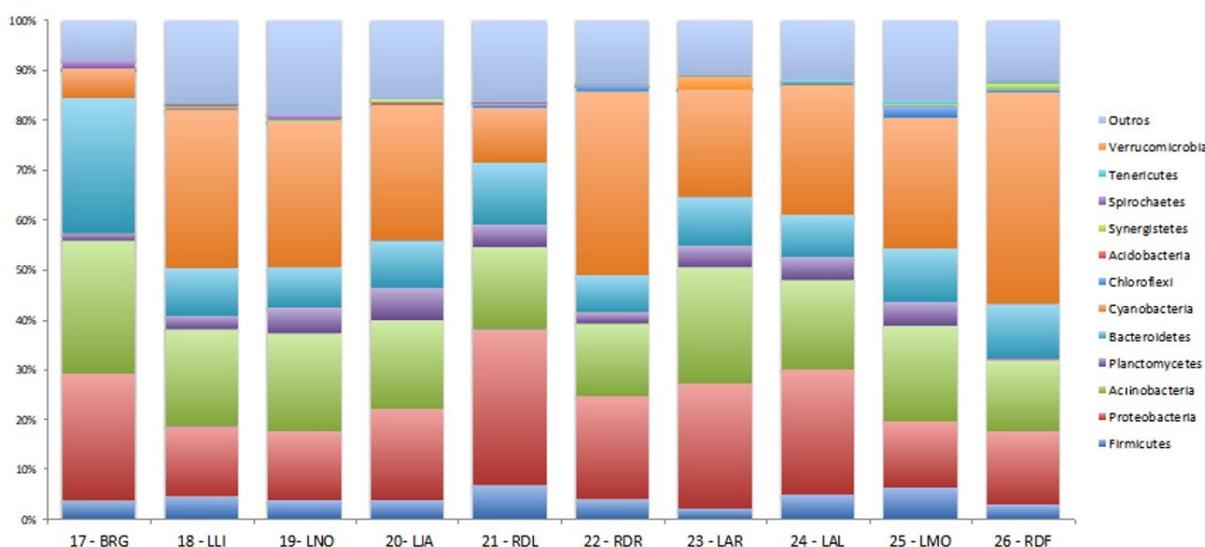
Fonte: Autoria própria.

## 4.2.1 Resultados - Rio Doce

### 4.2.1.1 Água de superfície

O sequenciamento do DNA bacteriano total revelou inicialmente a distribuição dos grupos taxonômicos ao longo de todas as amostras coletadas. De acordo com a Figura 51 foi possível observar a predominância dos Filos Cyanobacteria, Proteobacteria, Actinobacteria e Bacteroidetes nas águas de superfície do Rio Doce. Contudo esta abundância relativa não é proporcional para todos os pontos amostrados e apresenta variações como por exemplo para a estação BRG.

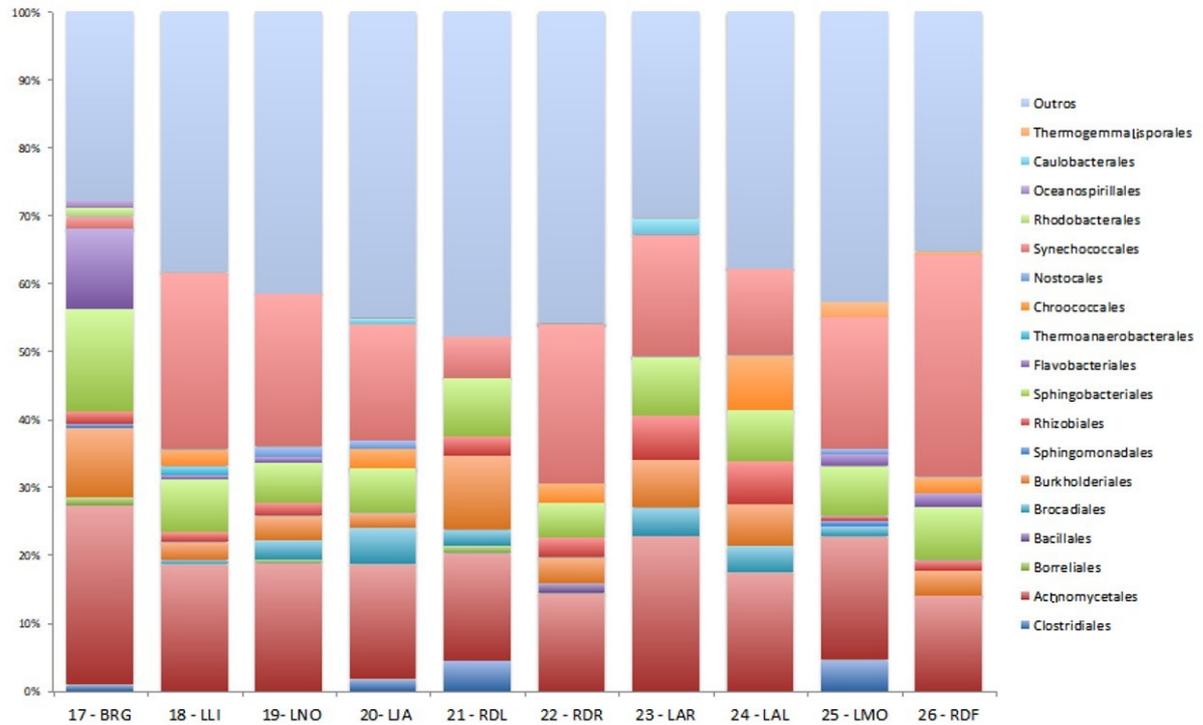
Figura 51: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como "Outros".



Fonte: Autoria própria.

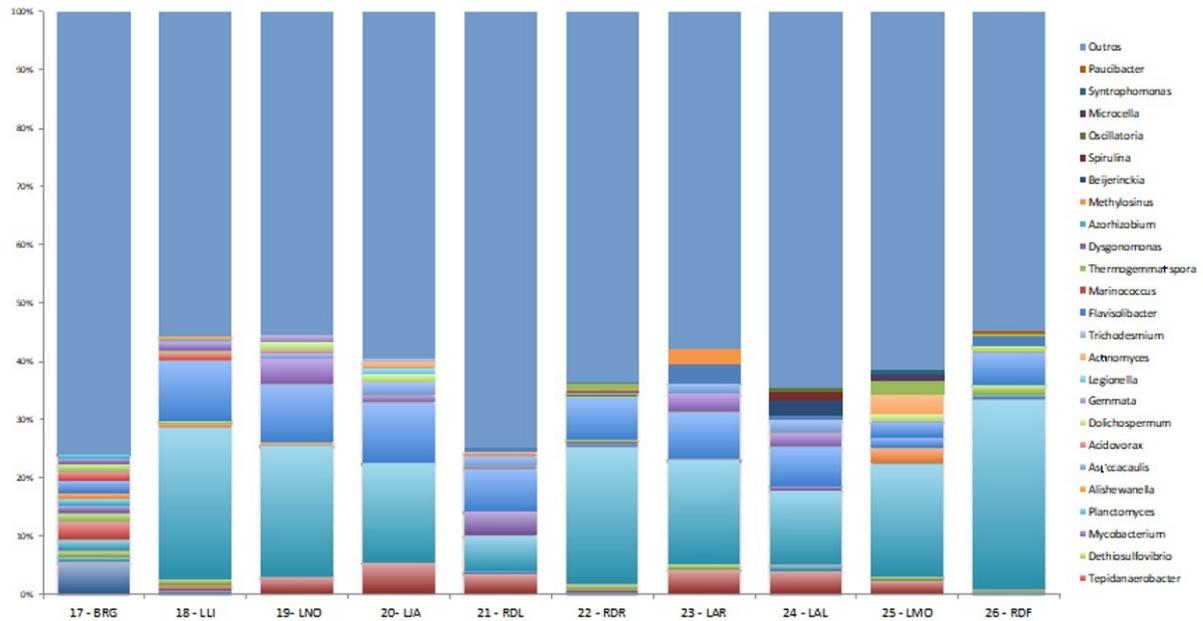
De maneira geral, o padrão taxonômico apresentado na abundância relativa das amostras ao nível de ordem revelou grande presença de Synechococcales e Rhizobiales, com exceções para a estação BRG que apresentou uma menor abundância Synechococcales e uma maior de Flavobacteriales, assim como para as estações LJA, RDL e LMO que apresentaram uma maior abundância de Brocadiales (Figura 52).

Figura 52: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Quando analisamos os gêneros microbianos encontrados nas águas de superfície (Figura 53), observamos uma proporção de destaque para os gêneros *Prochlorococcus* seguido de *Demequina*. O gênero *Candidatus Scalindua* também demonstrou uma certa abundância em alguns pontos de coleta. Adicionalmente também constatamos a forte diferenciação da estação BRG, que apresentou uma divisão mais equitativa e sofreu maior influência de grupos com menos abundância, identificados na Figura 53 como “Outros”.

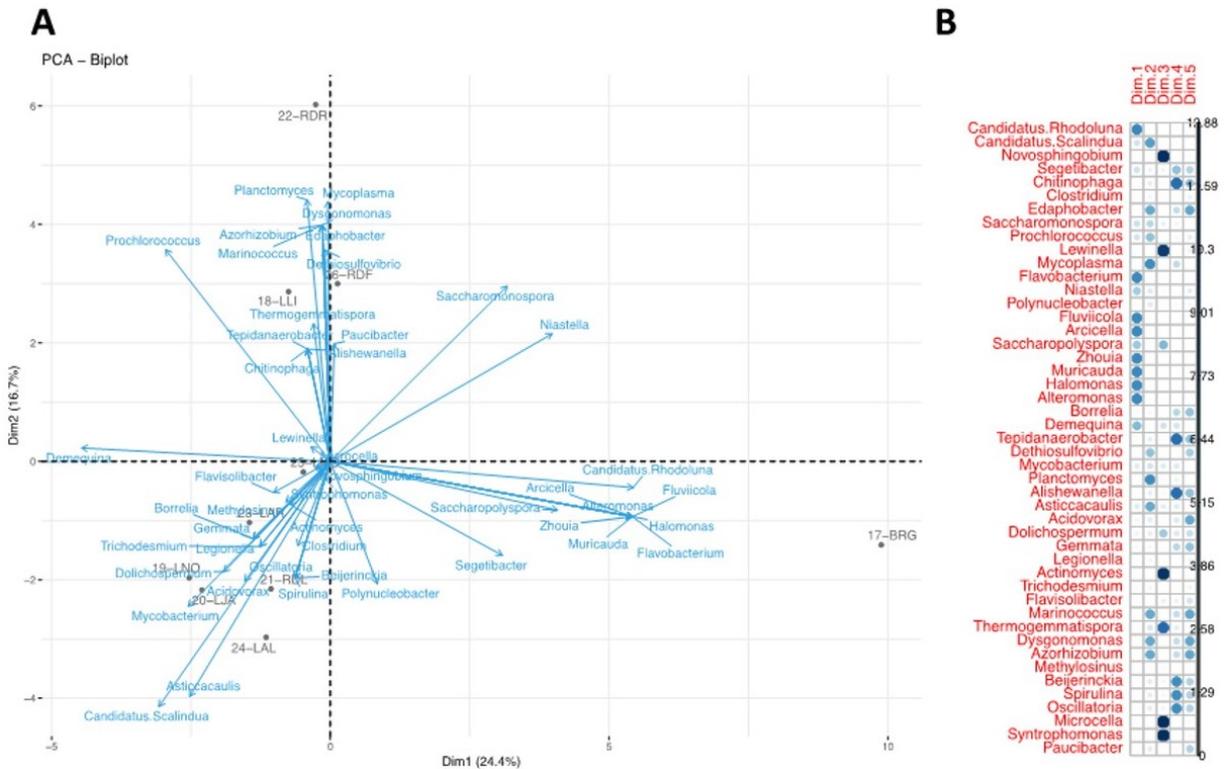
Figura 53: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

A Análise dos Componentes Principais (PCA) das amostras de água coletadas na superfície do Rio Doce demonstrou uma maior diferença da estação BRG em relação as demais estações, e que LLI, RDL e RDR, também se agruparam separadamente. Os gêneros que melhor explicam os agrupamentos ou distanciamento das estações de coleta podem ser visualizadas na Figura 54. Entre estes, o gênero *Candidatus Scalindua* foi o que melhor explicou o agrupamento da maioria das estações, com exceção de BRG, RDR, RDL LLI. O gênero *Demequia* também apresentou relevante influência na separação de BRG das demais estações.

Figura 54: Análise de PCA das amostras de água de superfície do Rio Doce. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.



Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.1.2 Água de fundo

A abundância relativa do perfil da comunidade microbiana das amostras de água de profundidade revelou a presença dominante dos Filos Proteobacteria, Actinobacteria e Cyanobacteria. Porém, para tais amostras não foi observado grandes diferenças na composição das comunidades microbianas a nível de Filo, onde apenas diferenças pontuais parecem influenciar a proporção de cada grupo na comunidade (Figura 55). A nível de Ordem, os resultados demonstraram influência para os grupos Actinomycetales e Synechococcales com a presença de Clostridiales somente nas estações BRG, LLI, LJA, RDL e LMO (Figura 56).

Figura 55: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.

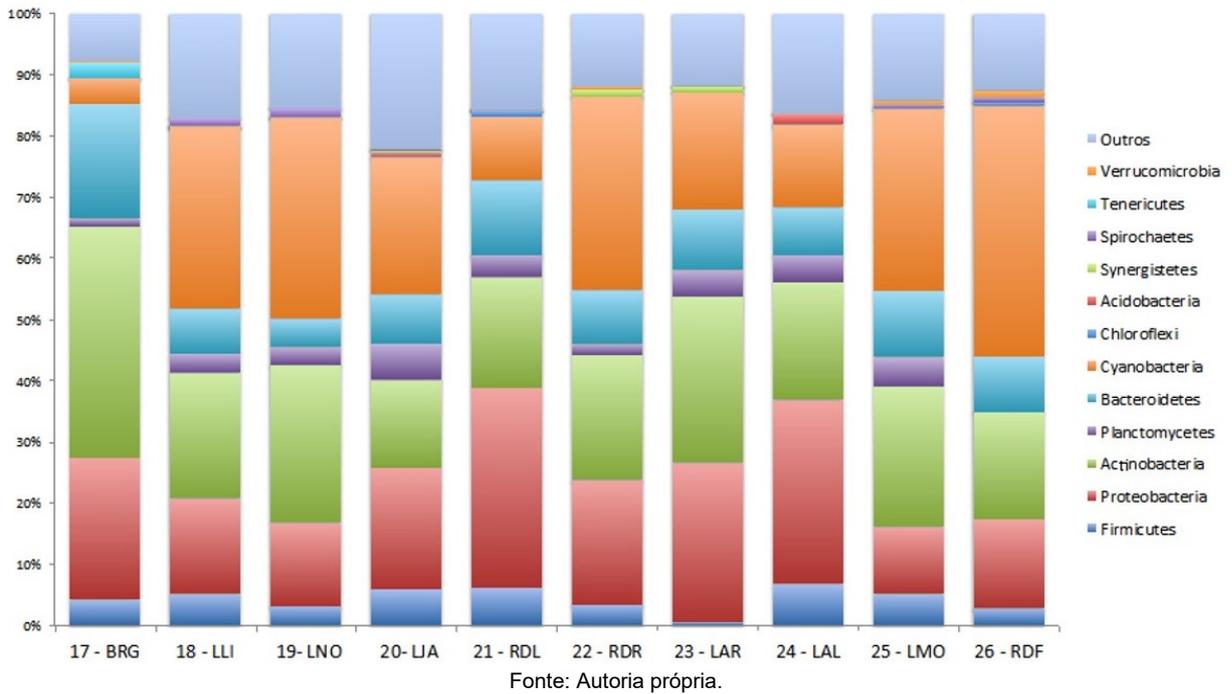
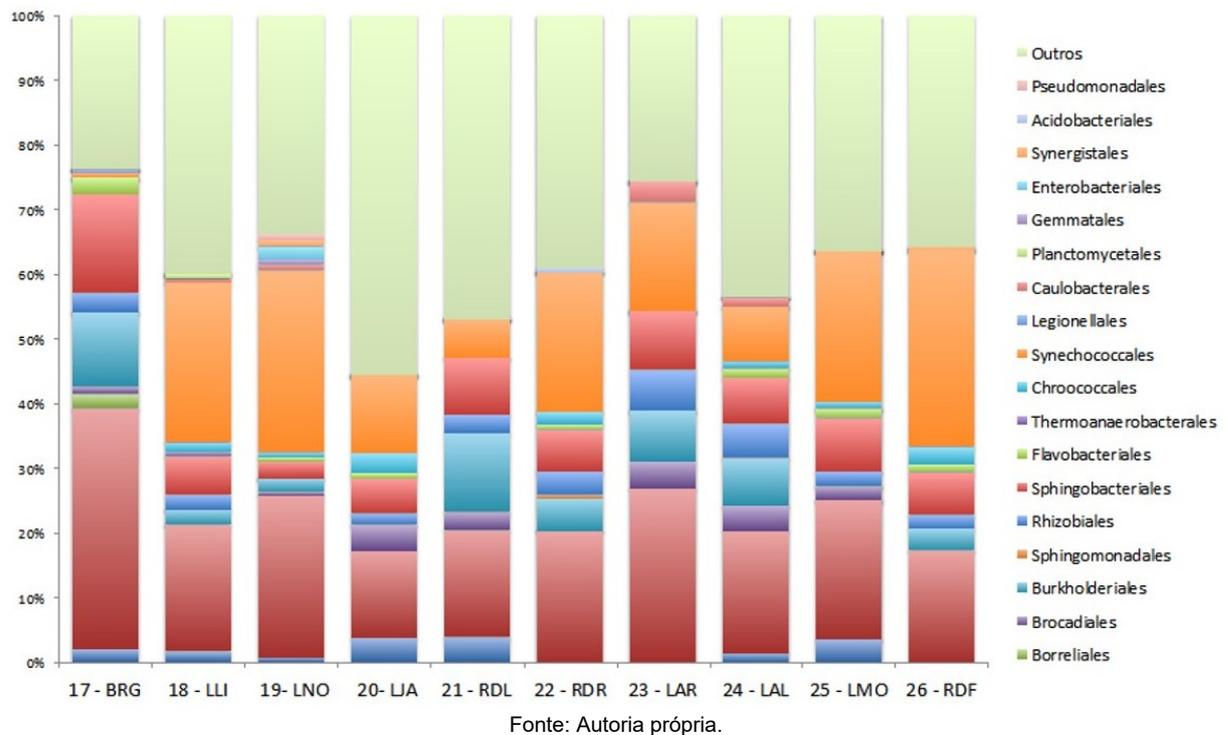


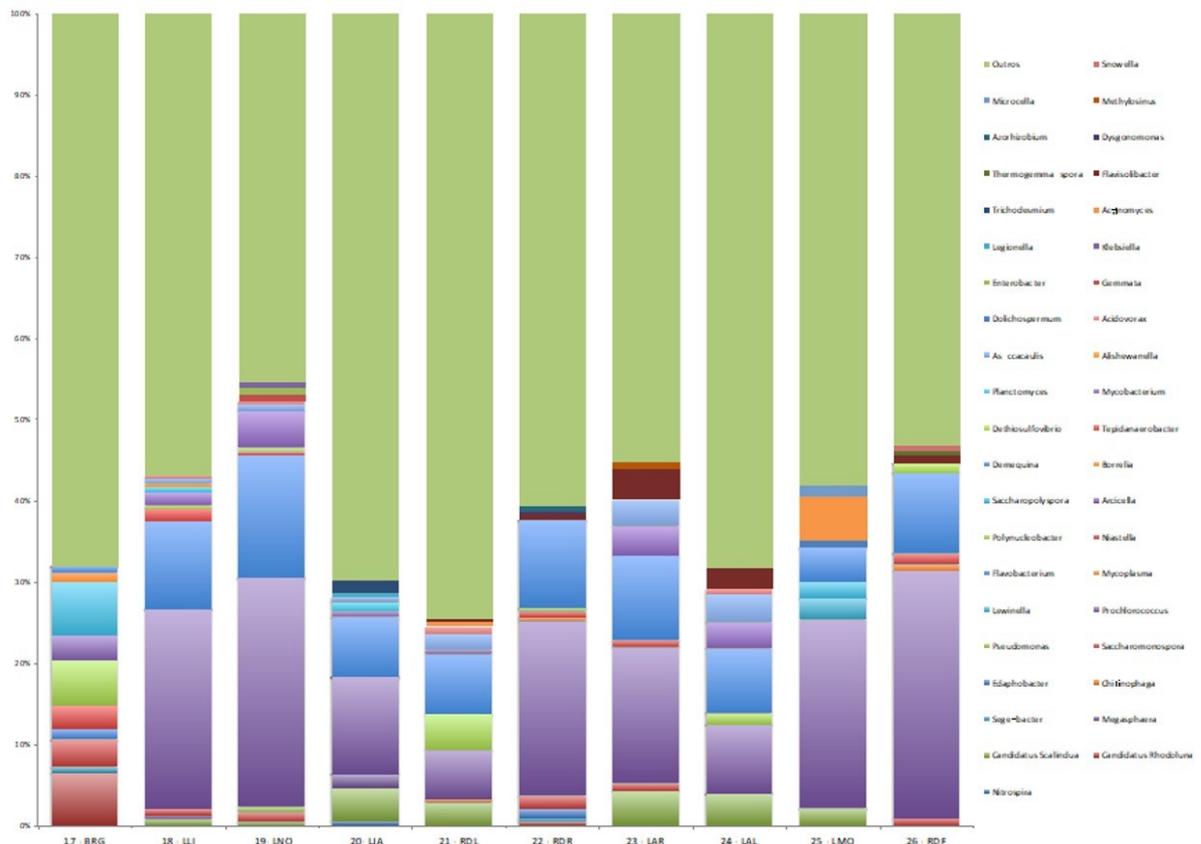
Figura 56: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas das Ordens mais frequentemente encontrados bem como as menos abundantes identificados como “Outros”.



Para as amostras de água de fundo, os gêneros mais abundantes foram *Prochlorococcus* e *Demequina*, com um aumento de *Candidatus Scalindua* na maioria dos pontos. Além disso, foram observadas diferenças nas suas proporções para cada estação analisada (Figura 57).

De acordo com a Figura 57 também pode-se observar a presença marcante de gêneros bacterianos de menor proporção (“Outros”) sendo responsáveis por mais de 50% da formação da comunidade microbiana em todas as estações analisadas.

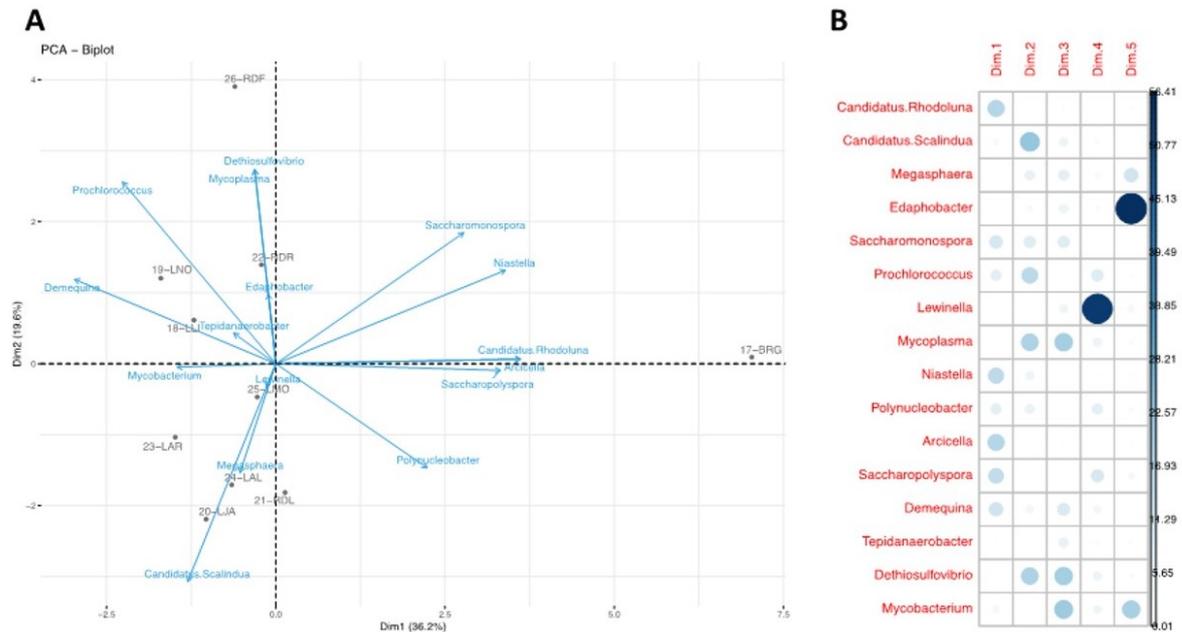
Figura 57: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

A contribuição de cada gênero encontrado pode ser observada na Figura 58. De acordo com tais indicadores, pode-se destacar os gêneros *Candidatus Scalindua* e *Prochlorococcus* como os que melhor explicaram a distribuição das diferentes estações de coleta.

Figura 58: (A) Análise de PCA das amostras de água de fundo do Rio Doce. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.

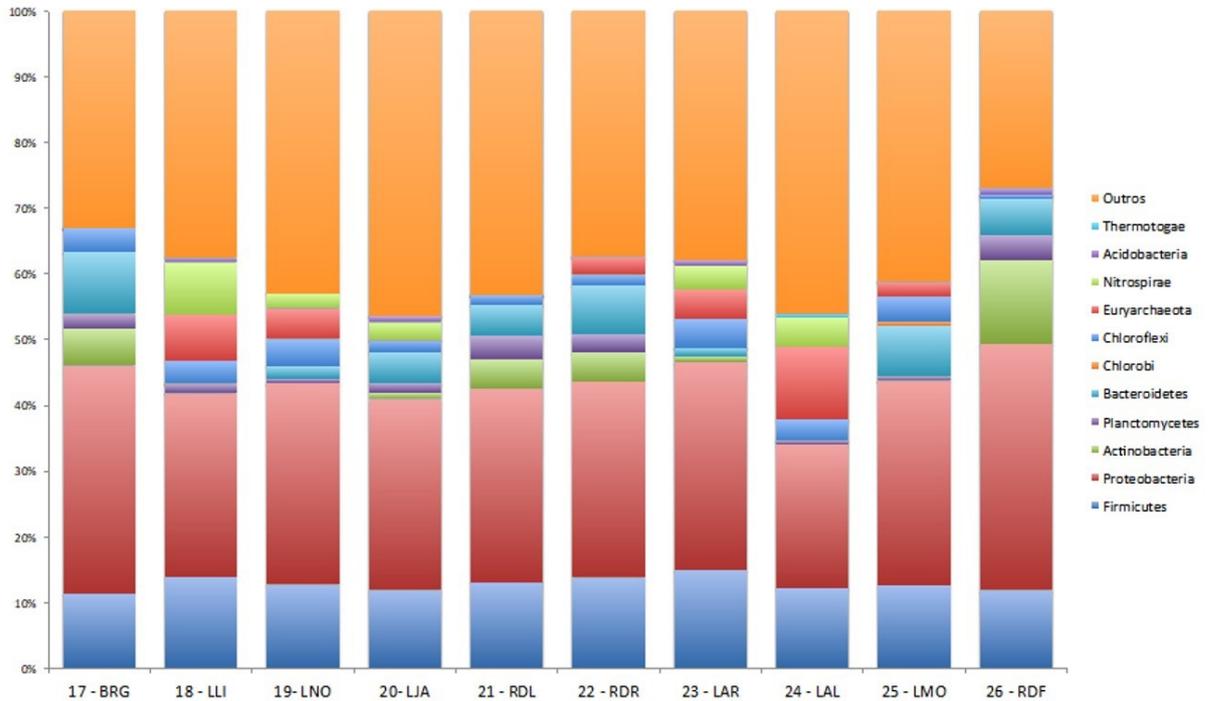


Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.1.3 Sedimento

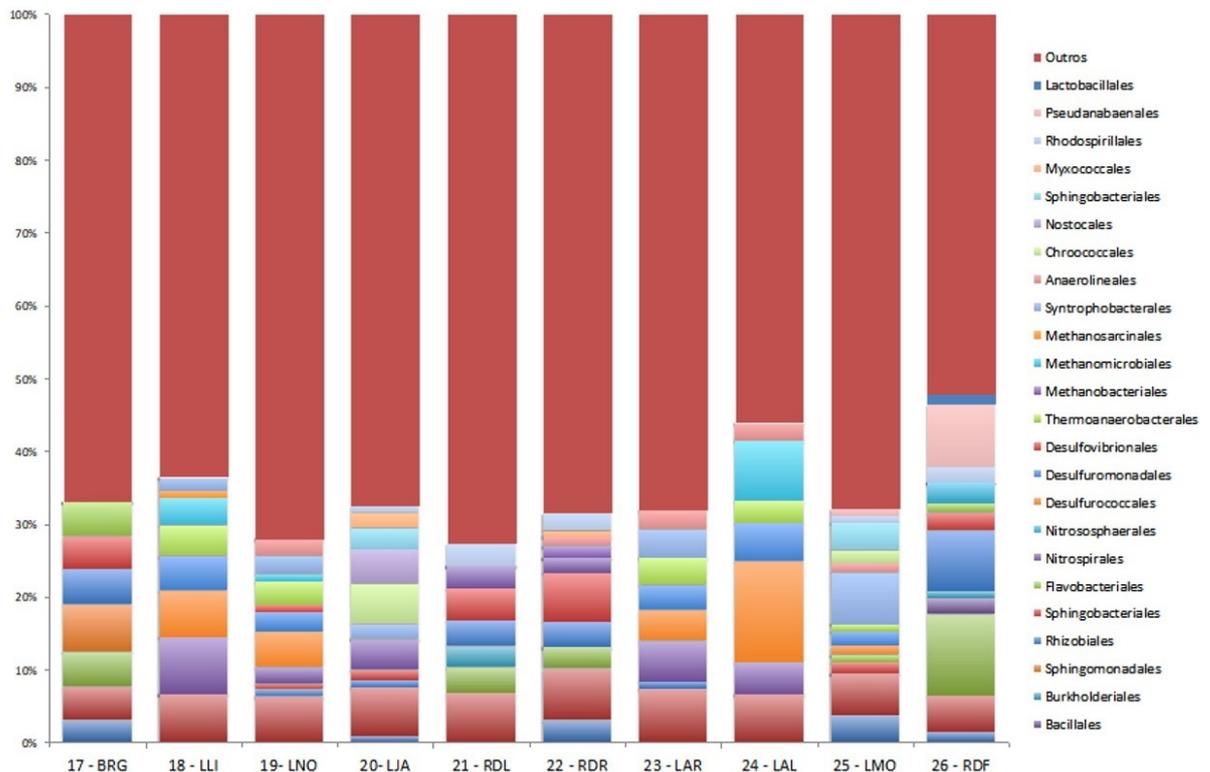
As amostras de sedimento do Rio Doce apresentaram proporção significativa dos grupos taxonômicos Proteobacteria, seguidos por Firmicutes (Figura 59). Adicionalmente, as estações também apresentaram variação nas menores proporções de filos microbianos como por exemplo o grupo Actinobacteria que se destaca na estação RDF diferentemente das outras estações. A nível de ordem, o grupo mais abundante e encontrado em todas as amostras foi Actinomycetales, sendo em alguns pontos seguido por Synechococcales (Figura 60).

Figura 59: Classificação taxonômica das amostras de sedimento do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

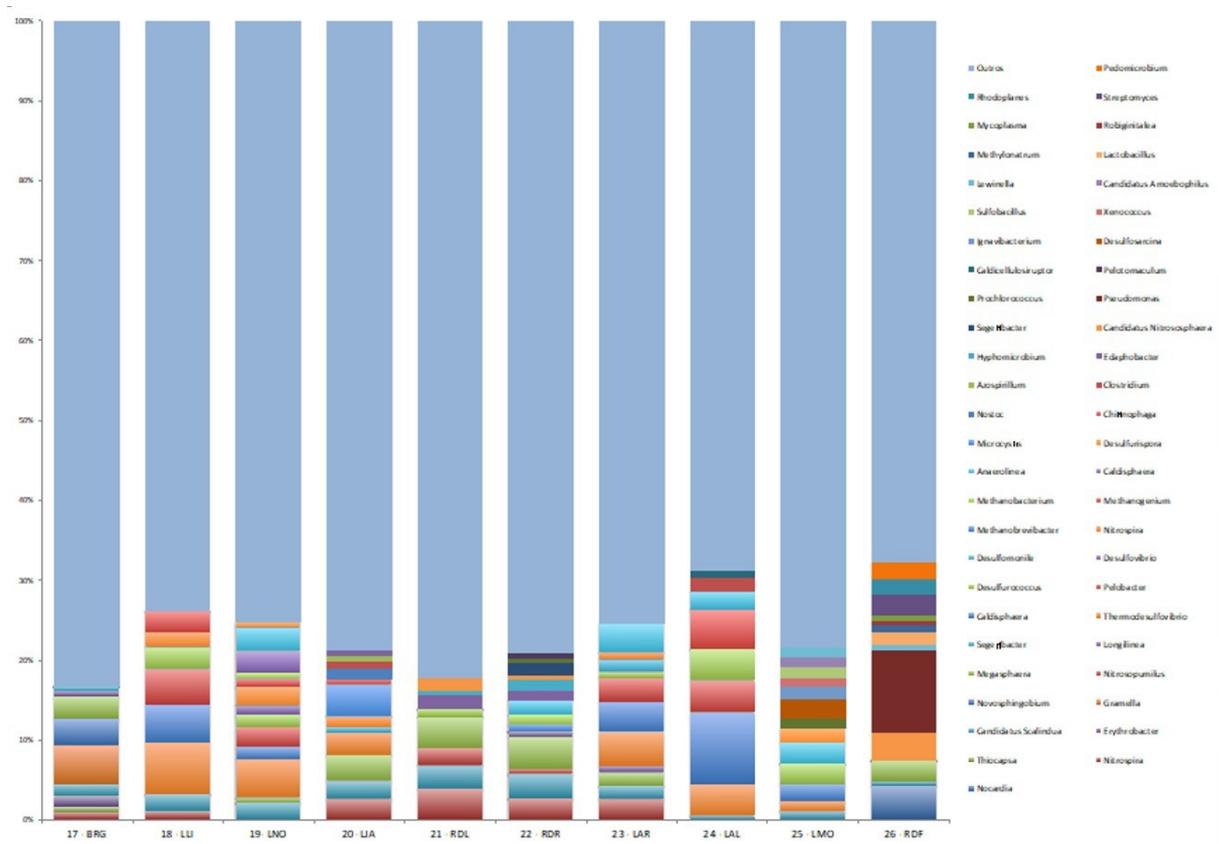
Figura 60: Classificação taxonômica das amostras de sedimento do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

A análise dos gêneros bacterianos em sedimento do Rio Doce revelou grande diversidade e diferença dentre todas as estações, como pode ser observado na Figura 61. De maneira geral, o gênero *Prochlorococcus* está presente em todos os pontos exceto na estação BRG, que também apresentou maior variabilidade dentre os grupos predominantes. O único gênero presente em todas as estações foi o *Candidatus Scalindua*, possível indicador da presença de metal pesado e descargas em rios. Sendo menos abundante nas estações LAL, LMO e RDF, as mais próximas ao mar, como também na estação BRG, a mais próxima a barragem.

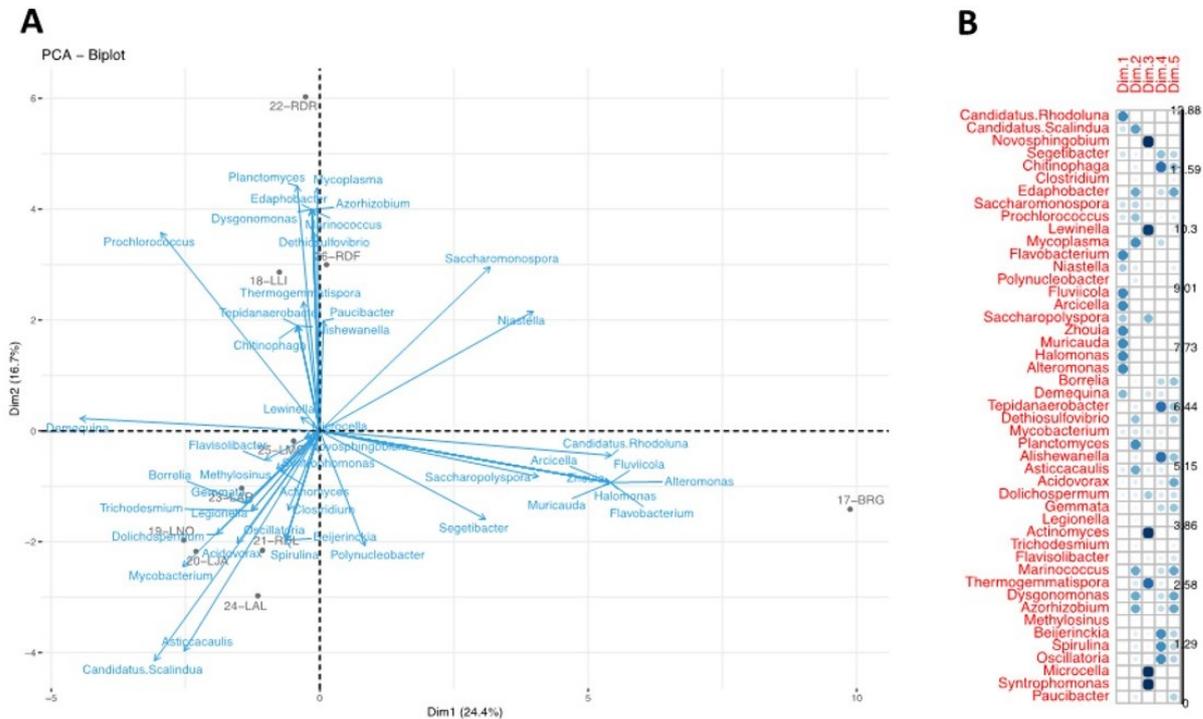
Figura 61: Classificação taxonômica das amostras de sedimento do Rio Doce. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

A Análise da distribuição e contribuição dos gêneros bacterianos revelou maior incidência de *Candidatus Rhodoluna*, *Flavobacterium*, *Fluviicola*, *Arcicella*, *Zhouia*, *Muricauda*, *Halomonas* e *Alteromonas* principalmente (Figura 62). Além disso, observou-se forte distanciamento do perfil bacteriano da estação BRG, sendo principalmente influenciado pelos grupos *Flavobacterium*, *Alteromonas* e *Candidatus Rhodolua* (Figura 62). Vale ressaltar que o grupo *Candidatus Scalindua* se mostrou como grande responsável pela estruturação da comunidade de muitas estações.

Figura 62: (A) Análise de PCA das amostras de sedimento do Rio Doce. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.



As estações de coleta de água do Rio Doce demonstraram similaridade entre as comunidades bacterianas quando comparado a amostras de água da superfície e fundo. Em relação à diversidade de Filos, quando comparados com resultados avaliados no mês do rompimento da barragem, assim como 6 e 10 meses após do rompimento (Cordeiro et al., 2019), fica claro uma maior semelhança com as amostras de 10 meses. Nas amostras, de 0 e 6 meses não há a presença do Filo Cyanobacteria, já nas amostras de 10 meses ele é o terceiro mais abundante. Nas amostras do presente trabalho, o filo Cyanobacteria é o mais abundante na grande maioria das estações de coletas. Isto pode ser explicado pela característica deste Filo em realizar fotossíntese como seu principal meio de obter energia, e a sua presença está ligada diretamente a menor turbidez da água.

Em relação aos gêneros, o mais abundante foi *Prochlorococcus*, pertencente ao Filo Cyanobacteria. Outros gêneros abundantes na água foram *Demequina* e *Candidatus Scalindua*, ambos são relacionados a ambientes de mineração e contaminados por metais pesados. O gênero *Demequina* já foi identificado em minas antigas de mineração de ferro (Köhler, 2018). Enquanto *Candidatus Scalindua* está relacionado com impactos em rios como o aumento da descarga e contaminação por metais pesados (Dang, 2013; Awata et al, 2014), similar ao que ocorreu no Rio Doce. Estes dois gêneros, *Demequina* e *Candidatus Scalindua*, se apresentam como possíveis bioindicadores do impacto do rompimento da barragem de Mariana. O gênero *Demequina* foi encontrado em grande abundância em todos os pontos de coletas, com exceção do ponto BRG. Enquanto *Candidatus Scalindua* não foi

encontrado apenas em BRG, RDR e RDF. Esses resultados sugerem um menor impacto na comunidade bacteriana da água do rio no ponto BRG.

A análise da comunidade bacteriana no sedimento do Rio Doce revelou grande diversidade e diferença dentre todas as estações. No entanto, apenas um gênero foi encontrado em todos pontos de coleta, justamente o gênero *Candidatus Scalindua*, incluindo o ponto BRG que não havia apresentado este gênero na água. Este resultado revela que possivelmente o sedimento de todas estações analisados do rio, ainda possui possíveis bioindicadores bacterianos do impacto do rompimento da barragem de Fundão. No entanto, ele apresentou menor abundância relativas em estações próximas ao mar e na estação mais próxima a barragem.

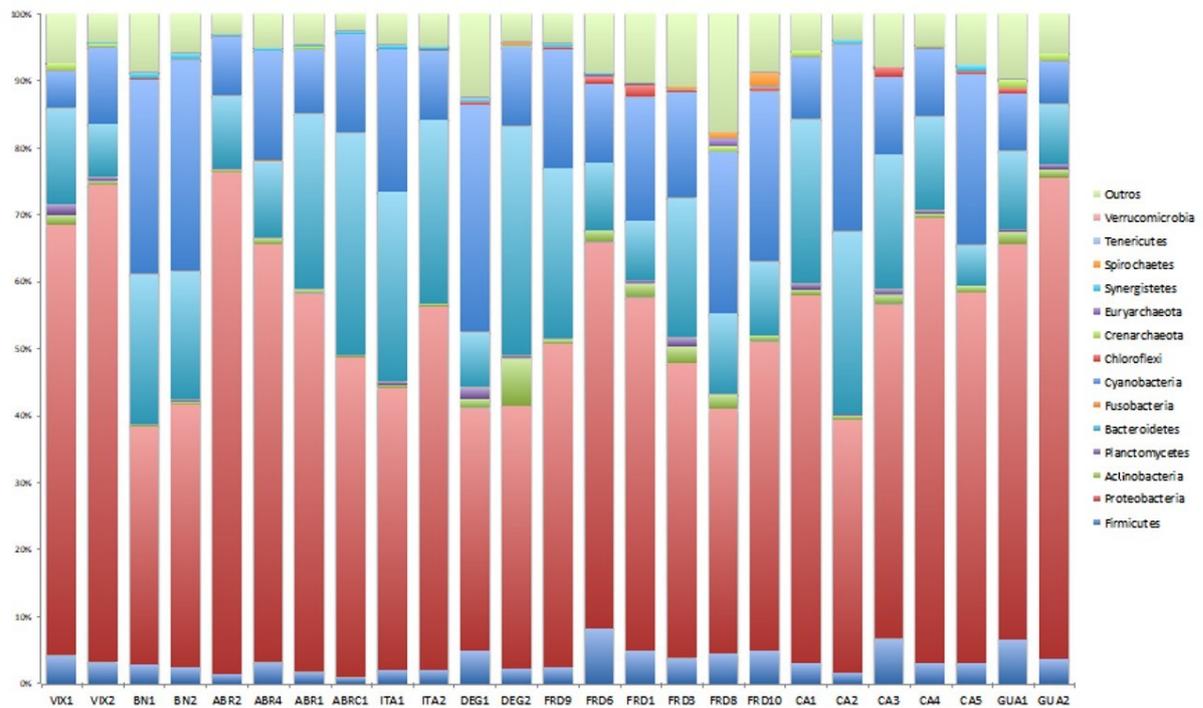
O gênero *Candidatus Scalindua* é uma bactéria com atividade ANAMMOX (do inglês *Anaerobic Ammonium Oxidation*), e o aumento da atividade ANAMMOX pode estar relacionado a presença de metais pesados, como o ocorrido no Rio Doce. O aumento desta atividade pode impactar ciclos biogeoquímicos importantes para o ambiente, como a ciclagem de nitrogênio, pois o aumento da atividade ANAMOX pode significar uma elevação na perda do nitrogênio fixado (Danget al, 2013; Awata et al, 2014).

#### **4.2.2 Resultados – Ambiente marinho: Foz do Rio Doce e região costeira adjacente**

##### **4.2.2.1 Água de superfície**

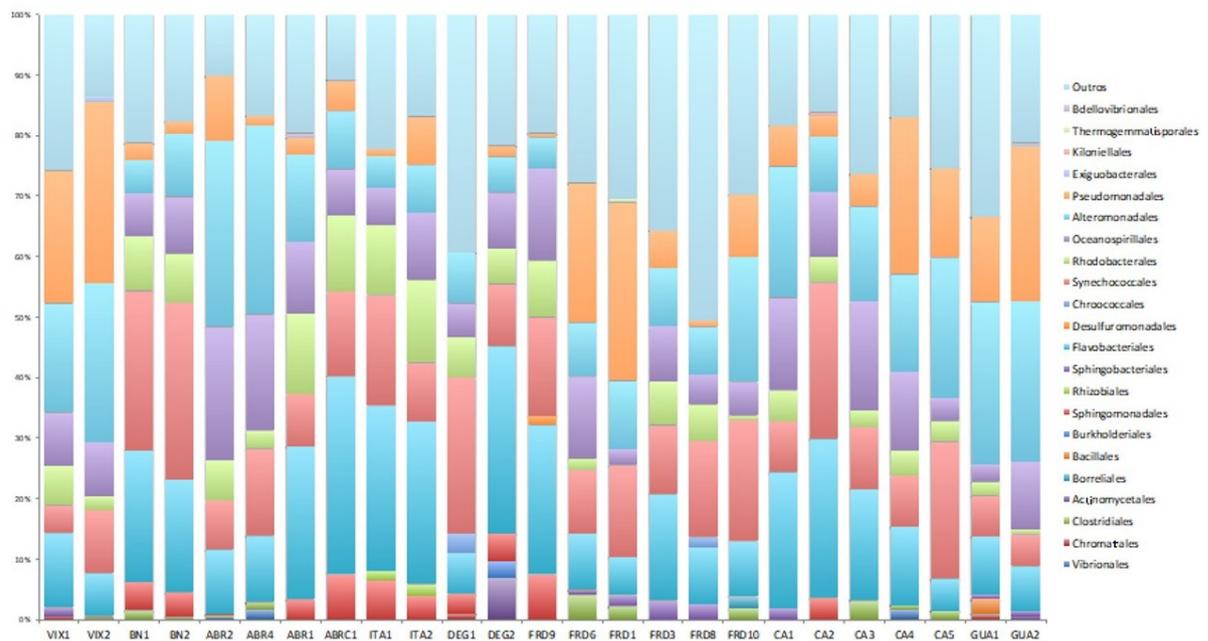
A abundância relativa da água de superfície do mar apresentou grande similaridade entre todos os pontos no que diz respeito aos Filos encontrados e também suas respectivas abundâncias relativas. De maneira geral, os maiores grupos presentes em tais amostras foram Proteobacteria, Bacteroidetes, Cyanobacterias e Firmicutes (Figura 63). De forma similar, este perfil também pode ser observado nos grupos a nível de ordem (Figura 64), com diferenças pontuais na abundância de cada grupo nas estações avaliadas. Porém, quando se observa a Figura 65, fica claro a presença de alguns gêneros bacterianos específicos para cada estação. Neste caso, as estações VIX1, VIX2, ABR2, ABR4, FRD10, GUA1 e GUA2 apresentam predominância de grupos tais como *Pseudoalteromonas*, *Psychrobacter* e *Alteromonas*.

Figura 63: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



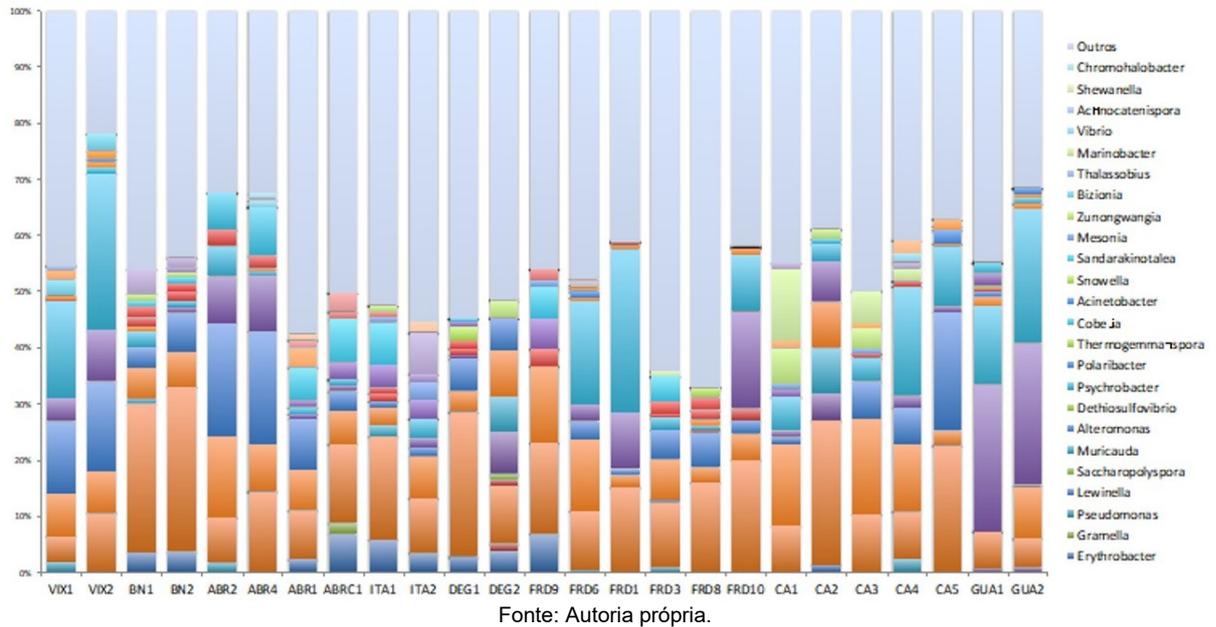
Fonte: Autoria própria.

Figura 64: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”.



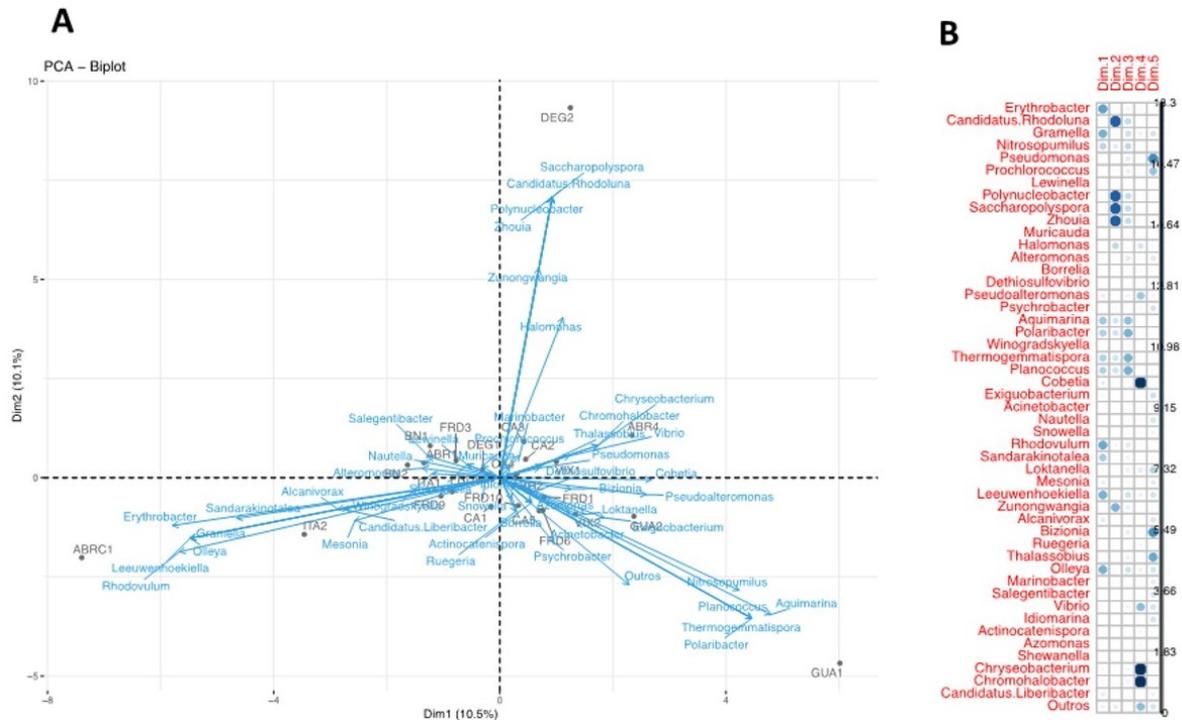
Fonte: Autoria própria.

Figura 65: Classificação taxonômica das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



De acordo com as análises de componentes principais observa-se que as estações ABRC1, GUA1 e DEG2 apresentam os perfis mais distintos quando comparado as águas de superfície. Adicionalmente, os gêneros *Saccharopolyspora*, *Candidatus Rhodula*, *Polynucleobacter* e *Zhouia* estão altamente relacionados a estação DEG2, enquanto que os gêneros *Erythrobacter*, *Gramella*, *Olleya*, *Leeuwenhoekiella* e *Rhodovulum* se relacionam a estação ABRC1. Os gêneros *Aquimarina*, *Nitrosopumilus*, *Planococcus*, *Thermogemmatispora* e *Polaribacter* estão fortemente associados ao perfil encontrado na estação GUA1 (Figura 66).

Figura 66: (A) Análise de PCA das amostras de água de superfície da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.

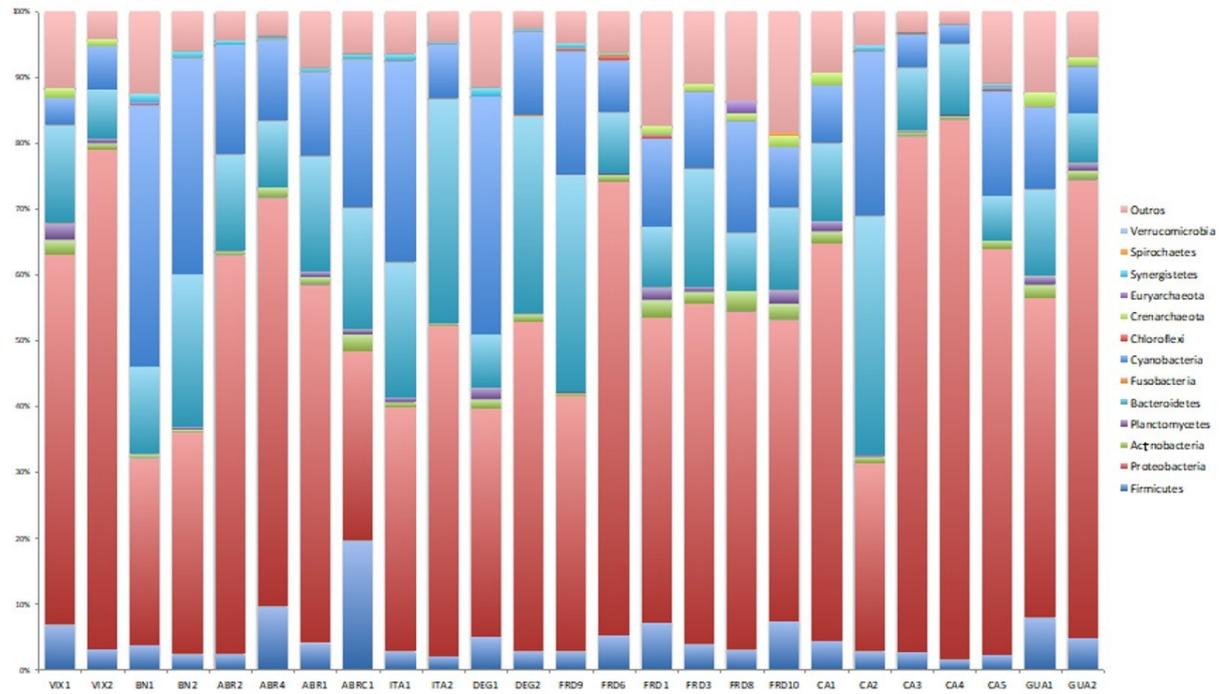


Fonte: Autoria própria.

#### 4.2.2.2 Água de profundidade

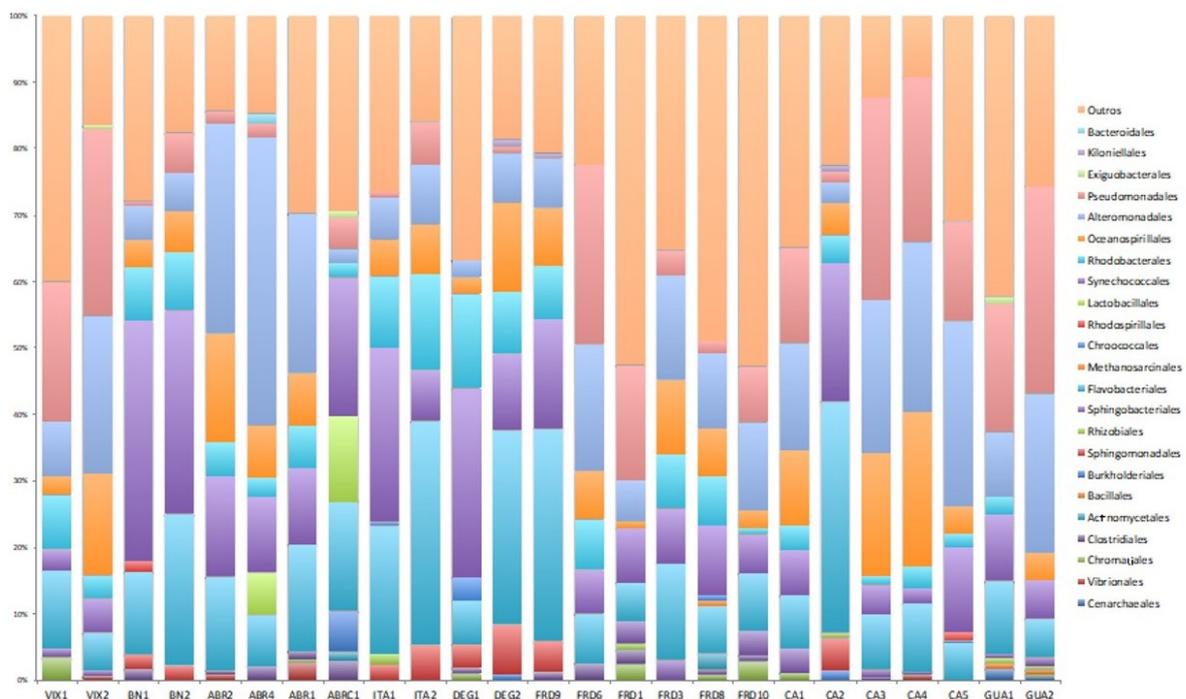
As análises com amostras de água ao longo foz do Rio Doce e região costeira adjacente mostraram que todos os pontos apresentam similaridade no que diz respeito a presença dos Filos mais abundantes. De maneira geral encontramos os Filos Proteobacteria, Firmicutes, Cyanobacteria e Bacteroidetes em todas as estações, porém em proporções específicas. É importante observar que apenas para a estação ABRC1 o Filo Firmicutes está presente em uma proporção maior que o dobro do que é encontrado nas demais estações (Figura 67). Quando analisamos a nível de Ordem bacteriana observamos grande diversidade além da presença e/ou ausência de grupos específicos em determinadas estações, como por exemplo a presença maior de Vibrionales nas estações BN1, BN2, ABR1, ITA1, ITA2, DEG1, DEG2, FRD9 e CA2 quando comparadas as outras estações, bem como a ausência de Oceanospirillales na estação ABRC1, uma vez que este grupo aparece em todas as demais estações (Figura 68).

Figura 67: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

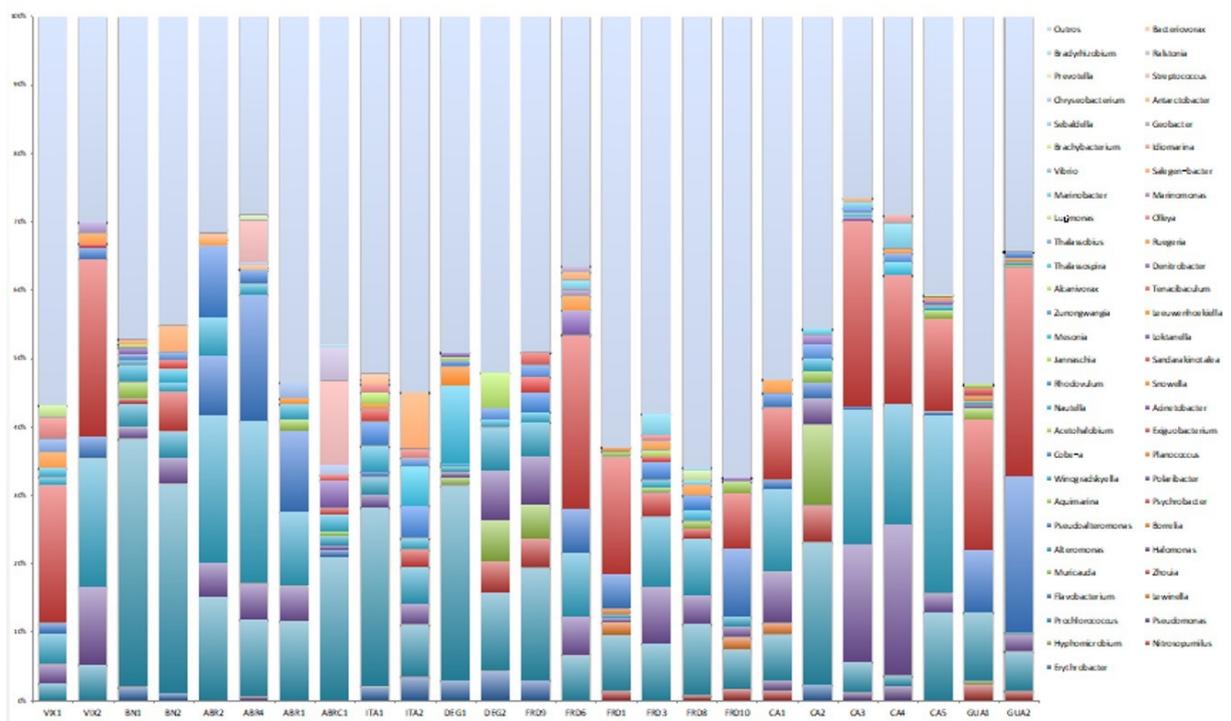
Figura 68: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

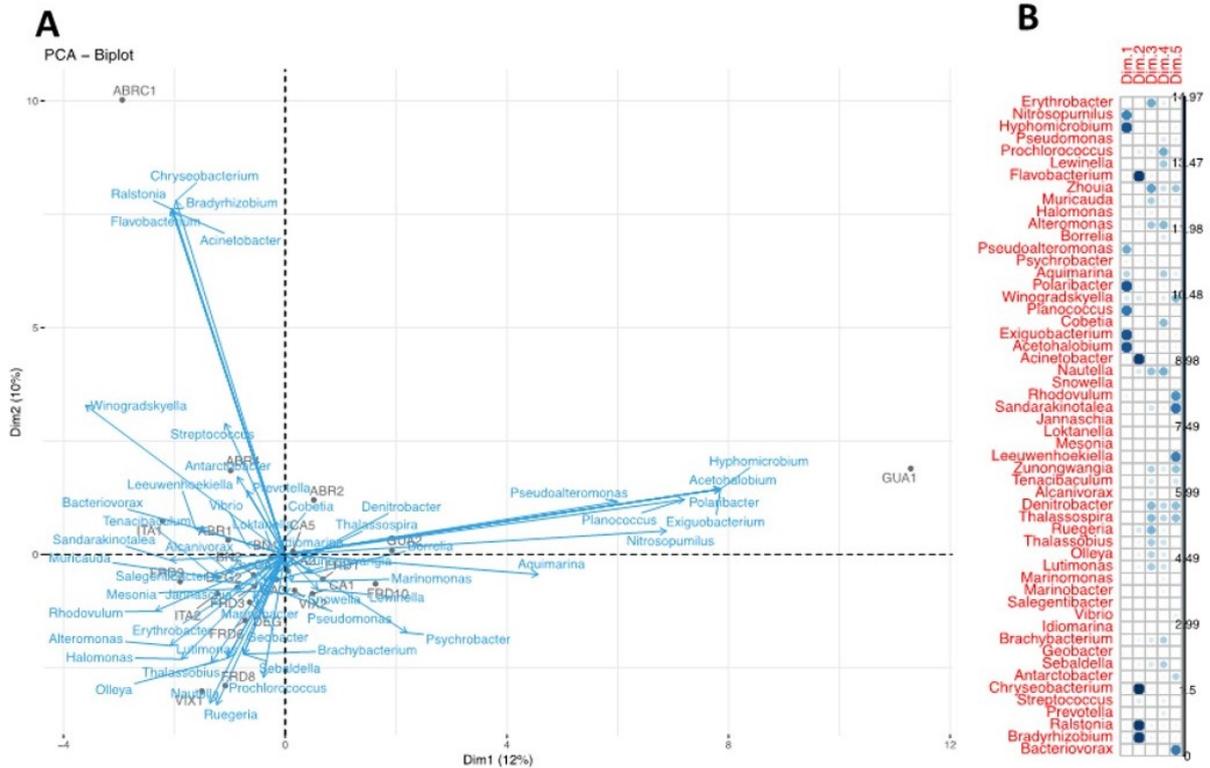
Os gêneros bacterianos também apresentaram distribuição específica para cada estação ou grupo de estações (Figura 69). Os gêneros *Psychrobacter*, *Alteromonas*, *Prochlorococcus*, *Halomonas* e *Pseudoalteromonas* foram mais representativos para estações específicas, podendo representar diferentes respostas ambientais. A distribuição observada em tais gêneros também ocasionou um forte distanciamento do perfil bacteriano encontrado para a estação ABRC1 quando comparado aos demais pontos, bem como também para a estação GUA1 que se mostrou diferente do core principal composto pelas demais estações (Figura 70).

Figura 69: Classificação taxonômica das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

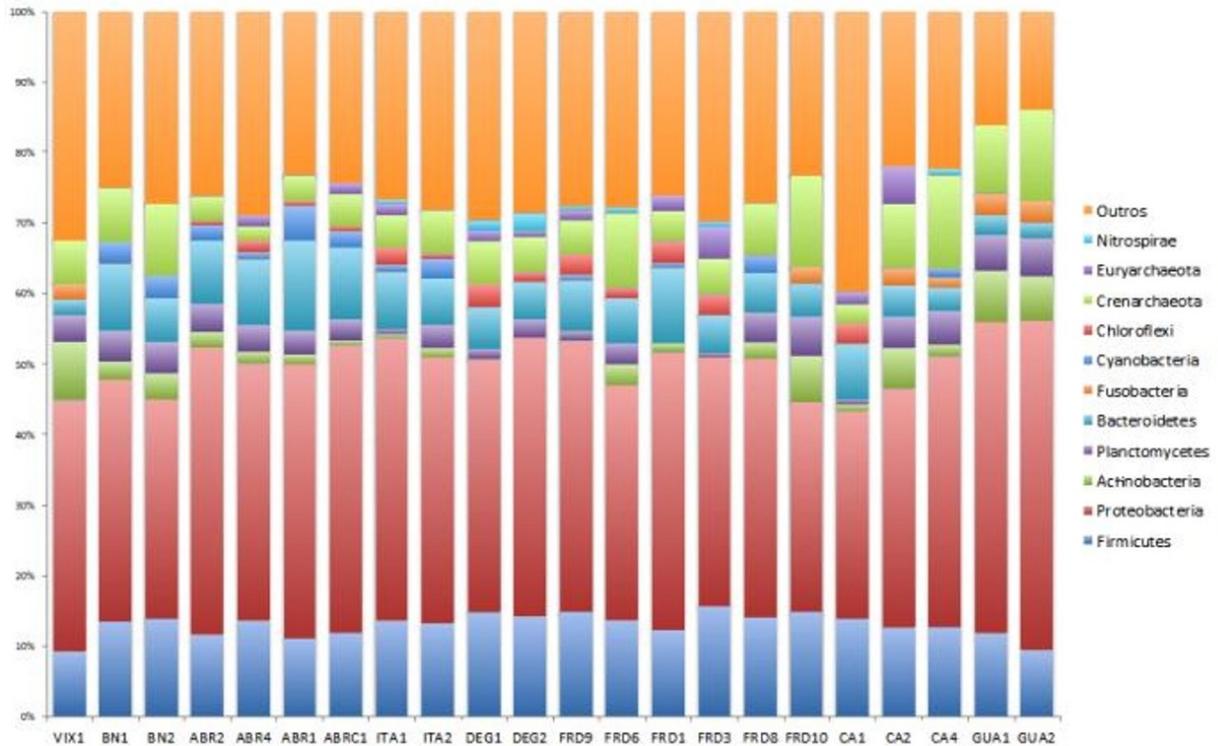
Figura 70: (A) Análise de PCA das amostras de água de fundo da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influencias na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.



#### 4.2.2.3 Sedimento

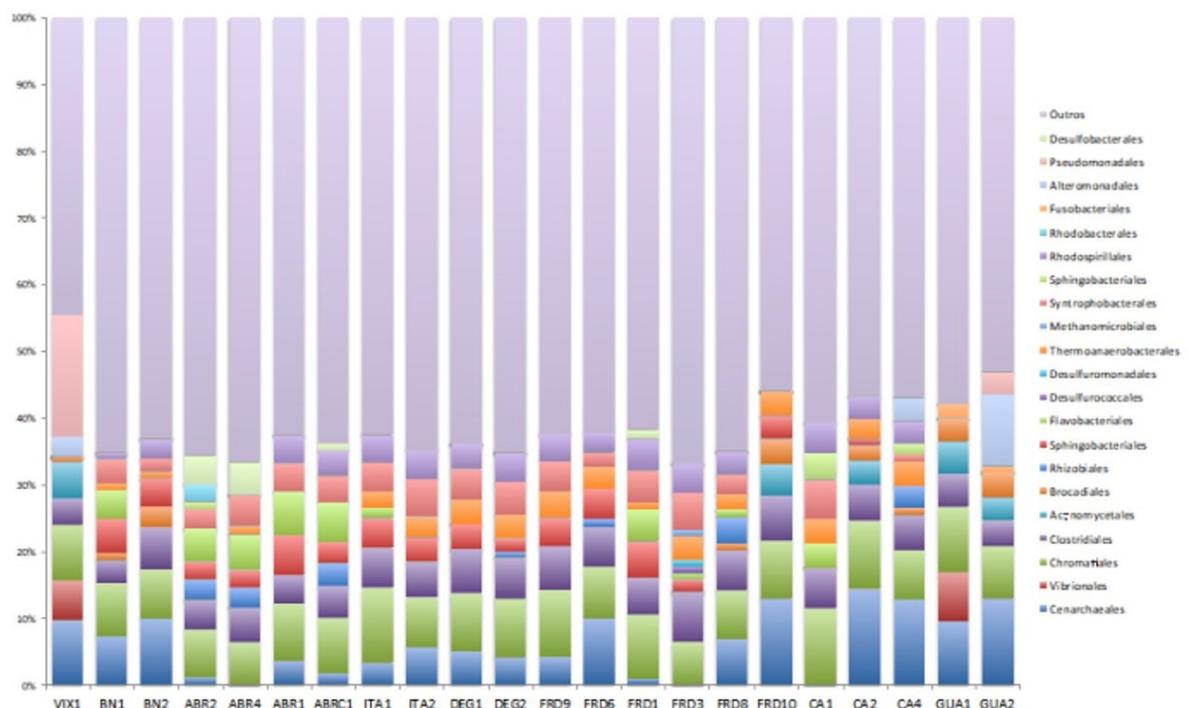
As amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente apresentaram um perfil muito similar no que diz respeito aos Filos microbianos, como pode ser observado na Figura 71. Basicamente todos os pontos apresentam diversidade e abundância semelhante para este nível taxonômico. Quando se observa a nível de ordem é possível constatar perfis similares, porém algumas estações começam a demonstrar diferenças na abundância de alguns grupos. Podemos citar a presença maior de Pseudomonadales na estação VIX1 e na abundância da Archaea do grupo Crenarchaeota nas estações avaliadas (Figura 72). Tais diferenças, foram ainda mais acentuadas na observação da abundância dos gêneros encontrados (Figura 73). Foi possível perceber a forte presença de Psychrobacter na estação VIX1, GUA1 e GUA2.

Figura 71: Classificação taxonômica das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



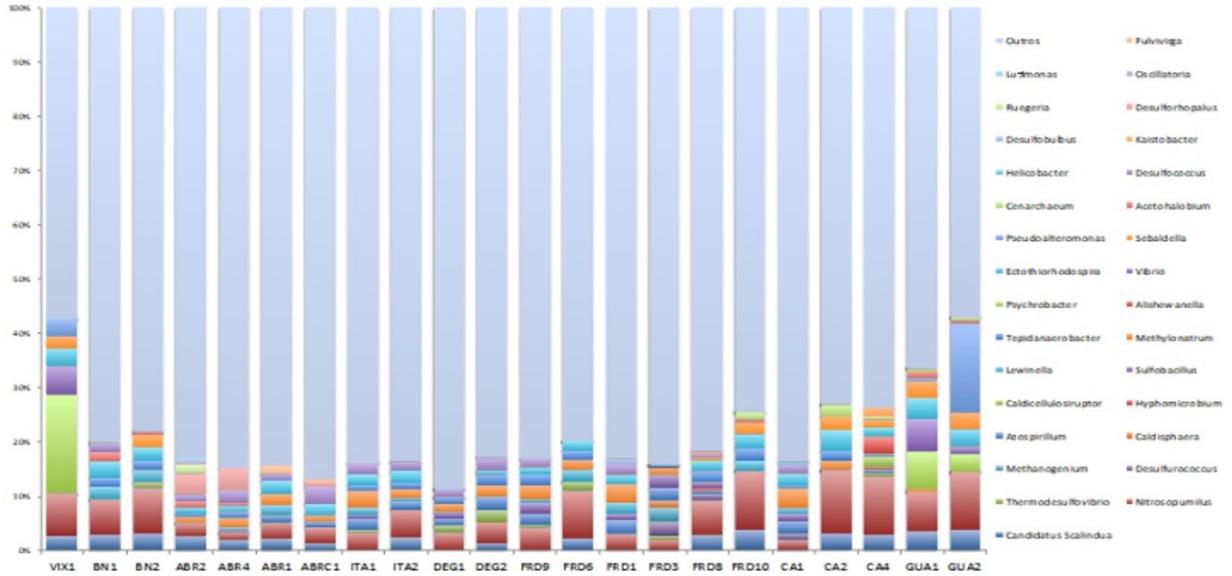
Fonte: Autoria própria.

Figura 72: Classificação taxonômica das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

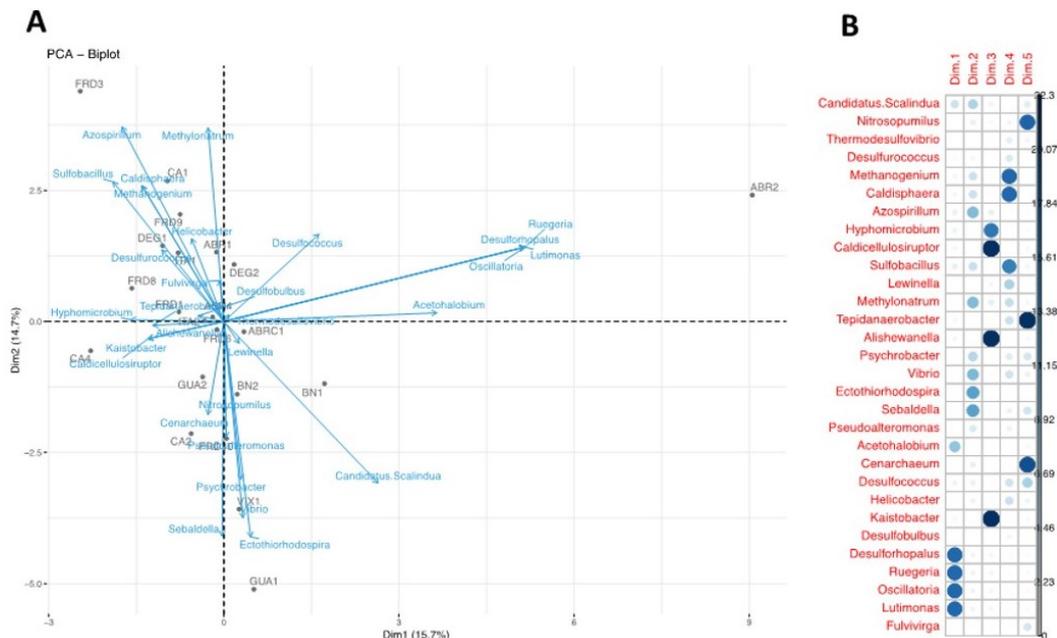
Figura 73: Classificação taxonômica das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

Quando sob análise dos componentes principais, os gêneros com maior contribuição para o agrupamento foram *Desulphoropalus*, *Ruegeria*, *Oscillatoria* e *Lutimonas* (Figura 74A). Todos estes grupos apresentaram forte ligação ao ambiente da estação ABR2 (Figura 74A). Adicionalmente, a estação VIX1 foi agrupada com GUA1, enquanto que os pontos próximos a foz do Rio Doce parecem ser influenciados de maneira semelhante e por isto se agruparam no primeiro quadrante.

Figura 74: (A) Análise de PCA das amostras de sedimento da foz do Rio Doce e região costeira adjacente. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.



Fonte: Autoria própria.

Em relação ao ambiente marinho ele é sabidamente mais diverso do que o rio em aspectos microbiológicos, como demonstram os resultados do presente relatório. Quando comparado toda essa grande diversidade microbiana, fica claro que a água, tanto de superfície quanto de fundo, das estações mais distantes da foz do Rio Doce (ABRC1 e GUA1) apresentaram uma comunidade microbiana mais distinta. Em relação ao sedimento as estações que demonstraram maior diferença foram também dois pontos extremos, GUA1 e ABR2. Estes resultados podem estar relacionados ao impacto do rompimento da barragem, tanto na água, em diferentes profundidades, quanto no sedimento.

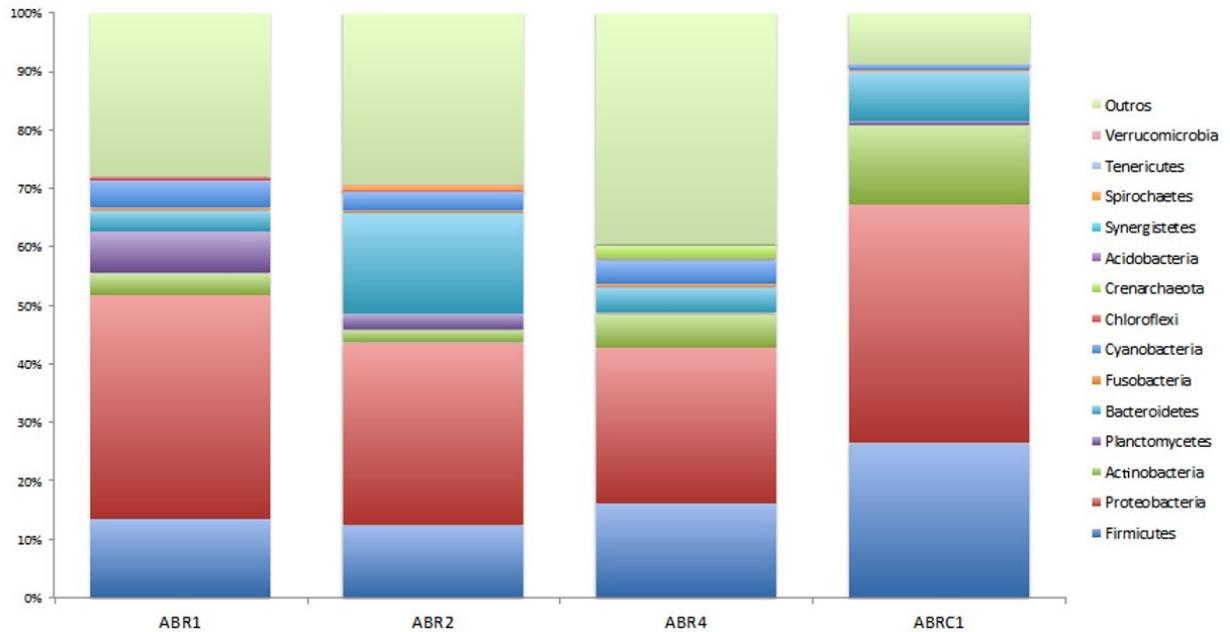
#### 4.2.3 Resultados – Corais

##### 4.2.3.1 *Mussismilla harttii*

A análise da abundância relativa da microbiota associada ao coral *Mussismilla harttii* revelou um maior número de grupos taxonômicos em corais dos recifes de Abrolhos, quando comparados com o recife controle. Isto sugere um estresse ambiental. A alteração na microbiota é visível até mesmo a nível de Filo, com uma comunidade mais distinta em corais do recife controle (ABRC1). ABRC1 demonstrou uma maior abundância de *Firmicutes* e *Actinobacteria* (Figura 75). Adicionalmente, o Filo *Planctomycetes* foi encontrado em maior proporção na estação ABR1 e ABR2, enquanto que nas estações ABR4 e ABRC1 esteve presente em proporções ínfimas. Apesar de menor diversidade entre os Filos encontrados, quando analisamos a nível de ordem observamos uma melhor distribuição dos grupos microbianos, com acentuada presença de *Actinomycetales* e *Bacillales* nas amostras ABRC1, *Rodospirillales* e *Clostridiales* nas amostras ABR4, *Flavobacteriales* nas amostras de ABR2 e *Rhizobiales* nas amostras de ABR1 (Figura 76).

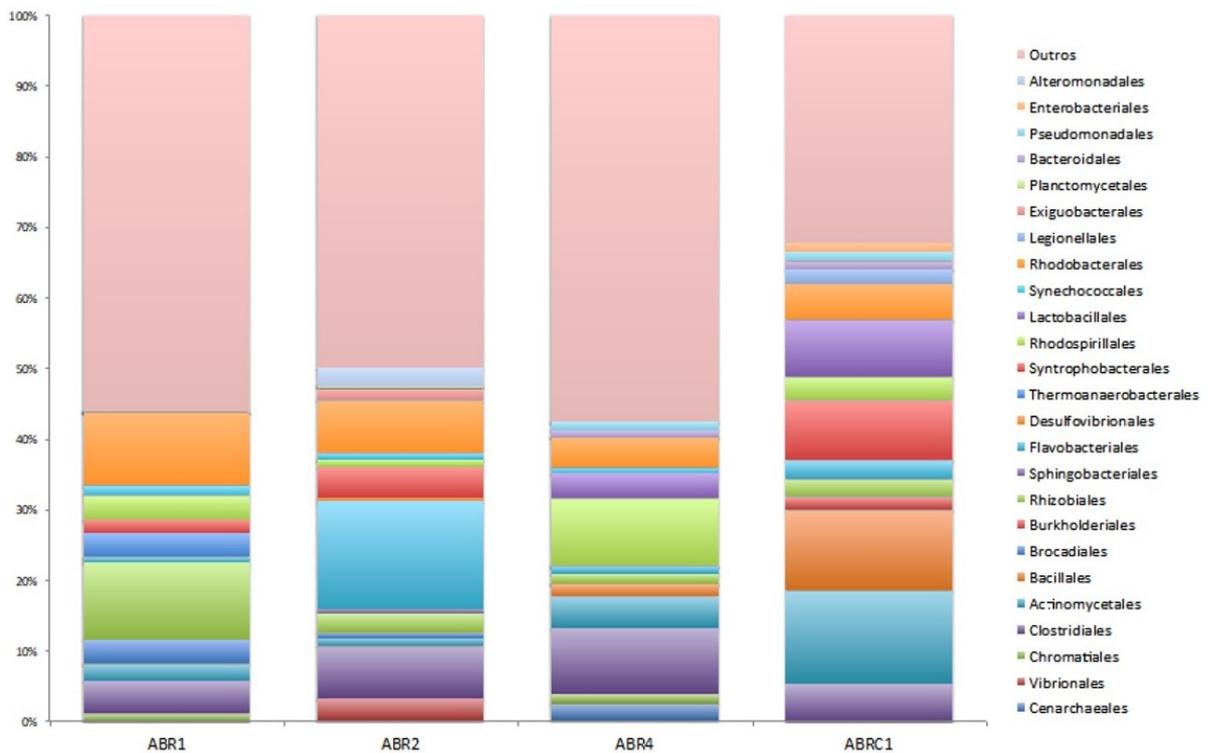
Alguns grupos microbianos são possíveis bioindicadores de estresse ambiental em corais, são eles: *Vibrionales*, *Flavobacteriales*, *Rhodobacterales*, *Alteromonadales*, *Rhizobiales*, *Rhodospirillales* e *Desulfovibrionales* (McDevitt-Irwin, 2017). A grande maioria destes grupos foi encontrado principalmente nos corais das estações de Abrolhos e não no recife controle, são eles: *Vibrionales* com alta abundância em *M. harttii* na estação ABR2; *Alteromonadales* em *M. harttii* em ABR2; *Rhizobiales* em maior abundância em *M. harttii* em ABR1 e *M. alcicornis* em ABR1 e ABRC1; *Rhodospirillales* em maior abundância em *M. alcicornis* em ABR1 e *M. harttii* ABR4; e *Desulfovibrionales* em *M. alcicornis* em ABR1 e ABR4 e *M. harttii* ABR2. Ou seja, nos recifes das estações ABR1 e ABR2 foram encontrados 3 indicadores de estresse, na ABR4 2 indicadores e na ABRC1 apenas 1 indicador.

Figura 75: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Mussismilia hartii*. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como "Outros".



Fonte: Autoria própria.

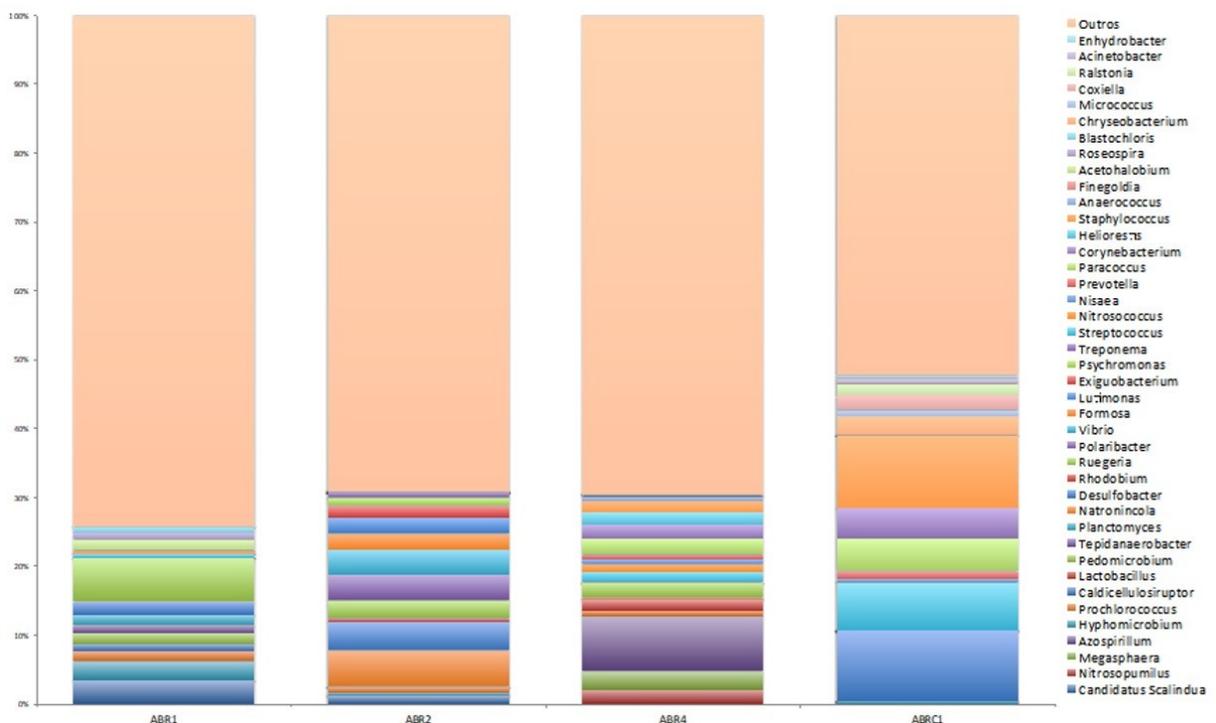
Figura 76: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Mussismilia hartii*. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como "Outros".



Fonte: Autoria própria.

A abundância relativa dos gêneros encontrados nas amostras *Mussismilla harttii* apresentou grande diversidade visto que os grupos de maior abundância não somaram 50% dos organismos presentes nestes ambientes. Contudo, vale destacar a forte presença de *Ruegeria* na estação ABR1, *Natronincola* na estação ABR2, *Azospirillum* na estação ABR4 e *Desulfobacter* na estação ABRC1 (Figura 77). O que chamou atenção em relação aos gêneros, foi a presença do possível bioindicador de alta descarga e metais pesados em rio, o gênero *Candidatus Scalindua* em corais dos recifes das estações ABR1 e ABR2, os mesmos recifes que apresentaram maior número de bioindicadores de estresse.

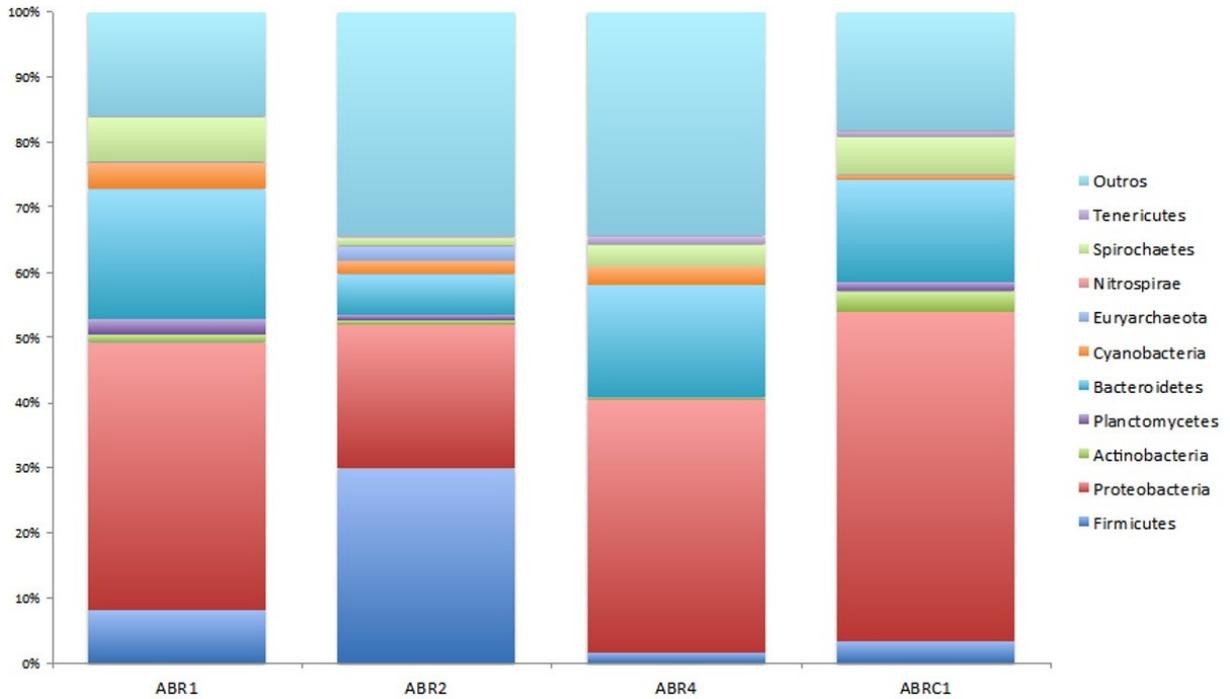
Figura 77: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Mussismilla harttii*. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



A análise da contribuição dos gêneros bacterianos no agrupamento das amostras de *Mussismilla harttii* revelou um grande número de gêneros influenciando o perfil das comunidades bacterianas presentes nas quatro estações analisadas e com contribuições similares (Figura 78B). Este perfil pode ser constatado também no agrupamento gerado na Figura 78A, uma vez que os vetores referentes as variáveis se apresentam em direções distintas, porém com intensidades similares. Este perfil fez com que cada amostra fosse agrupada em um quadrante sendo altamente influenciadas por comunidades específicas. Apesar disto, as amostras mais distintas foram ABR1 e ABR2, enquanto que ABR4 e ABRC1 compartilham de mais características. Padrão que foi também visualizado quando avaliado a presença de bioindicadores de estresse e do gênero *Candidatus Scalindua*, possível bioindicador do rompimento da barragem.

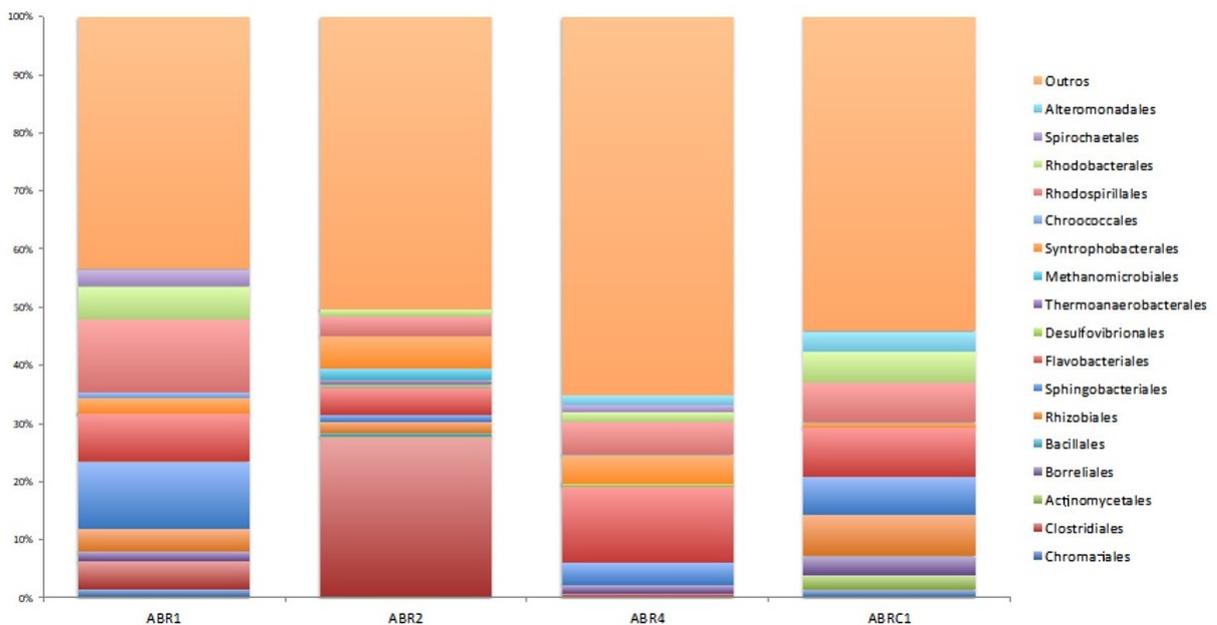


Figura 79: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Millepora alcicornis*. São mostradas as abundâncias relativas dos Filos mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como "Outros".



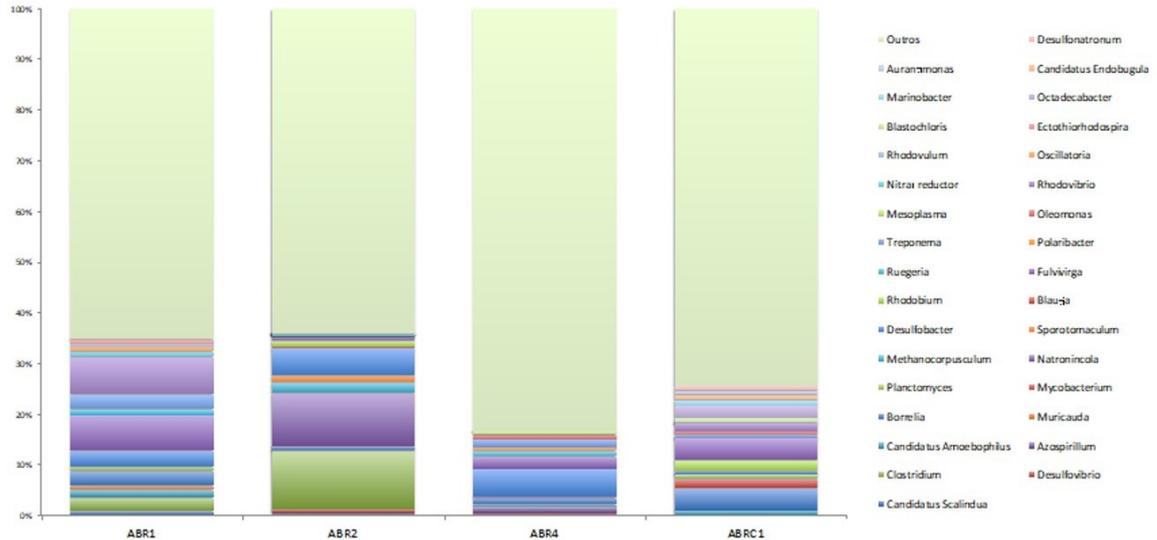
Fonte: Autoria própria.

Figura 80: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Millepora alcicornis*. São mostradas as abundâncias relativas das ordens mais frequentemente encontradas bem como as menos abundantes identificadas como "Outros".



Fonte: Autoria própria.

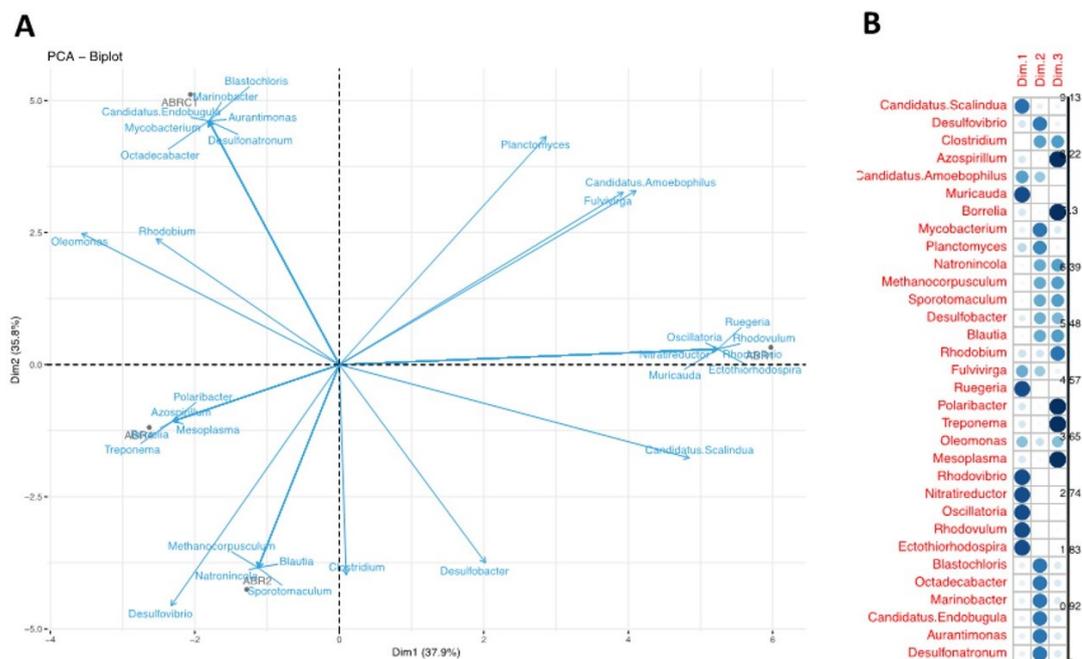
Figura 81: Classificação taxonômica da microbiota associada às amostras de coral da espécie *Millepora alcicornis*. São mostradas as abundâncias relativas dos gêneros mais frequentemente encontrados bem como os menos abundantes identificados como “Outros”.



Fonte: Autoria própria.

Ao analisar o agrupamento e contribuição dos gêneros bacterianos encontrados nas amostras de *M. alcicornis* pode-se constatar uma grande diferenciação dentre as quatro estações analisadas. Apesar disto, é possível observar um maior distanciamento do perfil nas amostras ABRC1 e ABR1, enquanto que as amostras ABR4 e ABR2 foram agrupadas no mesmo quadrante, porém também diretamente influenciadas por gêneros específicos (Figura 82), perfil semelhante ao observado em *M. harttii*.

Figura 82: (A) Análise de PCA das amostras de coral da espécie *Millepora alcicornis*. As linhas azuis indicam os gêneros bacterianos e suas respectivas influências na diferenciação dos perfis encontrados; (B) Contribuição dos gêneros bacterianos em cada dimensão gerada pela análise.



Fonte: Autoria própria.

A análise da abundância relativa da microbiota associada, principalmente ao coral *Mussismilla harttii*, revelou um maior número de grupos taxonômicos em corais dos recifes não controle (ABR1, ABR2 e ABR4), quando comparados com o recife controle. Isto revela uma redução da habilidade do coral hospedeiro em controlar a sua microbiota, e que estes recifes estão possivelmente sob estresse ambiental (McDevitt-Irwin, 2017). A análise da microbiota também revelou uma grande presença nos corais dos recifes não controle, principalmente em ABR 1 e ABR2, de grupos bacterianos que são possíveis patógenos de coral, assim como indicadores de estresses ambientais. Ainda, a análise de PCA da comunidade bacteriana, revelou uma maior diferença na comunidade do recife controle, quando comparado com os demais, demonstrando uma maior semelhança entre ABR1 e ABR2, principalmente no coral *M. harttii*, mantendo os padrões das demais análises.

Estes resultados sugerem que a microbiota dos corais dos recifes não controle, principalmente ABR1 e ABR2, está impactada. O impacto na microbiota do coral está diretamente relacionado a sua saúde, e indica que os corais destes recifes estão possivelmente mais sensíveis a alterações ambientais. Estresses ambientais, como por exemplo elevação de temperatura, relativamente comum em ambientes recifais, podem levar a morte de corais com uma microbiota alterada (em disbiose), o que não ocorreria com corais com uma microbiota saudável.

Por fim, somente nestes mesmos recifes (ABR1 e ABR2) e nas duas espécies de corais, foram encontrados o gênero *Candidatus Scalindua*. Este gênero foi o único relatado no sedimento de todas as estações de coleta do Rio Doce e com abundância relativamente alta na água do rio, e é um gênero conhecido por indicar a presença de metal pesado e o aumento da descarga em rios. Por isso, está sendo sugerido no presente trabalho como um possível bioindicador do rompimento da barragem de Fundão em Mariana. A presença deste gênero, justamente nos recifes com a microbiota mais alterada, sugere que o estresse dos corais está possivelmente relacionado ao rompimento da barragem.

#### 4.3 CONCLUSÃO

Os resultados relacionados à microbiologia até o presente momento sugerem:

Possíveis indicadores microbianos do rompimento da barragem de Fundão em Mariana, com destaque para o gênero *Candidatus Scalindua*, que indica a presença de metais pesados e alta descarga em rios.

Impacto na microbiota da água e sedimento do Rio Doce.

Presença do bioindicador (*Candidatus Scalindua*) no sedimento de todas as estações de coleta do Rio Doce.

Menor impacto na microbiota da água na estação BRG, pela ausência dos possíveis bioindicadores.

Ressurgimento do Filo Cyanobacteria (gênero *Prochlorococcus*) em grande abundância, que não foi encontrado na água do Rio Doce no mês e 6 meses após o rompimento da barragem.

Possível perda de nitrogênio fixado no rio pelo processo de ANAMMOX.

Microbiota mais distinta nas estações mais distantes a foz do Rio Doce, tanto na água como no sedimento.

Impacto na composição da microbiota associada aos corais do Parque Nacional Marinho de Abrolhos, principalmente nas estações ABR1 e ABR2, revelando um possível dano a saúde dos corais.

A presença de um maior número de grupos microbianos associados aos corais do Parque Nacional Marinho de Abrolhos, revelando um possível estresse ambiental nestes recifes.

Presença de possíveis patógenos e praticamente todos os grupos microbianos sugeridos na literatura como indicadores de estresse em corais, nas amostras de corais do Parque Nacional Marinho de Abrolhos, principalmente nas estações ABR1 e ABR2.

Possível influência do rompimento da barragem de Fundão nos corais do Parque Nacional Marinho de Abrolhos (estações ABR1 e ABR2), devido a presença do bioindicador (gênero *Candidatus Scalindua*).

#### 4.4 REFERÊNCIAS

Awata, T., Nishimoto, K., Kindaichi, T., Ozaki, N., Ohashi, A. (2014). Metabolic Activity Of Marine Anammox Bacteria Using Heavy Metals And Sulfate. *Journal of Environmental Engineering Research*, 51(7), 251-256.

Cordeiro, M.C, Garcia, G.D., Rocha, A.M., Tschoeke, D.A., Campeão, M.E. et al. (2018). Insights on the freshwater microbiomes metabolic changes associated with the world's largest mining disaster. *Science of the Total Environment*, 1, 1.

Dang, H., Zhou, H., Zhang, Z., Yu, Z., Hua, E., Liu, X., & Jiao, N. (2013). Molecular Detection of *Candidatus Scalindua pacifica* and environmental responses of sediment anammox bacterial community in the Bohai Sea, China. *PlosOne*, 8 (4) ,1-16.

Kohler, J.M., Kalensee, F., Günther, P.M., & Cao, J. (2018). Searching for rare type associations in bacterial communities from ancient copper mining areas in the East Harz Region (Germany). *Aspects in Mining & Mineral C Science*, 2,1-14.

## **5 SUBPROJETO: MONITORAMENTO DA TOXICIDADE DE AMOSTRAS DE ÁGUA E SEDIMENTO**

### **5.1 OBJETIVO**

Investigar os efeitos causados pela exposição crônica e aguda à água e sedimentos amostrados de regiões dulcícolas do Rio Doce, bem como região costeira adjacente, através de ensaios de toxicidade em laboratório utilizando organismos de diferentes níveis tróficos como bioindicadores.

### **5.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Esta seção apresenta os resultados de ensaios de toxicidade referentes à 1a Campanha do Anexo I – Ecotoxicologia. Foram executados ensaios com amostras de água e sedimento coletados de 2 pontos dulcícolas, sendo 1 no Baixo Rio Guandú (Ponto 17 - BRG) e 1 no estuário do Rio Doce (Ponto 26 – RDF), e 4 pontos na região costeira adjacente ao Rio Doce, sendo 2 na sua foz (FRD1 e FRD6) e 2 pontos no Refúgio de Vida Silvestre de Santa Cruz (Revis Santa Cruz), localizado junto à Área de Proteção Ambiental Costa das Algas (CA1 e CA2). A localização dos pontos pode ser vista no mapa que está ao fim desta seção (Figura 87). Os ensaios foram realizados com organismos de diferentes níveis tróficos em cumprimento as condições dispostas no Plano de Trabalho do Anexo I e Termo de Referência 4 (TR4) que rege o Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I. O Quadro 14 apresenta um resumo dos ensaios de toxicidade realizados com as diferentes matrizes coletadas nos diferentes pontos amostrais. Vale ressaltar que a coleta e armazenamento das amostras seguiram a norma ABNT NBR 15469 (2016). As mesmas concentrações de exposição foram testadas com amostras de água e elutriato do sedimento, sendo elas: 3,1, 6,2, 12,5, 25, 50 e 100 % da amostra. Todos os ensaios contaram com um grupo controle e foram mantidos sob as mesmas condições abióticas. Para o sedimento, além do elutriato, analisou-se a toxicidade do sedimento bruto para organismo bentônicos, e estes ensaios contaram com apenas 2 grupos experimentais: controle e sedimento bruto. Logo abaixo do Quadro 14, a Figura 83 traz uma série de imagens referentes aos organismos-teste, cultivos e ensaios realizados no âmbito do Anexo I.

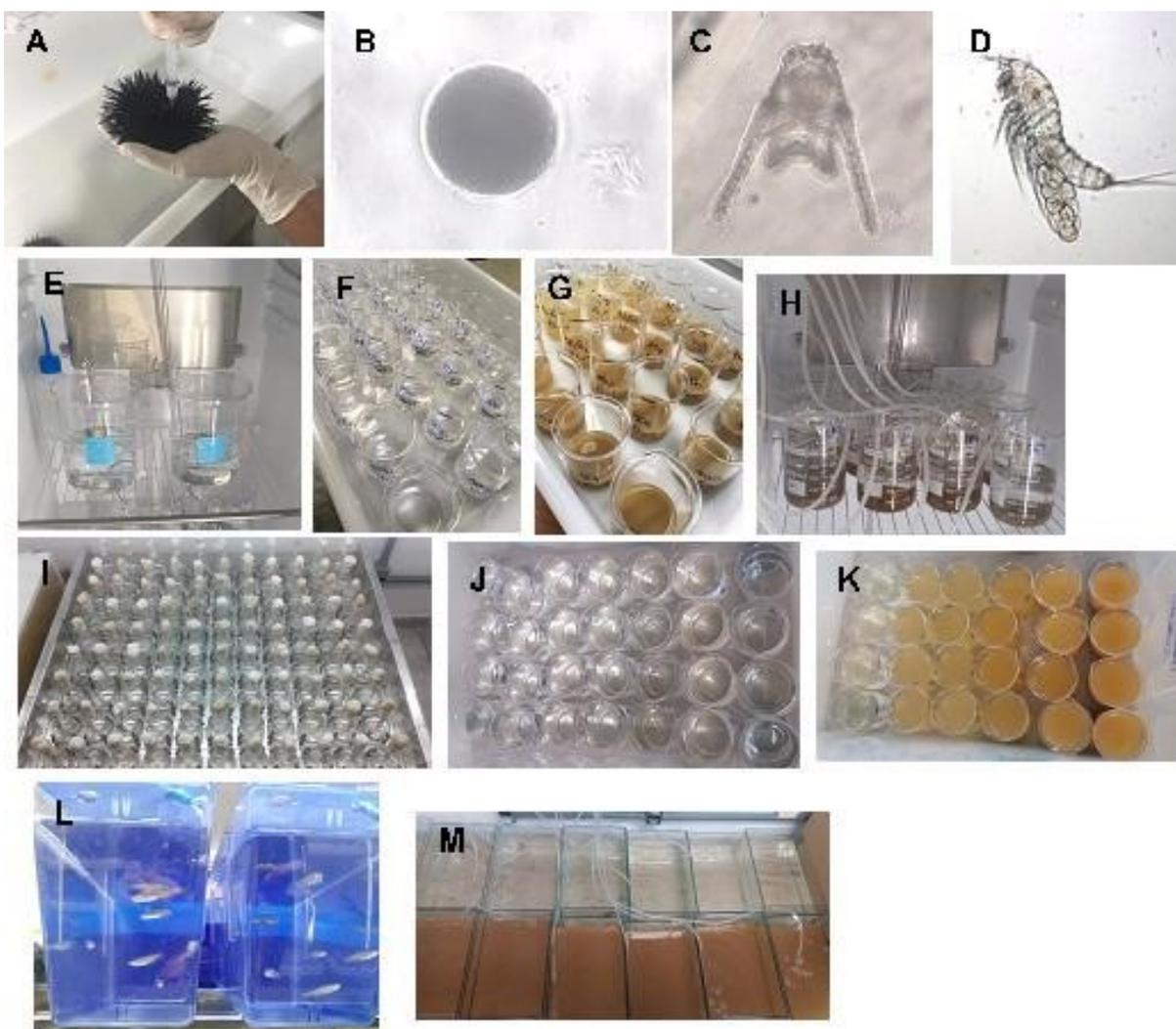
Quadro 14: Resumo dos organismos e respectivos ensaios de toxicidade aplicados em amostras coletadas no Rio Doce, sua foz e região costeira adjacente.

Amostra	Água superficial	Sedimento bruto ou elutriado de sedimento
Rio Doce P17 (BRG) e P26 (RDF)	ABNT NBR 12648: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com algas (Chlorophyceae). O método se baseia no crescimento da cultura algal	ABNT NBR 12648: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com algas (Chlorophyceae). O método se baseia no crescimento da cultura algal
	ABNT NBR 12713: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — Método de ensaio com <i>Daphnia</i> spp (Crustacea, Cladocera)	ABNT NBR 12713: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — Método de ensaio com <i>Daphnia</i> spp (Crustacea, Cladocera)
Rio Doce P17 (BRG) e P26 (RDF)	OECD 211: OECD Guideline for the testing of chemicals – <i>Daphnia magna</i> Reproduction Test	OECD 211: OECD Guideline for the testing of chemicals - <i>Daphnia magna</i> Reproduction Test
	OECD 236: OECD Guideline for the testing of chemicals - Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test	OECD 236: OECD Guideline for the testing of chemicals - Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test
	ABNT NBR 15499: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica de curta duração — Método de ensaio com peixes (larvas)	ABNT NBR 15499: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica de curta duração — Método de ensaio com peixes (larvas)
	ABNT NBR 15088: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — Método de ensaio com peixes (Cyprinidae) (adultos)	ABNT NBR 15088: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — Método de ensaio com peixes (Cyprinidae) (adultos)
Região costeira FRD1 e FRD6 CA1 e CA2	ABNT NBR 16181: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com microalgas marinhas	ABNT NBR 16181: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica — Método de ensaio com microalgas marinhas
	Ensaio de toxicidade aguda com o ouriço do mar <i>Echinometra lucunter</i> (fertilização): Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil	Ensaio de toxicidade aguda com o ouriço do mar <i>Echinometra lucunter</i> (fertilização): Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil
	ABNT NBR 15350: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica de curta duração — Método de ensaio com ouriço-do-mar (Echinodermata: Echinoidea)	ABNT NBR 15350: Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica de curta duração — Método de ensaio com ouriço-do-mar (Echinodermata: Echinoidea)
	OECD 203: OECD Guideline for the testing of chemicals Fish, Acute Toxicity Test	OECD 203: OECD Guideline for the testing of chemicals Fish, Acute Toxicity Test
		Ensaio de toxicidade aguda com <i>Nitokra</i> sp (reprodução): Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil

Fonte: Autoria própria.

Legenda P17 (BRG): Ponto 17 - Baixo Rio Guandú (afluente do Rio Doce); P26 (RDF): Ponto 26 - Rio Doce Foz (região de estuário); FRD 1 – Foz do Rio Doce (região costeira adjacente) localização 1; FRD 6 - Foz do Rio Doce (região costeira adjacente) localização 6; CA 1 – APA Costa das Algas (região costeira adjacente - sul) localização 1; CA 2 - APA Costa das Algas (região costeira adjacente - sul) localização 2.

Figura 83: A Imagem A apresenta o procedimento de desova dos ouriços realizado na Base Oceanográfica da UFES em Coqueiral/ES. As imagens B e C apresentam, respectivamente, ovo fecundado e larva desenvolvida do ouriço do mar *Echinometra lucunter*, observados nos ensaios de toxicidade com água e elutriado marinhos. A imagem D representa fêmea ovada de *Nitokra* sp submetida ao ensaio ecotoxicológico com sedimento bruto marinho. As imagens E, F e G representam o cultivo de *Daphnia magna* e ensaios com amostras de água e elutriado dulcícolas, respectivamente. A Imagem H mostra um ensaio com sedimento bruto de água doce e *Hyalella* ssp. A imagem I mostra ensaios de toxicidade com algas. As imagens J e K mostram os ensaios de toxicidade com larvas de *Danio rerio* expostas à amostras de água superficial e elutriado de sedimento de água doce, respectivamente. As imagens L e M mostram peixes adultos (*D. rerio*) em sistema de cultivo e ensaio com água e elutriado de sedimento de água doce com os animais.



Fonte: Autoria própria.

O Quadro 15 e Quadro 16 mostram os diferentes resultados obtidos nos ensaios. Enquanto que as Figura 84, Figura 85 e Figura 86 mostram graficamente os resultados dos ensaios crônicos com *Daphnia* e agudos e crônicos com ouriço do mar, respectivamente.

Quadro 15: Planilha geral com valores estimados de toxicidade para os ensaios realizados com amostras do Rio Doce, com base na concentração da amostra (%), e referentes à 1a Campanha do Anexo I.

Ensaio de toxicidade - água doce				
Ensaio	P17 – água	P17- sedimento	P26 – água	P26 - sedimento
<i>Raphidocelis subcapitata</i>	Cl <sub>50</sub> : NE			
<i>Daphnia magna</i> agudo	CL <sub>50</sub> : NE	CL <sub>50</sub> : NE	CL <sub>50</sub> - NE	CL <sub>50</sub> : 100%
<i>Daphnia magna</i> crônico	CL <sub>50</sub> : NE	CL <sub>50</sub> : NE	CL <sub>50</sub> : NE	CL <sub>50</sub> : 32,01%
	CENO: NE	CENO: NE	CENO: 25%	CENO: NE
	CEO: NE	CEO: NE	CEO: 50 %	CEO: 3,1%
	VC: NE	VC: NE	VC: 35,36%	VC: NE
	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : 48,54%
<i>Danio rerio</i> embrião	CL <sub>50</sub> COAG: NE			
	CE <sub>50</sub> AMFS: NE			
	CE <sub>50</sub> NDC: NE			
	CL <sub>50</sub> ABC: NE			
<i>Danio rerio</i> larva	VCEST: NE	VCEST: 44,97%	VCEST: NE	VCEST: 35,25%
<i>Danio rerio</i> adulto	FT: 1 (100%)	FT: NE	FT: NE	FT: 2 (50%)
<i>Hyalella azteca</i>	NA	NT (p = 0.751)	NA	(*) T (p = 0.088)

Fonte: Autoria própria.

COAG: coagulação de ovos; AMFS: ausência ou má formação de somitos; NDC: não descolamento da cauda; ABC: ausência de batimentos cardíacos; NE: não estimável; NT: não tóxico; T: tóxico; CL50: concentração mediana que causa mortalidade em 50% dos indivíduos; CE50: concentração mediana que causa efeito em 50% dos indivíduos; Cl50: concentração mediana que causa 50% de inibição no crescimento, reprodução, etc.; CENO: concentração de efeito não observado; CEO: concentração de efeito observado; VCEST: valor crônico estimado (CL15 \* 0,3); CL15: concentração mediana que causa mortalidade em 15% dos indivíduos; VC = valor crônico (média de CENO e CEO); FT= Fator de diluição (correspondente à maior concentração na qual não se observa letalidade superior a 10%); (\*): diferença estatística em relação ao controle para os ensaios com sedimento bruto.

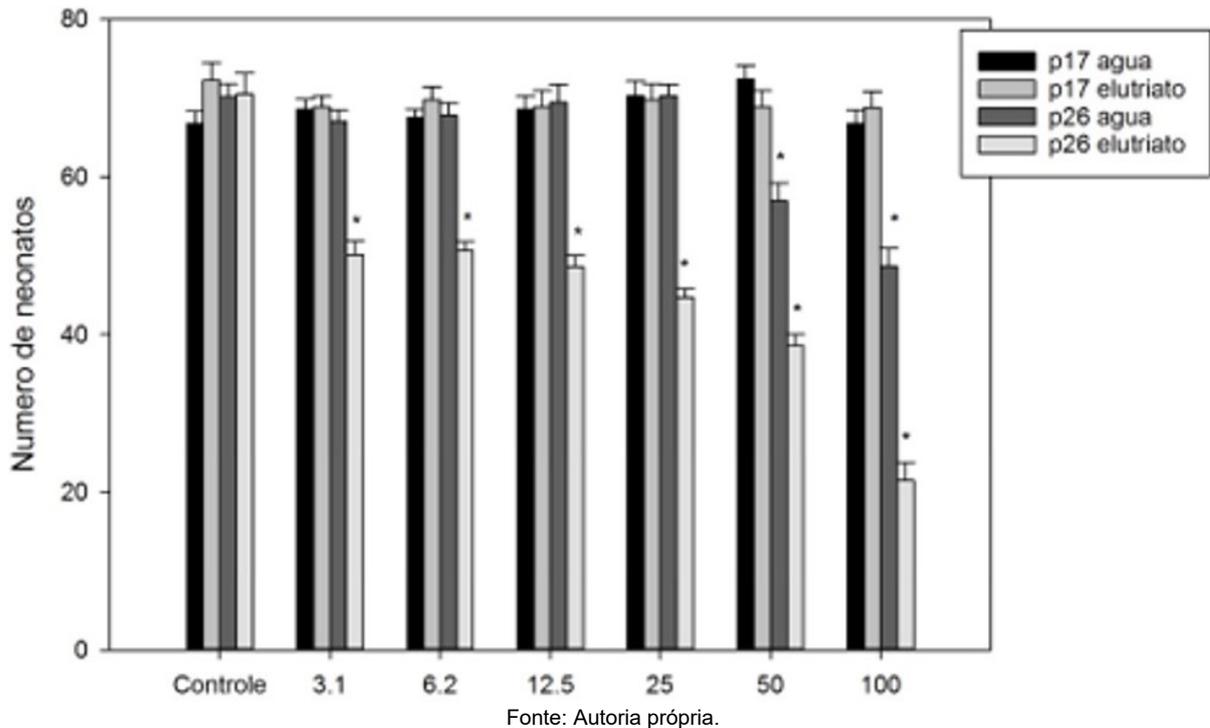
Quadro 16: Planilha geral com valores estimados de toxicidade para os ensaios realizados com amostras da Foz do Rio Doce e região da Costas das Algas, e referentes à 1a Campanha do Anexo I.

Ensaio de toxicidade - Mar								
Ensaio	FRD1 água	FRD1 sedimento	FRD6 água	FRD6 sedimento	CA1 água	CA1 sedimento	CA2 água	CA2 sedimento
<i>Thalassiosira sp</i>	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE	Cl <sub>50</sub> : NE
<i>E. lucunter</i> agudo - fertilização	CENO: 25% CEO: 50% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: 3,1% CEO: 6,2% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: NE CEO: 3,1% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: NE CEO: 3,1% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: 12,5% CEO: 25% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: 50% CEO: 100% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: 50% CEO: 100% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: 50% CEO: 100% CE <sub>50</sub> : NE
<i>E. lucunter</i> crônico - embriolarval	CENO: 3,1% CEO: 6,2% VC: 4,38% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: 6,2% CEO: 12,5% VC: 8,80% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: NE CEO: 3,1% VC: NE CE <sub>50</sub> : NE	CENO: 3,1% CEO: 6,2% VC: 4,38% CE <sub>50</sub> : NE	CENO: NE CEO: 3,1% VC: NE CE <sub>50</sub> : NE	CENO: NE CEO: 3,1% VC: NE CE <sub>50</sub> : 55,7%	CENO: NE CEO: 3,1% CEO: NE CE <sub>50</sub> : NE	CENO: NE CEO: 3,1% VC: 86,97% CE <sub>50</sub> : NE
<i>Poecilia vivipara</i>	CENO: NE CEO: NE FT: NE	CENO: NE CEO: NE FT: NE	CENO: NE CEO: NE FT: NE	CENO: NE CEO: NE FT: NE	CENO: NE CEO: NE FT: 4 (25%)	CENO: NE CEO: NE FT: 4 (25%)	CENO: NE CEO: NE FT: NE	CENO: NE CEO: NE FT: NE
<i>Nitokra sp</i>	NA	(*) T (p < 0,05)	NA	(*) T (p < 0,05)	NA	(*) T (p < 0,05)	NA	(*) T (p < 0,05)

Fonte: Autoria própria.

COAG: coagulação de ovos; AMFS: ausência ou má formação de somitos; NDC: não descolamento da cauda; ABC: ausência de batimentos cardíacos; NE: não estimável; NT: não tóxico; T: tóxico; CL50: concentração mediana que causa mortalidade em 50% dos indivíduos; CE50: concentração mediana que causa efeito em 50% dos indivíduos; Cl50: concentração mediana que causa 50% de inibição no crescimento, reprodução, etc.; CENO: concentração de efeito não observado; CEO: concentração de efeito observado; VCEST: valor crônico estimado (CL15 \* 0,3); CL15: concentração mediana que causa mortalidade em 15% dos indivíduos; VC = valor crônico (média de CENO e CEO); FT= Fator de diluição (correspondente à maior concentração na qual não se observa letalidade superior a 10%); (\*): diferença estatística em relação ao controle para os ensaios com sedimento bruto.

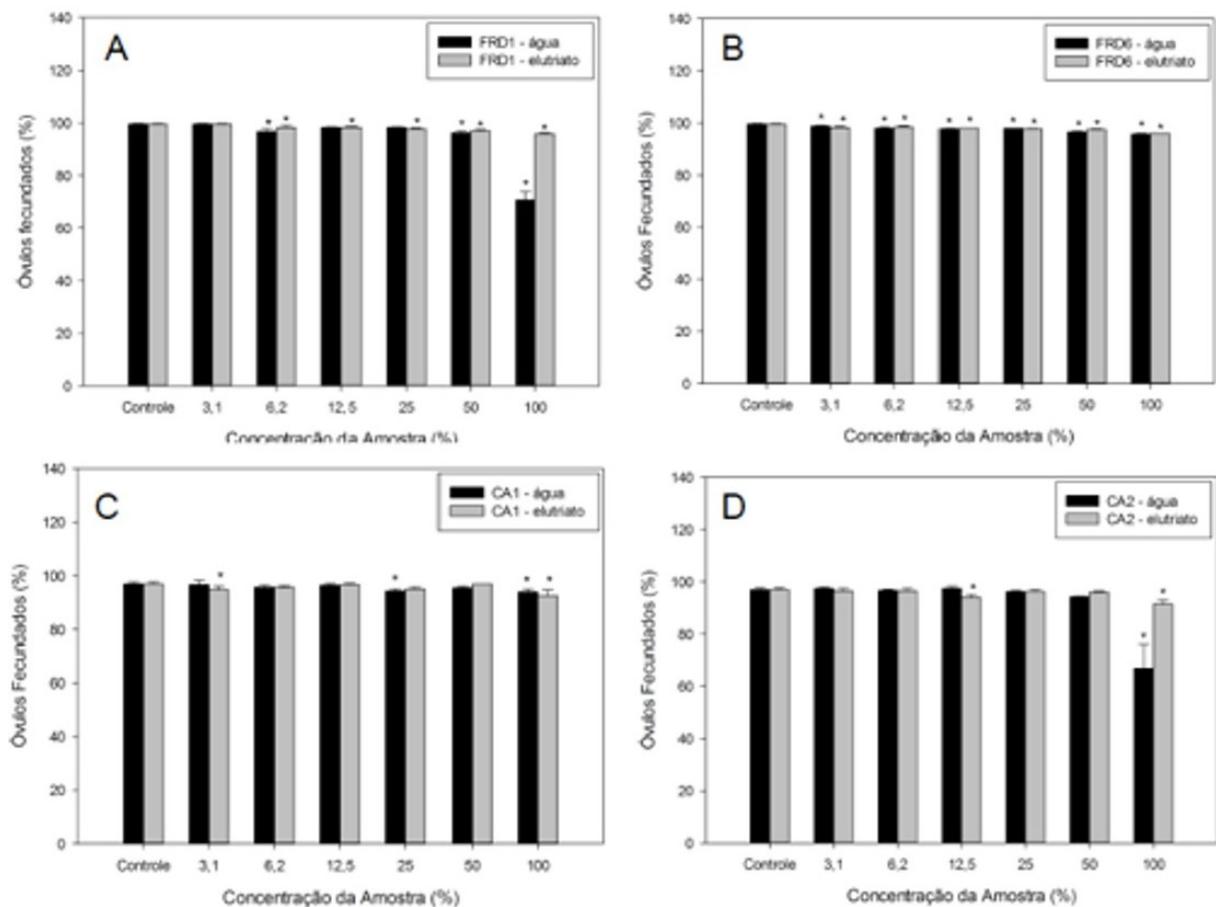
Figura 84: Ensaio de toxicidade crônica (21 dias) com *Daphnia magna* (OECD 211) e amostras de água e elutriado dos pontos P17 e P26. A toxicidade é medida pela diferença significativa entre o número de neonatos nascidos de animais controles e expostos a diferentes concentrações das amostras ambientais (água e elutriado de sedimento). (\*) Indicam diferenças estatisticamente significantes em relação ao respectivo controle. O método estatístico usado foi ANOVA de uma via com teste a posteriori de Dunett's ( $p < 0,05$ ).



Para classificar os ambientes quanto a sua toxicidade tentou-se selecionar apenas um parâmetro, no sentido de padronizar a resposta entre os ensaios. Este parâmetro foi a CEO que corresponde à menor concentração de efeito observado. A CEO foi estimada para todos os ensaios que expressam toxicidade, exceto para o ensaio com larvas de *Danio rerio*, cujo valor de toxicidade considerado foi a  $VCEST = CL15 * 0,3$  (ver legenda do Quadro 16). Além da CEO, levou-se em conta o grau de severidade da resposta observada (Quadro 17) e a sensibilidade do ensaio (Quadro 18). Os valores médios de toxicidade para cada ponto, considerando-se os índices, foram confrontados com os valores apresentados na Quadro 19, que classifica uma amostra deste não tóxica até altamente tóxica. O Quadro 20 apresenta os resultados de toxicidade, os cálculos aplicados para classificar os pontos amostrais e o grau de toxicidade dos pontos. É importante ressaltar que para esta classificação desconsideramos os ensaios com microalgas e com embriões de *D. rerio*, pois os resultados ficaram inconsistentes, ou por não haver relação dose-resposta e/ou por não serem biologicamente relevantes. No caso das microalgas, o aumento na concentração da amostra estimulou o crescimento do inóculo (efeito positivo e não indicativo de toxicidade). Dados pretérios mostraram que ensaios com outra espécie de microalgas, *Chlorella vulgaris* submetidas à diferentes concentrações de amostras de água (0, 10, 20, 50 100%) coletadas em 2015 em dois pontos da bacia do Rio Doce: Córrego Água Fria (referência) e Barra Longa (Rio do Carmo), também não resultaram em efeito inibitório sobre o crescimento da cultura algal (Barbosa et al., 2015), corroborando com nossos resultados. A falta de

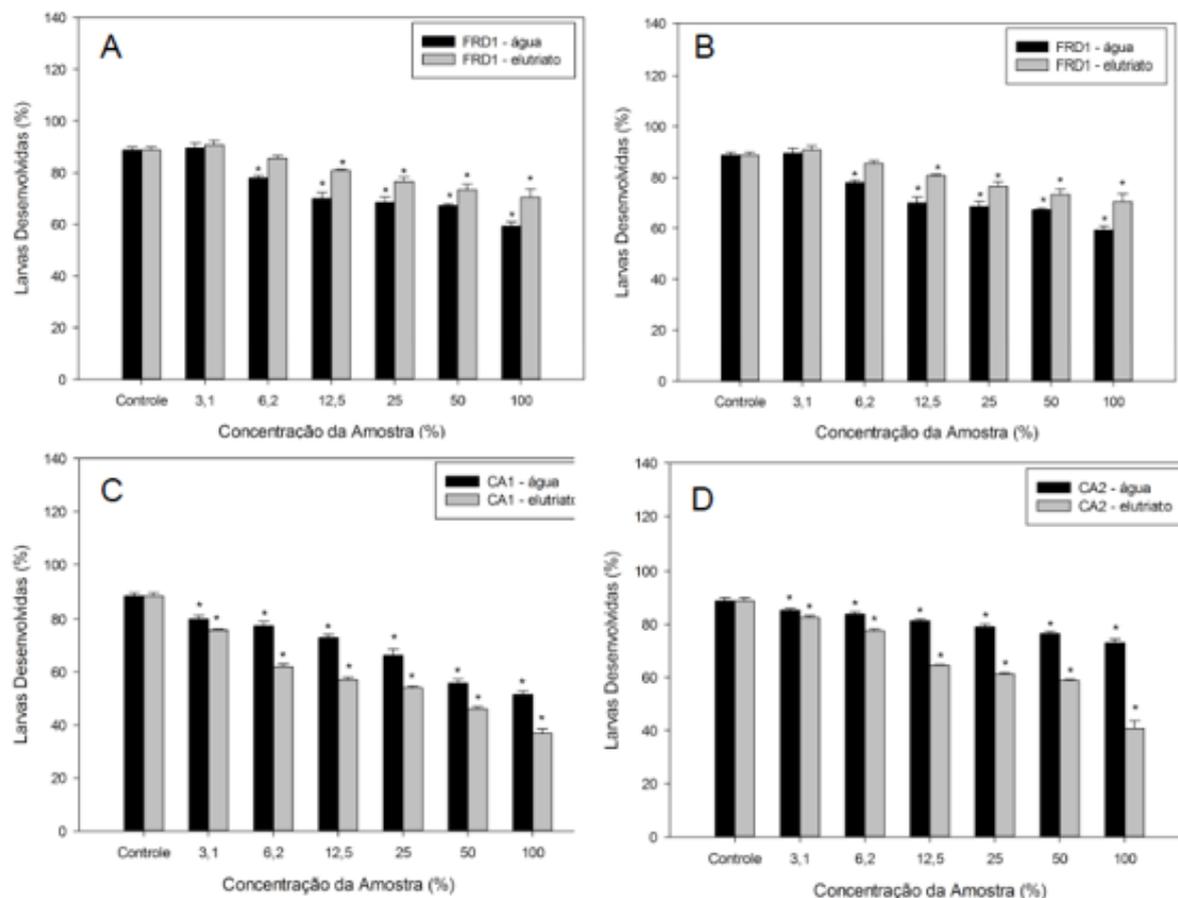
efeito negativo no crescimento de microalgas pode estar relacionada ao aporte de nutrientes oriundos das amostras ambientais que se sobrepõem aos efeitos da pluma de rejeitos. Por outro lado, o mesmo artigo mostrou que cianobactérias da espécie *Microcystis novacekii*, tiveram seu crescimento reduzido quando expostas aos mesmos tratamentos que *C. vulgaris*, sugerindo uma maior sensibilidade das cianobactérias para indicar a condição tóxica da bacia do Rio Doce (Barbosa et al., 2015).

Figura 85: Ensaio de toxicidade aguda (12 horas) com gametas do ouriço do mar *Echinometra lucunter* com amostras de água e elutriato coletadas nos pontos FRD1 (A), FRD2 (B), CA1 (C) e CA2 (D). A toxicidade é medida pela diferença significativa entre o percentual de ovos fecundados no grupo controle e expostos a diferentes concentrações das amostras ambientais (água e elutriato de sedimento). (\*) Indicam diferenças estatisticamente significantes em relação ao controle. O método estatístico usado foi ANOVA de uma via com teste a posteriori de Dunett's ( $p < 0,05$ ).



Fonte: Autoria própria.

Figura 86: Ensaio de toxicidade crônica (48 horas) com óvulos fecundados do ouriço do mar *Echinometra lucunter* (ABNT NBR 15350) expostos às amostras de água e elutriato coletadas nos pontos FRD1 (A), FRD2 (B), CA1 (C) e CA2 (D). A toxicidade é medida pela diferença significativa entre o percentual de larvas desenvolvidas (pluteus) no grupo controle e expostos a diferentes concentrações das amostras ambientais (água e elutriato de sedimento). (\*) Indicam diferenças estatisticamente significantes em relação ao controle. O método estatístico usado foi ANOVA de uma via com teste a posteriori de Dunnett's ( $p < 0,05$ ).



Fonte: Autoria própria.

Quadro 17: Índice de toxicidade de acordo com a resposta (biomarcador) analisada nos ensaios aplicados com amostras da 1ª Campanha do Anexo I. O parâmetro mais tóxico é classificado com maior valor que os menos tóxicos.

Resposta observada	Índice de severidade
Letal	2
Subletal (desenvolvimento, crescimento, fecundação e reprodução)	1

Fonte: Autoria própria.

Quadro 18: Índice de sensibilidade dos organismos usados nos ensaios de toxicidade aplicados com amostras da 1ª Campanha do Anexo I. O maior valor foi atribuído ao nível trófico mais sensível, e o menor valor ao mais tolerante.

Organismo-teste	Índice de sensibilidade
Plâncton (microalgas, microcrustáceos, embriões e larvas de peixes)	3
Peixes juvenis	2
Peixes adultos	1

Fonte: Autoria própria.

Quadro 19: Classificação da amostra com relação à sua toxicidade. Adaptado de Bulich (1992).

Valor de toxicidade	Classificação das amostras
> 100	Altamente tóxica (AT)
> 50 - 100	Tóxica (T)
> 25-50	Moderadamente tóxica (MT)
> 1 – 25	Levemente tóxica (LT)
1 ou NE	Não tóxica (NT)

Fonte: Autoria própria.

Considerando-se os ensaios aplicados nos pontos de água doce, o mais sensível foi o ensaio crônico conduzido com o cladóceros *Daphnia magna*, onde o *endpoint* observado foi o número de neonatos. Dados pretéritos de análises ecotoxicológicas mostraram um efeito crônico de água e sedimento coletados na Bacia do Rio Doce em 2015 (Barra Longa e Rio Casca) para a espécie de microcrustáceo *Ceriodaphnia silvestrii* (Barbosa et al., 2015). Ainda, dados do relatório técnico da Golder Associates (2016) validados pela RRD (Relatório Técnico - Avaliação e consolidação de dados pretéritos, 2018), revelaram que amostras do Rio Doce, também coletadas após o rompimento da barragem (2015 a 2017), foram tóxicas para *Ceriodaphnia dubia* em ensaio crônico, corroborando resultados apresentados aqui de toxicidade crônica para microcrustáceos. Em contrapartida, não foi observada toxicidade aguda de águas amostradas na Bacia do Rio Doce em novembro de 2015 para *Daphnia ambigua*, com base na taxa de eclosão de ovos e *Daphnia similis*, com base na sobrevivência (Barbosa et al., 2015). Da mesma forma, as amostras de água coletadas no P16 e P26 em setembro de 2018 não foram provocaram toxicidade aguda para *Daphnia magna* com base na sobrevivência (resultados deste relatório). De maneira geral, os resultados apresentados nesta seção claramente indicam que na região estuarina, (P26) do Rio Doce a toxicidade está mais acentuada e que no afluente Baixo Rio Guandú (P17) que se apresentou não-tóxico e, portanto, pode ser sugerido como um local referência para os ensaios de toxicidade. Ainda, a toxicidade do P26 foi maior no sedimento, tanto para *Daphnia* em ensaios com elutriado de sedimento (Figura 84 e Quadro 20), quanto para *Hyalella* sp em ensaio com sedimento bruto (Quadro 15 e Quadro 20).

Com relação aos ensaios com organismos marinhos, o ouriço do mar (Figura 85 e Figura 86) e a *Nitokra* se mostraram mais sensíveis que os peixes. Os pontos FRD1, CA1 e CA2 foram classificados como moderadamente tóxicos, enquanto que o FRD6 como tóxico, embora os valores médios de toxicidade para os pontos CA1 e CA2 no Revis Santa Cruz ficaram na margem do moderadamente tóxico para o tóxico, principalmente o CA2, indicando que a área está impactada (Figura 87). Estes ensaios também

mostraram maior toxicidade associada ao sedimento (Quadro 17 e Quadro 20) do que à água superficial. Por ser, geralmente, rico em matéria orgânica, o sedimento acaba concentrando mais metal do que a água, o que aumenta seu potencial tóxico. A maior toxicidade do sedimento, no caso do elutriado para daphnídeos, larvas de *D. rerio* e ouriços, pode também estar sendo potencializada pela presença de partículas em suspensão, as quais podem se associar as brânquias, impedindo que os animais realizem funções vitais como respiração, regulação osmótica. Com relação aos organismos bentônicos (*Hyalella* sp e *Nitokra* sp), estes também foram sensíveis e responderam de forma clara sobre a qualidade do sedimento. Por outro lado, os peixes, juvenis e adultos, se mostraram mais tolerantes como já era esperado, possivelmente por serem organismos maiores e mais desenvolvidos, no que compete ao sistema de detoxificação, inclusive. Os resultados com peixes estão de acordo com dados pretéritos obtidos em ensaios de 96 h conduzidos com adultos de *D. rerio* (Golder Associates, 2016). Os resultados de toxicidade apresentados nessa seção evidenciam uma degradação das condições ambientais e, particularmente, da qualidade do sedimento da região estuarina do Rio Doce, sua foz e Revis Santa Cruz / APA Costa das Algas.

Quadro 20: Resultado e classificação das amostras de água e sedimento coletadas em diferentes pontos do Rio Doce, sua Foz e APA Costa das Algas e submetidas à ensaios de toxicidade com organismos de diferentes níveis tróficos. Os testes foram realizados com espécies padronizadas e /ou nativas da região.

Ponto	Amostra	Ensaio	FT (CEO)	Parâmetro	Senibilidade / Nível trófico	Valor de toxicidade por ensaio	Classificação por ensaio	Valor médio de toxicidade por matriz	Classificação por matriz	Valor médio de toxicidade por ponto	Classificação por ponto
17 - BRG	Água	<i>Daphnia magna</i> agudo (ABNT NBR 12713)	0	2	3	0	NT	0	NT		
17 - BRG		<i>Daphnia magna</i> crônico (OECD 211)	0	1	3	0	NT				
17 - BRG		<i>Danio rerio</i> crônico - larvas (ABNT NBR 15499)	0	2	3	0	NT				
17 - BRG		<i>Danio rerio</i> agudo (ABNT NBR 15088)	0	2	1	0	NT				
17 - BRG	Sedimento	<i>Daphnia magna</i> agudo (ABNT NBR 12713)	0	2	3	0	NT	3	LT	1	NT
17 - BRG		<i>Daphnia magna</i> crônico (OECD 211)	0	1	3	0	NT				
17 - BRG		<i>Danio rerio</i> crônico - larvas (ABNT NBR 15499)	2,2	2	3	13,2	LT				
17 - BRG		<i>Danio rerio</i> agudo (ABNT NBR 15088)	0	2	1	0	NT				
17 - BRG		<i>Hyalella</i> ssp (ABNT NBR 15470)				0	NT				
26 - RDF	Água	<i>Daphnia magna</i> agudo (ABNT NBR 12713)	0	2	3	0	NT	2	LT	26	MT
26 - RDF		<i>Daphnia magna</i> crônico (OECD 211)	2	1	3	6	LT				
26 - RDF		<i>Danio rerio</i> crônico - larvas (ABNT NBR 15499)	0	2	3	0	NT				
26 - RDF		<i>Danio rerio</i> agudo (ABNT NBR 15088)	0	2	1	0	NT				

Ponto	Amostra	Ensaio	FT (CEO)	Parâmetro	Senibilidade / Nível trófico	Valor de toxicidade por ensaio	Classificação por ensaio	Valor médio de toxicidade por matriz	Classificação por matriz	Valor médio de toxicidade por ponto	Classificação por ponto
26 - RDF	Sedimento	<i>Daphnia magna</i> agudo (ABNT NBR 12713)	2	2	3	12	LT	46	MT		
26 - RDF		<i>Daphnia magna</i> crônico (OECD 211)	33	1	3	99	T				
26 - RDF		<i>Danio rerio</i> crônico - larvas (ABNT NBR 15499)	2,8	2	3	16,8	T				
26 - RDF		<i>Danio rerio</i> agudo (ABNT NBR 15088)	2	2	1	4	LT				
26 - RDF		<i>Hyalella</i> ssp (ABNT NBR 15470)				100	T				
FRD1	Água	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	2	1	3	6	LT	18	LT		
FRD1		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	16	1	3	48	T				
FRD1		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	0	2	2	0	NT				
FRD1	Sedimento	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	16	1	3	48	MT	43	MT	32	MT
FRD1		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	8	1	3	24	MT				
FRD1		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	0	2	2	0	NT				
FRD1		<i>Nitokra</i> sp (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)				100	T				
FRD6	Água	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	33	1	3	99	T	66	T	51	T

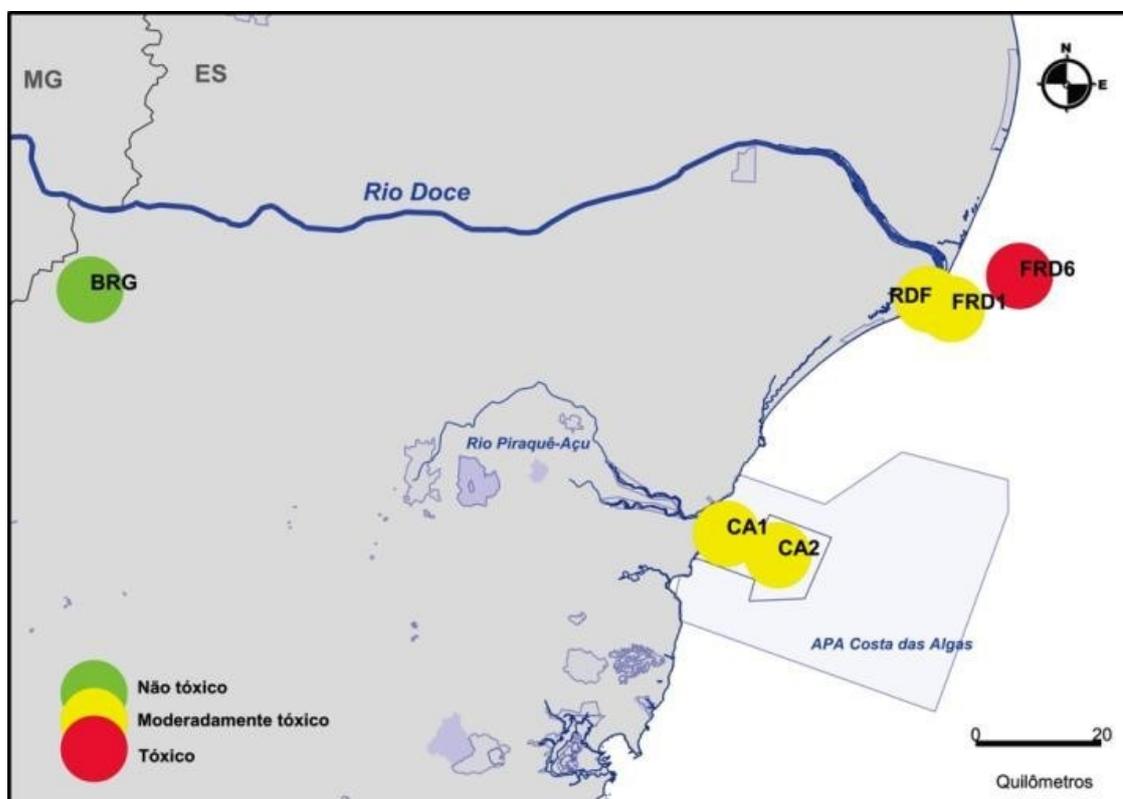
Ponto	Amostra	Ensaio	FT (CEO)	Parâmetro	Senibilidade / Nível trófico	Valor de toxicidade por ensaio	Classificação por ensaio	Valor médio de toxicidade por matriz	Classificação por matriz	Valor médio de toxicidade por ponto	Classificação por ponto
FRD6		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	33	1	3	99	MMT				
FRD6		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	0	2	2	0	NT				
FRD6	Sedimento	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	3,1	1	3	9,3	LT	39	MT		
FRD6		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	16	1	3	48	T				
FRD6		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	0	2	2	0	NT				
FRD6		<i>Nitokra</i> sp (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)				100	T				
CA1	Água	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	4	1	3	12	LT	42	MT		
CA1		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	33	1	3	99	T				
CA1		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	4	2	2	16	LT				
CA1	Sedimento	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	1	1	3	3	LT	55	T	49	MT
CA1		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	33	1	3	99	T				
CA1		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	4	2	2	16	LT				
CA1		<i>Nitokra</i> sp (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)				100	T				

Ponto	Amostra	Ensaio	FT (CEO)	Parâmetro	Senibilidade / Nível trófico	Valor de toxicidade por ensaio	Classificação por ensaio	Valor médio de toxicidade por matriz	Classificação por matriz	Valor médio de toxicidade por ponto	Classificação por ponto
CA2	Água	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	1	1	3	3	LT	34	MT	43	MT
CA2		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	33	1	3	99	T				
CA2		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	0	2	2	0	NT				
CA2	Sedimento	<i>Echinoderma lucunter</i> agudo (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)	1	1	3	3	LT	51	T	43	MT
CA2		<i>Echinoderma lucunter</i> crônico (ABNT NBR 15350)	33	1	3	99	T				
CA2		<i>Poecilia vivipara</i> (OECD 203)	0	2	2	0	NT				
CA2		<i>Nitokra</i> sp (Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil)				100	T				

Fonte: Autoria própria.

Legenda: FT é o fator de diluição da amostra correspondente ao CEO (Concentração de efeito observado), NT: não tóxica, LT: levemente tóxica, MT: moderadamente tóxica, T: tóxica.

Figura 87: Mapa com os pontos amostrais para os ensaios e respectiva classificação quanto a toxicidade considerando amostras de água e sedimento (ver Quadro 20)



Fonte: Autoria própria.

### 5.3 CONCLUSÃO

De acordo com os resultados apresentados e discutidos nessa seção, podemos indicar que a porção estuarina do Rio Doce, sua foz e Revis Santa Cruz / APA Costa das Algas encontram-se impactadas do ponto de vista ecotoxicológico, sendo que o efeito deletério está mais associado ao sedimento onde contaminantes como metais acabam se acumulando devido ao alto teor de matéria orgânica, do que à água superficial. No que compete aos pontos dulcícolas o afluente Rio Baixo Guandú (P17) parece servir como local referência, pois não se mostrou impactado do ponto de vista ecotoxicológico. Por outro lado, o estuário do Rio Doce, encontra-se moderadamente impactado. Dentre os pontos marinhos, a foz do Rio Doce está mais impactada que o Revis Santa Cruz / APA Costa das Algas; enquanto o FRD6 é considerado como tóxico, o FRD1, CA1 e CA2 são considerados como moderadamente tóxicos, mas é importante ressaltar que os valores de toxicidade calculados para os pontos amostrados na APA estão à margem da classificação tóxica. Os bioindicadores mais sensíveis foram reprodução em *Daphnia*, fecundação e desenvolvimento embrio-larval em ouriços e reprodução em *Nitokra* sp. Considerando a conclusão desta seção, é importante que se dê continuidade ao monitoramento ecotoxicológico dos pontos do Rio Doce e região costeira adjacente, uma vez que estes mostram-se impactados, tanto para fazer uma avaliação continuada do impacto como para monitorar a eficiência de possíveis atividade de remediação.

#### 5.4 REFERÊNCIAS

- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2011. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - método de ensaio com algas (Chlorophyceae), ABNT NBR 12648, terceira edição, 07.11.2011.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2012. Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica de curta duração — método de ensaio com ouriço-do-mar (Echinodermata: Echinoidea). ABNT NBR 15350, segunda edição, 12.02.2012.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2013. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade aguda e crônica - método de ensaio com *Hyalella* spp (Amphipoda) em sedimentos. ABNT NBR 15470, segunda edição, 25.11.2013.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2013. Ecotoxicologia aquática - Toxicidade crônica - microalgas marinhas. ABNT NBR 16181, primeira edição, 18.06.2013.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2015. Ecotoxicologia aquática – preservação e preparo de amostras. ABNT NBR 15469, segunda edição, 16.12.2015.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016. Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda — método de ensaio com *Daphnia* spp. (Crustacea, Cladocera). ABNT NBR 12713, quarta edição, 19.05.2016.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016. Ecotoxicologia aquática — Toxicidade crônica de curta duração — método de ensaio com peixes ABNT NBR 15499, terceira edição, 08.04.2016.
- [ABNT] Associação Brasileira de Normas Técnicas. 2016. Ecotoxicologia aquática — Toxicidade aguda - método de ensaio com peixes (Cyprinidae) ABNT NBR 15088, terceira edição, 13.12.2016
- [OECD] Organization for Economic Co-operation and Development. 2012. OECD. *Daphnia magna* Reproduction Test. OECD 211, 02.10.2012.
- [OECD] Organization for Economic Co-operation and Development. 2013. OECD. Fish Embryo Acute Toxicity (FET) Test. OECD 236, 26.07.2013.
- [OECD] Organization for Economic Co-operation and Development. 2014. OECD. Fish Acute Toxicity Test. OECD 203 17.07.92.
- BARBOSA, F., MAIA-BARBOSA, P., NASCIMENTO A. et al. (2015). O desastre de Mariana e suas consequências sociais, econômicas, políticas e ambientais: porque evoluir da abordagem de Gestão dos recursos naturais para Governança dos recursos naturais? In: Arquivos do Museu de História Natural e Jardim Botânico. v. 24, n.1/ 2.

BASTOS, A., TEIXEIRA, E., CASTRO, E. (2018). Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática na Área Ambiental I. Avaliação e Consolidação de dados pretéritos. Sistemas Pelágico, Sedimentos, Comunidade Biótica e Ecotoxicologia. RT-01RRDM/OUT18. Vitória, ES.

GOLDER ASSOCIATES (2016). Memorando técnico. Qualidade da Água, Qualidade do Sedimento e resultados dos Testes de Ecotoxicologia no Rio Doce. Belo Horizonte, MG.

MASTROTI, R. (2002). Testes de toxicidade com gametas de ouriço do mar (fertilização). In: Nascimento, I.A., Sousa, E.C.P.M., Nipper, M.G. Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil, Artes Gráficas e Indústria Ltda, São Paulo, 515-162 p.

LOTUFO, G.R., ABESSA, D.M.S. (2002). Testes de toxicidade com sedimento total e água intersticial estuarinos utilizando copépodes bentônicos. In: Nascimento, I.A., Sousa, E.C.P.M., Nipper, M.G. Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil, Artes Gráficas e Indústria Ltda, São Paulo, 91-97 p.

## 6 SUBPROJETO: MONITORAMENTO DO AMBIENTE PRAIAL

### 6.1 OBJETIVO

Como objetivo geral o presente subprojeto visa o monitoramento ecotoxicológico das praias entre Aracruz e São Mateus, através da avaliação de dados abióticos e bióticos. Este monitoramento foi baseado em: (a) determinações laboratoriais das concentrações de metais no ambiente e na biota; e (b) análise de biomarcadores na biota.

### 6.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 6.2.1 Área de Estudo

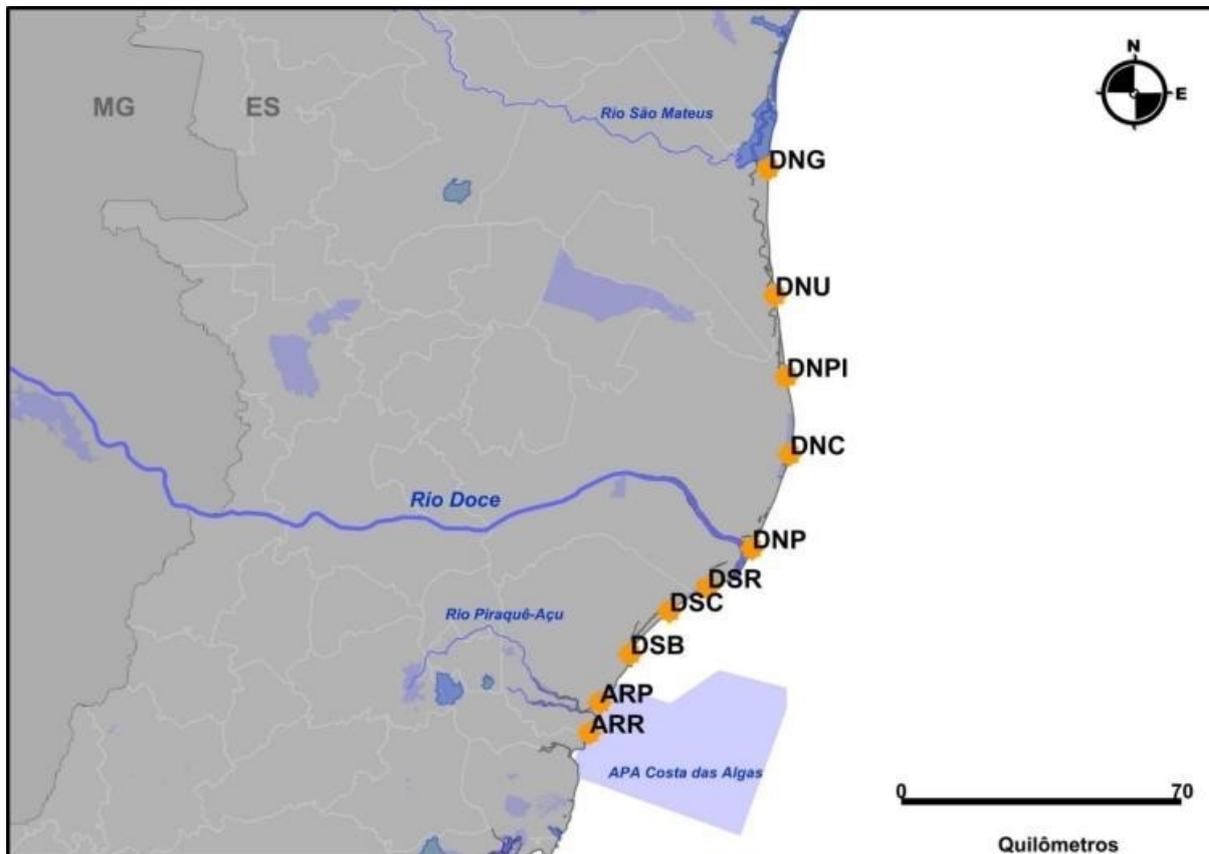
O monitoramento das praias adjacentes à desembocadura do Rio Doce foi realizado com coletas de água, sedimento e biota para análises da contaminação por metais e resposta de biomarcadores. A área de abrangência do monitoramento do ambiente praiial ao longo do litoral do Espírito Santo (ES) foi entre os municípios de Aracruz e São Mateus. Foram estabelecidas 10 estações amostrais ao longo deste litoral (Quadro 21 e Figura 88).

Quadro 21: Estações amostrais referente ao subprojeto de monitoramento de praias. Coordenadas geográficas apresentadas em UTM Sirgas 2000.

NOME DA ESTAÇÃO AMOSTRAL	CÓDIGO DA ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE
Aracruz 1 - Refúgio	ARR	7787892,37	379908,15
Aracruz 2 - Padres	ARP	7795558,41	382269,99
Doce Sul 1 - Barra do Riacho	DSB	7807767,56	389346,33
Doce Sul 2 - Comboios	DSC	7818546,19	398483,36
Doce Sul 3 - Regência	DSR	7824460,93	407416,09
Doce Norte 1 - Povoação	DNP	7834350,26	417863,32
Doce Norte 2 – Vila de Cacimbas	DNC	7857980,26	426646,32
Doce Norte 3 - Pontal do Ipiranga	DNPI	7877396,26	425784,32
Doce Norte 4 - Urussuquara	DNU	7897769,26	423026,32
Doce Norte 5 - Guriri	DNG	7929528,26	421308,32

Fonte: Autoria própria.

Figura 88: Mapa amostral da campanha de monitoramento das praias da região Norte do Espírito Santo.



Fonte: Autoria própria.

### 6.2.2 Análise de metais e parâmetros físico-químico da água e sedimento

Em cada ponto amostral foram aferidos os parâmetros físico-químicos da água *in situ* (Quadro 22). Os parâmetros monitorados foram: temperatura, condutividade, salinidade, pH, e oxigênio dissolvido.

Quadro 22: Parâmetros físico-químicos da água aferidos *in situ* nos dez pontos amostrados no monitoramento praias do Estado do Espírito Santo. Fonte dos dados: medidor multiparâmetro AKSO AK88.

Código Ponto	Temperatura (°C)	Condutividade elétrica (mS/cm)	Salinidade (ppt)	pH	O <sub>2</sub> dissolvido (%)
DNG	27,4	54,4	37,2	6,73	11,8
DNU	25,1	47,16	36,1	6,4	10,41
DNPI	26,7	28,68	33,2	6,7	8,47
DNC	26,7	43,8	28,9	6,7	10,90
DNP	26,3	52,7	36	6,71	12,50
DSR	26,3	47,5	32,6	6,69	13,30
DSC	25,4	19,99	32,4	6,7	11,20
DSB	25,5	50,5	34,1	6,7	10,70
ARP	25,1	52,9	36,2	6,70	12,60
ARR	27,9	54	36,8	6,72	12,60

Fonte: Autoria própria.

Amostras de água e sedimento foram coletadas para quantificação da concentração dos metais: Cromo (Cr), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Cádmio (Cd), Cobre (Cu), Zinco (Zn), Chumbo (Pb), Mercúrio (Hg) e Arsênio (As). Imediatamente após a coleta de água (3 amostras de superfície e 3 amostras de fundo), alíquotas das amostras para a determinação das concentrações totais de metais foram acidificadas com ácido nítrico Suprapur® (HNO<sub>3</sub>, concentração final de 1%) e mantidas refrigeradas. Para análise das concentrações de metais dissolvidos foram coletadas 6 amostras (3 amostras de superfície e 3 amostras de fundo; 50 mL de cada amostra) de água filtrada (filtro de 0,45 µm de malha). Imediatamente após a coleta, as amostras foram filtradas, acidificadas com ácido nítrico Suprapur® (HNO<sub>3</sub>, concentração final de 1%) e mantidas refrigeradas e na ausência de luz. Os níveis de metais encontrados na água são apresentados na Tabela 30.

Além das coletas de água, em cada ponto, também foram coletadas 4 amostras de sedimento. As amostras foram coletadas com core, abertas em caixas plásticas, buscando-se gerar um mínimo de perturbação na superfície do sedimento. Foram então fotografadas imediatamente após a coleta, a fim de registrar as características visuais do sedimento. Para a análise de metais, as amostras foram coletadas com o auxílio de espátula de plástico, raspando-se apenas os primeiros centímetros (0-5 cm) da amostra de sedimento, obtendo-se assim apenas o sedimento superficial. Para cada amostra, foram coletados aproximadamente 50 g de sedimentos, os quais foram armazenados em pote plástico e mantidos congelados até o momento das análises. Em todas as amostras de sedimento foram analisados os mesmos metais analisados na água. Os níveis de metais encontrados no sedimento são apresentados na Tabela 31.

Tabela 30: Valores de média  $\pm$  EP e mediana da concentração de metais na água nos diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praial. Os resultados são expressos em  $\mu\text{g/L}$ .

Amostra de água	Ponto	N	Cr (ug/L)		Fe (ug/L)		Mn (ug/L)		Cd (ug/L)		Cu (ug/L)		Zn (ug/L)		Pb (ug/L)		Hg (ug/L)		As (ug/L)	
			Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana
Total Superfície	DNG	3	0,88 $\pm$ 0,27	0,78	705,93 $\pm$ 119,44	785,4	32,05 $\pm$ 12,37	36,63	0,24 $\pm$ 0,02	0,23	0,82 $\pm$ 0,12	0,74	6,42 $\pm$ 0,54	6,26	1,38 $\pm$ 0,07	1,36	0,08 $\pm$ 0	0,08	0,06 $\pm$ 0,02	0,06
Dissolvido Superfície		3	0,59 $\pm$ 0,13	0,54	440,83 $\pm$ 72,9	421,4	24,56 $\pm$ 13,26	17,68	0,17 $\pm$ 0	0,17	0,48 $\pm$ 0,02	0,49	5,43 $\pm$ 0,91	4,84	1,25 $\pm$ 0,12	1,14	0,07 $\pm$ 0	0,07	0,01 $\pm$ 0	0,01
Total Fundo		3	0,63 $\pm$ 0,06	0,68	510,2 $\pm$ 46,22	497,1	8,66 $\pm$ 3,03	8,03	0,29 $\pm$ 0,02	0,31	1,42 $\pm$ 0,14	1,53	13,98 $\pm$ 2,32	11,87	1,46 $\pm$ 0,04	1,48	0,07 $\pm$ 0	0,07	0,41 $\pm$ 0,16	0,3
Dissolvido Fundo		3	0,18 $\pm$ 0,17	0,02	357,77 $\pm$ 94	445,6	6,54 $\pm$ 3,1	4,28	0,23 $\pm$ 0,04	0,19	0,65 $\pm$ 0,01	0,65	8,98 $\pm$ 0,1	9,01	1,4 $\pm$ 0,03	1,42	0,05 $\pm$ 0	0,05	0,22 $\pm$ 0,04	0,18
Total Superfície	DNU	3	0,36 $\pm$ 0,03	0,32	304,73 $\pm$ 26,19	307,6	20,29 $\pm$ 8,9	24,73	1,02 $\pm$ 0,62	0,71	4,67 $\pm$ 1,2	5,32	15,71 $\pm$ 6,1	9,62	1,31 $\pm$ 0,06	1,36	0,19 $\pm$ 0	0,19	1,98 $\pm$ 0,62	1,68
Dissolvido Superfície		3	0,26 $\pm$ 0	0,26	46,02 $\pm$ 6,87	47,28	3,12 $\pm$ 0,77	2,35	0,31 $\pm$ 0,2	0,21	2,66 $\pm$ 0,55	2,13	8,32 $\pm$ 2,56	6,32	0,62 $\pm$ 0,12	0,55	0,15 $\pm$ 0	0,15	0,37 $\pm$ 0,25	0,2
Total Fundo		3	0,27 $\pm$ 0,04	0,25	225,03 $\pm$ 40,13	185,6	3,87 $\pm$ 2,04	3,87	0,16 $\pm$ 0,09	0,12	3,05 $\pm$ 0,16	3,17	19,84 $\pm$ 4,65	16,27	1,34 $\pm$ 0,04	1,34	0,19 $\pm$ 0	0,19	4,15 $\pm$ 1,38	4,36
Dissolvido Fundo		3	0,22 $\pm$ 0,02	0,22	168,63 $\pm$ 32,32	154,6	2,99 $\pm$ 1,16	2,42	0,13 $\pm$ 0,07	0,12	2,28 $\pm$ 0,45	2,15	17,71 $\pm$ 3,8	14,2	0,88 $\pm$ 0	0,88	0,18 $\pm$ 0	0,18	1,07 $\pm$ 0,39	0,68
Total Superfície	DNPI	3	10,51 $\pm$ 3,2	11,08	173,33 $\pm$ 27,63	199,2	17,25 $\pm$ 2,48	15,26	0,08 $\pm$ 0,05	0,03	4,19 $\pm$ 1,58	5,5	19,97 $\pm$ 1,18	19,3	1,12 $\pm$ 0,05	1,16	0,2 $\pm$ 0	0,2	0,9 $\pm$ 0,31	0,82
Dissolvido Superfície		3	5,24 $\pm$ 2,77	2,96	78,73 $\pm$ 1,67	79,25	11,01 $\pm$ 4,1	9,62	0,02 $\pm$ 0	0,02	1,59 $\pm$ 0,74	0,85	15,39 $\pm$ 0,09	15,42	0,96 $\pm$ 0,09	0,99	0,14 $\pm$ 0,01	0,14	0,41 $\pm$ 0,17	0,32
Total Fundo		3	12,01 $\pm$ 3,57	10,03	205,98 $\pm$ 13,18	213,24	24,61 $\pm$ 2,83	24,61	0,24 $\pm$ 0,21	0,05	1,16 $\pm$ 0,12	1,23	25,49 $\pm$ 4,29	23,36	0,99 $\pm$ 0,06	1,05	0,15 $\pm$ 0,05	0,11	0,68 $\pm$ 0,44	0,29

Amostra de água	Ponto	N	Cr (ug/L)		Fe (ug/L)		Mn (ug/L)		Cd (ug/L)		Cu (ug/L)		Zn (ug/L)		Pb (ug/L)		Hg (ug/L)		As (ug/L)	
			Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana
Dissolvido Fundo	DNC	3	6,73 ± 0,87	6,81	160,07 ± 7,27	155,6	11,16 ± 0,78	11,16	0,01 ± 0	0,01	0,7 ± 0,14	0,57	16,55 ± 1,28	16,78	0,91 ± 0,04	0,88	0,07 ± 0	0,07	0,16 ± 0,05	0,16
Total Superfície		3	0,31 ± 0,02	0,3	598,73 ± 164,85	523	41,11 ± 17,49	33	0,11 ± 0,05	0,08	0,21 ± 0,03	0,22	7,15 ± 0,7	6,93	1,38 ± 0,05	1,36	0,2 ± 0	0,2	2,23 ± 0,8	1,52
Dissolvido Superfície		3	0,24 ± 0	0,24	51,76 ± 10,36	46,48	19,96 ± 4,95	20,27	0,05 ± 0,02	0,03	0,12 ± 0	0,13	6,31 ± 0,3	6,4	1 ± 0,17	0,88	0,17 ± 0,02	0,18	0,29 ± 0,13	0,37
Total Fundo		3	4,65 ± 0,65	4,08	72,57 ± 0,63	73,1	16,28 ± 6,61	13,09	0,08 ± 0,03	0,08	0,84 ± 0,16	0,77	6,86 ± 0,95	6,72	1,43 ± 0,03	1,42	0,2 ± 0	0,2	1,87 ± 0,42	2,02
Dissolvido Fundo		3	3,58 ± 0,07	3,62	46,31 ± 13,08	47,77	14,31 ± 6,94	10,22	0,06 ± 0,02	0,07	0,5 ± 0,12	0,57	5,56 ± 0,92	5,13	1,23 ± 0,06	1,26	0,15 ± 0,01	0,14	0,95 ± 0,42	0,85
Total Superfície		3	6,52 ± 1,09	5,49	64,65 ± 9,78	63,44	82,11 ± 9,58	81,17	0,01 ± 0	0,01	1,41 ± 0,52	0,95	28,14 ± 1,94	29,01	1,04 ± 0,01	1,05	0,07 ± 0	0,07	1,23 ± 0,05	1,26
Dissolvido Superfície		3	4,08 ± 0,35	3,75	47,58 ± 1,35	47,65	4,98 ± 0,47	4,99	0,006 ± 0	0,006	1 ± 0,18	0,81	21,4 ± 0,13	21,34	0,89 ± 0,05	0,94	0,06 ± 0	0,06	0,09 ± 0,03	0,07
Total Fundo		3	7,55 ± 1,97	6,36	1526,57 ± 738,2	1196	41,61 ± 11,63	31,24	0,03 ± 0,01	0,03	1,95 ± 0,52	1,51	35,34 ± 3,1	35	1,06 ± 0,06	1,07	0,07 ± 0	0,07	0,69 ± 0,29	0,41
Dissolvido Fundo		3	4,27 ± 0,2	4,17	543,66 ± 185,34	629,7	20,86 ± 0,69	21,22	0,01 ± 0	0,01	1,62 ± 0,35	1,32	26,75 ± 0,84	26,44	0,99 ± 0,04	0,98	0,07 ± 0	0,06	0,36 ± 0,12	0,24
Total Superfície		DSR	3	0,56 ± 0,1	0,66	558,2 ± 98,12	589,7	22,52 ± 1,74	22,35	0,28 ± 0	0,28	2,23 ± 0,36	2,16	21,7 ± 0,75	22,09	1,31 ± 0,09	1,37	0,1 ± 0	0,1	1,39 ± 0,2
Dissolvido Superfície	3		0,48 ± 0,07	0,52	60,8 ± 38,53	25,29	6,07 ± 1,28	4,95	0,14 ± 0	0,15	1,26 ± 0,09	1,19	20,44 ± 0,91	19,55	1,11 ± 0,06	1,07	0,09 ± 0	0,09	0,4 ± 0,13	0,35
Total Fundo	3		0,28 ± 0,08	0,34	368,53 ± 57,42	421,7	20,42 ± 0,97	20,88	0,21 ± 0,04	0,25	3,96 ± 0,65	3,47	34,24 ± 3,32	31,8	1,41 ± 0,04	1,43	0,18 ± 0	0,18	2,42 ± 1	1,45

Amostra de água	Ponto	N	Cr (ug/L)		Fe (ug/L)		Mn (ug/L)		Cd (ug/L)		Cu (ug/L)		Zn (ug/L)		Pb (ug/L)		Hg (ug/L)		As (ug/L)	
			Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana
Dissolvido Fundo	DSC	3	0,15 ± 0,03	0,17	37,95 ± 16,73	24,42	10,03 ± 1,13	9,34	0,13 ± 0,04	0,11	2,97 ± 0,33	2,66	27,65 ± 1,42	28,83	1,34 ± 0,05	1,39	0,16 ± 0	0,16	0,8 ± 0,02	0,78
Total Superfície		3	4,37 ± 0,08	4,36	108,25 ± 36,89	137,5	5,14 ± 0,47	5,22	0,11 ± 0	0,11	1,83 ± 0,43	1,85	5,47 ± 1,16	5,35	1,26 ± 0,02	1,24	0,2 ± 0	0,2	1,63 ± 0,68	1,1
Dissolvido Superfície		3	0,14 ± 0	0,13	32,01 ± 7,57	28,47	3,74 ± 0,14	3,64	0,07 ± 0	0,07	0,6 ± 0,06	0,55	3,4 ± 0,61	2,8	0,99 ± 0,06	1,02	0,16 ± 0	0,16	1,12 ± 0,31	0,86
Total Fundo		3	6,57 ± 1,1	7,41	562,06 ± 79,79	584,8	45,57 ± 3,93	44,23	0,45 ± 0,13	0,57	7,9 ± 1,05	7,22	6,67 ± 0,48	6,77	1,22 ± 0,12	1,22	0,2 ± 0	0,2	4,23 ± 2,75	2,2
Dissolvido Fundo		3	5,48 ± 0,63	6,03	53,82 ± 10,94	59,66	11,73 ± 1,67	12,24	0,01 ± 0	0,01	1,32 ± 0,24	1,1	4,47 ± 0,12	4,56	1,14 ± 0,05	1,2	0,17 ± 0,03	0,2	0,27 ± 0,13	0,14
Total Superfície	DSB	3	8,64 ± 1,44	7,68	663,4 ± 30,6	674,3	10,21 ± 2,1	9,08	0,42 ± 0,36	0,06	2,07 ± 0,28	1,98	40,86 ± 2,24	39,21	1,04 ± 0,01	1,03	0,07 ± 0	0,07	0,71 ± 0,2	0,84
Dissolvido Superfície		3	4,97 ± 1,31	3,67	219,33 ± 63,27	161,9	5,59 ± 0,26	5,66	0,04 ± 0	0,04	1,83 ± 0,22	1,71	33,25 ± 4,33	29,66	0,95 ± 0	0,95	0,06 ± 0	0,06	0,17 ± 0,02	0,15
Total Fundo		3	8,75 ± 1,97	7,23	157,28 ± 69,68	101,3	13,95 ± 3,93	13,57	0,03 ± 0,01	0,02	1,95 ± 0,05	1,97	49,03 ± 2,72	47,98	1,09 ± 0,03	1,11	0,08 ± 0	0,08	0,45 ± 0,16	0,29
Dissolvido Fundo		3	5,1 ± 0,11	5,03	99,73 ± 35,38	65,16	3,98 ± 1,51	4,22	0,02 ± 0,01	0,01	1,53 ± 0,05	1,52	40,61 ± 3,64	44,26	0,99 ± 0,01	0,99	0,07 ± 0	0,07	0,29 ± 0,04	0,25
Total Superfície	ARP	3	0,52 ± 0,02	0,5	562,26 ± 96,15	490,9	34,84 ± 2,52	36,38	0,28 ± 0,01	0,28	0,98 ± 0,11	1,02	19,64 ± 3,73	18,82	1,02 ± 0,16	0,96	0,08 ± 0	0,08	2,57 ± 0,44	2,48
Dissolvido Superfície		3	0,46 ± 0,01	0,45	367,8 ± 46,44	400,8	2,99 ± 0,57	2,52	0,25 ± 0	0,25	0,84 ± 1,47	0,74	12,77 ± 1,01	12,42	0,74 ± 0,01	0,74	0,06 ± 0,01	0,05	0,3 ± 0,11	0,36
Total Fundo		3	0,57 ± 0,04	0,59	695,2 ± 22,75	678,6	21,95 ± 1,31	22	0,23 ± 0,02	0,21	1,18 ± 0,23	1,22	33,67 ± 12,1	27,55	1,34 ± 0,03	1,37	0,09 ± 0	0,09	1,1 ± 0,48	0,91

Amostra de água	Ponto	N	Cr (ug/L)		Fe (ug/L)		Mn (ug/L)		Cd (ug/L)		Cu (ug/L)		Zn (ug/L)		Pb (ug/L)		Hg (ug/L)		As (ug/L)	
			Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana	Média ± EP	Mediana
Dissolvido Fundo	ARR	3	0,46 ± 0,02	0,46	87,15 ± 11,56	79,44	4,39 ± 0,12	4,32	0,21 ± 0,03	0,18	0,88 ± 0,12	0,78	23,64 ± 8,59	15,32	1,24 ± 0,07	1,24	0,08 ± 0	0,08	0,25 ± 0,11	0,33
Total Superfície		3	0,34 ± 0,04	0,32	109,52 ± 18,41	113,4	6,69 ± 0,98	6,84	0,11 ± 0,04	0,08	0,51 ± 0,12	0,41	5,85 ± 0,59	5,84	1,45 ± 0	1,45	0,15 ± 0,03	0,18	0,69 ± 0,2	0,76
Dissolvido Superfície		3	0,23 ± 0	0,23	67,68 ± 1,25	68,33	4,18 ± 0,33	4,32	0,07 ± 0,01	0,08	0,36 ± 0,02	0,35	3,54 ± 0,06	3,52	1,37 ± 0,03	1,37	0,1 ± 0,01	0,1	0,38 ± 0,23	0,19
Total Fundo		3	0,31 ± 0,02	0,3	366,1 ± 140,61	237,2	2,87 ± 0,32	2,56	0,11 ± 0,01	0,11	0,7 ± 0,06	0,67	6,57 ± 0,47	6,18	1,44 ± 0,06	1,4	0,18 ± 0	0,18	2,21 ± 0,14	2,08
Dissolvido Fundo		3	0,22 ± 0,04	0,23	304,67 ± 107,28	203,7	1,78 ± 0,6	2,33	0,07 ± 0,01	0,08	0,48 ± 0,18	0,55	5,92 ± 0,69	5,23	1,41 ± 0,06	1,37	0,1s6 ± 0,01	0,16	1,01 ± 0,32	1,12

Fonte: Autoria própria.

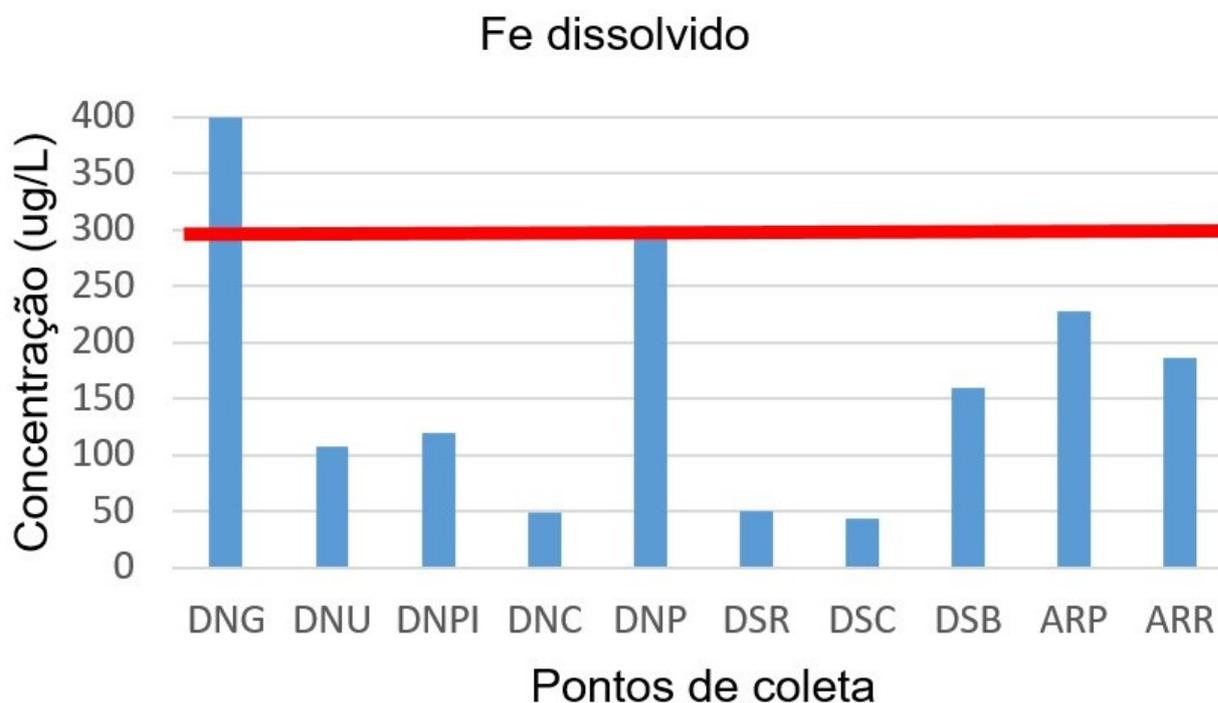
Tabela 31: Valores de média ± EP e mediana da concentração de metais no sedimento nos diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praial. Os resultados são expressos em mg/kg.

Ponto	N	Cr (mg/kg peso Seco)		Fe (mg/kg peso Seco)		Mn (mg/kg peso Seco)		Cd (mg/kg peso Seco)		Cu (mg/kg peso Seco)		Zn (mg/kg peso Seco)		Pb (mg/kg peso Seco)		Hg (mg/kg peso Seco)		As (mg/kg peso Seco)	
		Média ± EP	Mediana																
DNG	4	0,31 ± 0,08	0,26	9,7 ± 0,47	9,62	11,57 ± 0,96	12,33	0,0006 ± 0	0,0007	0,11 ± 0,03	0,1	27,27 ± 3,84	29,12	0,005 ± 0	0,004	0,002 ± 0	0,002	0,003 ± 0	0,003
DNU	4	0,18 ± 0,02	0,17	8,36 ± 1,01	7,56	5,72 ± 0,82	5,75	0,0004 ± 0	0,0004	0,04 ± 0	0,04	25,78 ± 2,18	25,27	0,002 ± 0	0,002	0,002 ± 0	0,002	0,01 ± 0	0,01
DNPI	4	0,22 ± 0,06	0,17	10,25 ± 1,02	10,17	7,72 ± 1,31	8,4	0,0008 ± 0	0,0008	0,01 ± 0,01	0,005	19,07 ± 1,88	20,67	0,004 ± 0	0,003	0,003 ± 0	0,003	0,008 ± 0	0,008
DNC	4	0,44 ± 0,03	0,44	11,78 ± 1,13	11,95	11,61 ± 2,24	12,88	0,0007 ± 0	0,0004	0,08 ± 0,03	0,06	35,22 ± 3,76	35,02	0,02 ± 0	0,01	0,004 ± 0	0,004	0,003 ± 0	0,003
DNP	4	0,35 ± 0,09	0,29	9,74 ± 1,32	9,31	9,52 ± 0,78	9,59	0,001 ± 0	0,001	0,005 ± 0	0,005	30,69 ± 3,66	29,7	0,02 ± 0	0,02	0,003 ± 0	0,003	0,005 ± 0	0,005
DSR	4	0,75 ± 0,13	0,79	13,94 ± 3,8	12,73	8,73 ± 1,07	8,92	0,002 ± 0	0,002	0,21 ± 0,05	0,16	49,62 ± 9,79	43,24	0,01 ± 0,01	0,007	0,003 ± 0,02	0,003	0,006 ± 0	0,006
DSC	4	0,19 ± 0	0,19	8,11 ± 0,75	7,93	3,81 ± 0,44	3,58	0,0007 ± 0	0,0007	0,02 ± 0	0,02	16,51 ± 1,49	17,19	0,005 ± 0	0,006	0,003 ± 0	0,002	0,003 ± 0	0,003
DSB	4	0,08 ± 0	0,08	11,52 ± 2,17	12,22	4,49 ± 0,54	4,86	0,08 ± 0,08	0,0008	0,05 ± 0,02	0,05	16,05 ± 1,55	16,9	0,002 ± 0	0,002	0,003 ± 0	0,003	0,005 ± 0	0,005
ARP	4	0,24 ± 0,02	0,24	96,11 ± 8,14	95,6	61,88 ± 7,9	59,76	0,0007 ± 0	0,0005	0,34 ± 0,08	0,33	1,3 ± 0,06	1,32	1,99 ± 0,17	2	0,001 ± 0	0,001	0,005 ± 0	0,005
ARR	4	0,71 ± 0,06	0,75	24,57 ± 7,31	21,54	17,7 ± 2,98	18,84	0,01 ± 0	0,01	0,43 ± 0,04	0,43	165,84 ± 16,76	167,76	0,053 ± 0	0,05	0,004 ± 0	0,005	0,005 ± 0	0,004

Fonte: Autoria própria.

As concentrações dos metais (total ou dissolvido) analisados na água foram comparados com os limites permitidos para águas salinas (águas com salinidade igual ou superior a 30 ppt) Classe I, conforme definido pela Resolução 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. A partir desta comparação, foram detectadas concentrações de Fe (Figura 89) acima dos limites permitidos na legislação brasileira para alguns pontos (Tabela 32).

Figura 89: Concentração de ferro dissolvido ( $\mu\text{g/L}$ ) nas amostras de água. Os pontos de coleta são apresentados da esquerda para a direita seguindo o sentido Norte-Sul. As barras azuis representam as médias de Fe das amostras de superfície e fundo e a linha em vermelho marca o limite permitido para Fe dissolvido pela legislação ( $300\mu\text{g/L}$ ).



Fonte: Autoria própria.

Já para o sedimento, todos os metais apresentaram valores abaixo do estabelecido segundo padrões estabelecidos pela Resolução CONAMA N° 454, de 1° de novembro de 2012, exceto ferro e manganês que não estão na lista e não há limite definido (Tabela 31). Apesar disso, os níveis de Fe, Mn e Pb foram mais altos no ponto ARP (Aracruz Padres), o qual está inserido na APA Costa das Algas.

Os resultados apresentados aqui são pontuais e transitórios, devendo-se sempre levar e conta a dinâmica praiar nos diferentes períodos de coleta.

Tabela 32: Valores mínimos e máximos de metais encontrados na água em cada ponto amostral. \*V.M.P.: Valor máximo permissível para o enquadramento das classes de águas salinas ( $\mu\text{g/L}$ ).

Classe 1 - águas que podem ser destinadas: (a) a recreação de contato primário; (b) a proteção das comunidades aquáticas; e (c) a aquicultura e a atividade de pesca

Ponto	Cr total ( $\mu\text{g/L}$ )		Fe dissolvido ( $\mu\text{g/L}$ )		Mn total ( $\mu\text{g/L}$ )		Cd total ( $\mu\text{g/L}$ )		Cu dissolvido ( $\mu\text{g/L}$ )		Zn total ( $\mu\text{g/L}$ )		Pb total ( $\mu\text{g/L}$ )		Hg total ( $\mu\text{g/L}$ )		As total ( $\mu\text{g/L}$ )	
	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx	Min	Máx
DNG	0,47	1,41	169,9	575,7	3,76	50,83	0,2	0,32	0,45	0,67	5,56	18,63	1,27	1,52	0,07	0,08	0,02	0,73
DNU	0,2	0,43	33,55	230,3	1,36	33,01	0,03	2,22	1,57	3,77	9,6	29,06	1,19	1,41	0,18	0,19	1,1	6,43
DNPI	4,7	18,95	75,62	174,3	14,31	28,08	0,01	0,67	0,54	3,06	18,34	33,76	0,87	1,18	0,08	0,26	0,19	1,56
DNC	0,27	5,96	22,97	71,77	6,76	74,65	0,03	0,21	0,11	0,67	5,29	8,58	1,31	1,49	0,2	0,2	1,08	3,84
DNP	4,88	11,4	45,21	812,9	28,76	99,15	0,01	0,04	0,81	2,32	24,42	40,88	0,94	1,17	0,06	0,07	0,38	1,41
DSR	0,11	0,67	18,22	137,8	18,56	25,63	0,12	0,29	1,16	3,63	20,25	40,81	1,13	1,46	0,1	0,18	1	4,42
DSC	4,22	7,92	21,03	69,16	4,28	52,95	0,1	0,6	0,54	1,82	3,52	7,53	1,07	1,37	0,2	0,2	0,8	9,69
DSB	6,35	12,66	63,54	345,7	7,26	20,96	0,01	1,14	1,44	2,27	38,07	54,19	1,02	1,13	0,07	0,08	0,3	0,97
ARP	0,5	0,63	72,12	426,5	19,65	38,23	0,2	0,29	0,65	1,13	13,62	57,01	0,78	1,39	0,08	0,1	0,37	3,38
ARR	0,27	0,42	65,27	519,1	2,55	8,32	0,07	0,19	0,13	0,76	4,83	7,52	1,36	1,57	0,09	0,19	0,3	2,5
*V.M.P. (CONAMA/classe 1)	50		300		100		5		5		90		10		0,2		10	

Fonte: Autoria própria.

### 6.2.3 Análise da concentração de metais e níveis de biomarcadores na biota

Com o objetivo de avaliar possíveis efeitos biológicos decorrentes da contaminação da água por metais e consequente acúmulo desses metais nos organismos de diferentes níveis tróficos, foram realizadas coletas de organismos típicos das regiões a serem monitoradas. Dessa forma, no ambiente praiado, em cada ponto amostral foram coletados os seguintes organismos:

- Poliqueta (n=6).
- Anfípoda (n=5 pools, 5 indivíduos por pool).
- O isópoda *Excirolana* sp. (n=5 pools, 5 indivíduos por pool).
- O caranguejo *Ocypode quadrata* (n=6).

Após coleta e biometria, os caranguejos foram criotestados e foram coletados hemolinfa, para dosagem de biomarcadores de danos de DNA {sítios apurínicos/pirimidínicos (AP) e micronúcleo}, bem como: músculo, brânquias e hepatopâncreas para avaliação dos biomarcadores (proteínas oxidadas, lipoperoxidação e metalotioneína). Além da avaliação dos biomarcadores, paralelamente seguiu-se a quantificação dos níveis de metais nos tecidos, a saber: arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn), mercúrio (Hg) e zinco (Zn). Os demais organismos (anfípodas, isópodas e poliquetas) foram coletados, colocados em tubos criogênicos e imediatamente armazenados em nitrogênio líquido.

A análise de danos ao DNA através do ensaio de Micronúcleo na hemolinfa dos caranguejos coletados (*Ocypode quadrata*), apesar de ter sido padronizada com sucesso em laboratório, não obteve êxito ao ser realizada em campo. O protocolo padronizado em laboratório foi devidamente executado em campo, entretanto as lâminas geradas não estavam adequadas para análise e poderiam prejudicar a interpretação dos dados e gerar falsos positivos. Entre os principais problemas encontrados na análise ressaltamos o baixo número de células que em geral estavam com suas estruturas deformadas. A bibliografia atual utilizando hemolinfa para esta análise alerta para o fato de que a principal limitação deste tecido é a complexidade dos tipos de células, dificultando assim as análises. Além disto, a bibliografia também indica que os organismos devem ser rapidamente transportados para o laboratório para posterior execução do protocolo (Bolognesi e Fenech, 2012). Sendo assim, identificamos que o teste de Micronúcleo especificamente na hemolinfa de crustáceos é inviável de ser realizado nas condições de campo encontradas no monitoramento.

Dessa forma, os próximos dados a serem mostrados neste relatório são os níveis de metais mensurados na biota coletada no ambiente praiado (Tabela 33 e Tabela 34). Para o ponto DSB (Barra do Riacho) não houve coleta de biota, pois não foram encontrados os organismos propostos. Os poliquetas foram encontrados apenas em alguns pontos amostrados.

Tabela 33: Valores de média ± EP e mediana da concentração de metais em anfípodas, poliquetos e no isópode *Exciorolana* sp. nos diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praiado. Os resultados são expressos em mg/kg de peso úmido.

Organismo	Ponto	N	Cr (mg/kg peso úmido)		Fe (mg/kg peso úmido)		Mn (mg/kg peso úmido)		Cd (mg/kg peso úmido)		Cu (mg/kg peso úmido)		Zn (mg/kg peso úmido)		Pb (mg/kg peso úmido)		Hg (mg/kg peso úmido)		As (mg/kg peso úmido)	
			Média ± EP	Mediana																
<i>Exciorolana</i> sp.	DNG	5	0,61 ± 0,26	0,5	32,95 ± 12,67	41,41	5,94 ± 1,58	7,6	0,02 ± 0	0,02	84,72 ± 22,22	68,97	130,56 ± 35,68	164,63	0,27 ± 0,05	0,22	0,23 ± 0,03	0,2	3,76 ± 1,18	5,14
<i>Exciorolana</i> sp.	DNU	5	0,42 ± 0,15	0,34	37,9 ± 16,19	26,42	10,44 ± 3,97	8,22	0,14 ± 0,05	0,11	5,07 ± 1,35	6,78	45,54 ± 12,91	40,41	0,22 ± 0,05	0,25	0,24 ± 0,04	0,28	0,31 ± 0,06	0,32
<i>Exciorolana</i> sp.	DNPI	6	0,41 ± 0,12	0,34	54,9 ± 5,48	51,5	5,79 ± 0,98	6,36	0,09 ± 0,03	0,07	3,07 ± 1,14	3,03	19,72 ± 7,32	12,73	0,25 ± 0,06	0,22	0,11 ± 0,05	0,06	0,42 ± 0,23	0,13
<i>Exciorolana</i> sp.	DNC	6	0,28 ± 0,06	0,28	47,69 ± 8,59	46,29	1,25 ± 0,33	0,89	0,15 ± 0,06	0,09	3,94 ± 1,14	4,68	20,55 ± 4,08	21,53	0,22 ± 0,08	0,12	0,33 ± 0,06	0,34	0,11 ± 0,03	0,1
<i>Exciorolana</i> sp.	DNP	8	0,51 ± 0,93	0,43	33,31 ± 7,93	34,17	1,97 ± 0,45	1,88	0,28 ± 0,09	0,23	4,3 ± 2,18	1,29	17,58 ± 4,58	13,95	0,25 ± 0,12	0,25	0,07 ± 0,02	0,08	0,49 ± 0,15	0,37
<i>Exciorolana</i> sp.	DSR	5	0,04 ± 0,01	0,04	33,68 ± 6,43	30,46	1,9 ± 0,76	1,53	0,01 ± 0	0,004	19,57 ± 5,22	17,64	11,44 ± 2,27	11,66	0,92 ± 0,26	1,02	0,01 ± 0	0,01	2,12 ± 0,92	0,85
<i>Exciorolana</i> sp.	DSC	5	0,32 ± 0,12	0,19	9,27 ± 2,7	8,12	0,89 ± 0,31	0,72	0,09 ± 0,04	0,05	2,47 ± 1,32	0,72	6,75 ± 1,89	6	0,08 ± 0,05	0,02	0,007 ± 0	0,005	0,32 ± 0,05	0,3
<i>Exciorolana</i> sp.	ARP	5	1,66 ± 0,62	1,05	40,87 ± 13,18	23,38	7,79 ± 1,68	8,04	0,08 ± 0,02	0,08	1,1 ± 0,27	1,27	23,76 ± 5,13	23,67	0,36 ± 0,1	0,4	0,31 ± 0,05	0,3	1,42 ± 0,35	1,74
<i>Exciorolana</i> sp.	ARR	5	9,82 ± 5,54	5,2	43,68 ± 13,8	28,94	10,03 ± 4,86	6,24	0,27 ± 0,11	0,24	4,34 ± 1,41	3,59	5,54 ± 1,57	6,1	0,66 ± 0,29	0,29	0,39 ± 0,1	0,49	1,52 ± 0,61	0,7
anfípodo	DNG	5	0,5 ± 0,16	0,6	28,91 ± 8,35	31,31	3 ± 1	2,37	0,01 ± 0	0,008	28,49 ± 8,01	23,8	40,69 ± 11,26	32,61	0,17 ± 0,02	0,17	0,1 ± 0	0,1	1,27 ± 0,25	1,51
anfípodo	DNU	5	0,11 ± 0,03	0,13	14,53 ± 3,56	15,71	1,71 ± 0,45	2,12	0,02 ± 0	0,01	0,6 ± 0,12	0,66	8,66 ± 2,55	5,98	0,32 ± 0,1	0,3	0,06 ± 0,01	0,04	0,03 ± 0,01	0,03
anfípodo	DNPI	9	0,46 ± 0,21	0,22	26,91 ± 5,5	21,41	8,57 ± 4,12	4,66	0,4 ± 0,26	0,07	5,66 ± 1,04	5,59	3,74 ± 0,84	3,1	0,36 ± 0,1	0,24	0,19 ± 0,03	0,18	0,18 ± 0,05	0,11

Organismo	Ponto	N	Cr (mg/kg peso úmido)		Fe (mg/kg peso úmido)		Mn (mg/kg peso úmido)		Cd (mg/kg peso úmido)		Cu (mg/kg peso úmido)		Zn (mg/kg peso úmido)		Pb (mg/kg peso úmido)		Hg (mg/kg peso úmido)		As (mg/kg peso úmido)	
			Média ± EP	Mediana																
anfípodo	DNC	5	0,19 ± 0,04	0,19	11,51 ± 3,93	6,39	1,29 ± 0,29	1,16	0,19 ± 0,08	0,17	3,47 ± 1,73	1,09	5,48 ± 2,75	1,7	0,07 ± 0,02	0,04	0,17 ± 0,01	0,17	0,04 ± 0,02	0,02
anfípodo	DNP	5	1,26 ± 0,22	1,26	13,68 ± 2,44	15,31	1,65 ± 0,4	1,6	0,36 ± 0,1	0,35	6,41 ± 1,77	6,54	8,44 ± 2,24	8,98	0,54 ± 0,09	0,46	0,009 ± 0	0,008	0,39 ± 0,05	0,36
anfípodo	DSR	5	0,18 ± 0,06	0,11	13,85 ± 4,1	15,23	0,58 ± 0,21	0,4	0,02 ± 0,01	0,007	7,58 ± 2,09	6,51	12,87 ± 2,75	14,03	0,04 ± 0,02	0,04	0,01 ± 0	0,01	1,01 ± 0,33	1,12
anfípodo	DSC	5	0,62 ± 0,29	0,23	17,31 ± 6,52	14,54	2,49 ± 0,58	2,32	1,2 ± 0,44	1,75	1,9 ± 0,47	2,43	16,21 ± 3,04	11,76	0,04 ± 0,01	0,04	0,16 ± 0,04	0,21	0,34 ± 0,1	0,33
anfípodo	ARP	5	1,05 ± 0,26	1,32	37,64 ± 13,32	25,31	1,65 ± 1,23	0,44	0,001 ± 0	0,001	6,14 ± 1,88	6,49	9,84 ± 3,37	5,49	0,05 ± 0,01	0,06	0,02 ± 0,01	0,01	0,09 ± 0,05	0,04
anfípodo	ARR	5	2,69 ± 1,15	2,45	7,61 ± 3,14	5,02	8,37 ± 4,63	3,33	0,01 ± 0	0,005	15,4 ± 5	8,39	28,74 ± 11,24	27,07	0,63 ± 0,24	0,41	0,09 ± 0,03	0,06	0,62 ± 0,19	0,58
poliqueto	DNU	5	2,09 ± 0,98	1,3	180,7 ± 40,11	161,43	23,97 ± 11,21	14,64	0,81 ± 0,48	0,37	25,33 ± 8,03	25,64	197,11 ± 83,63	164,03	0,61 ± 0,17	0,63	0,17 ± 0,06	0,19	5,64 ± 2,16	5,44
poliqueto	DNPI	4	0,63 ± 0,1	0,7	51,08 ± 14,51	49,76	6,88 ± 1,8	8,03	0,79 ± 0,43	0,64	3,43 ± 1,13	3,36	40,62 ± 10,78	43,15	0,3 ± 0,14	0,3	0,44 ± 0,14	0,44	2,75 ± 0,56	2,94
poliqueto	DNC	4	0,39 ± 0,13	0,39	25,51 ± 5,91	25,53	13,39 ± 4,19	10,99	0,44 ± 0,38	0,07	53,69 ± 9,69	45,96	22,8 ± 6,02	20,21	0,11 ± 0,07	0,06	0,44 ± 0,14	0,39	3,54 ± 0,83	3,63
poliqueto	DNP	7	12,59 ± 2,96	2,96	72,44 ± 10,49	65,15	35,91 ± 8,84	37,55	2,98 ± 1,45	0,98	8,34 ± 2,28	6,89	91,35 ± 29,35	100,8	1,22 ± 0,42	1,06	2,36 ± 0,51	2,45	6,57 ± 1,6	8,05
poliqueto	DSC	5	0,44 ± 0,14	0,51	34,45 ± 4,71	33,76	26,99 ± 11,09	14,67	0,25 ± 0,17	0,07	13,31 ± 5,16	13,14	18,46 ± 5,07	16,85	1,75 ± 0,63	1,19	0,76 ± 0,38	0,59	3,48 ± 1,48	3,01
poliqueto	ARP	5	2,02 ± 0,65	1,35	54,39 ± 10,97	48,35	10,95 ± 2,45	10,94	1,07 ± 0,83	0,28	23,44 ± 10,75	15,52	100,48 ± 25,5	93,33	0,22 ± 0,11	0,1	0,38 ± 0,1	0,47	1,34 ± 0,39	0,93
poliqueto	ARR	3	12,62 ± 7,84	10,12	17,94 ± 4,16	13,89	16,58 ± 6,39	15,74	0,46 ± 0,33	0,2	19,28 ± 4,63	23	5,5 ± 0,86	6,24	1,15 ± 0,49	1,41	0,38 ± 0,06	0,4	2,29 ± 0,78	3

Fonte: Autoria própria.

Tabela 34: Valores de média  $\pm$  EP e mediana da concentração de metais em brânquias, hepatopâncreas e músculo do caranguejo *Ocypode quadrata* em diferentes pontos amostrais do monitoramento do ambiente praia. Os resultados são expressos em mg/kg peso úmido.

Espécie	Ponto	Tecido	N	Cr (mg/kg peso úmido)		Fe (mg/kg peso úmido)		Mn (mg/kg peso úmido)		Cd (mg/kg peso úmido)		Cu (mg/kg peso úmido)		Zn (mg/kg peso úmido)		Pb (mg/kg peso úmido)		Hg (mg/kg peso úmido)		As (mg/kg peso úmido)			
				Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana	Média $\pm$ EP	Mediana
				Ocypode quadrata	DNG	M	6	0,15 $\pm$ 0,04	0,14	10,23 $\pm$ 2,02	10,57	0,48 $\pm$ 0,08	0,47	0,003 $\pm$ 0	0,001	1,97 $\pm$ 1,6	0,38	3,44 $\pm$ 0,68	3,26	0,02 $\pm$ 0,01	0,02	0,02 $\pm$ 0	0,01
B	6	0,32 $\pm$ 0,1	0,28			21,38 $\pm$ 6,26	17,74	2,51 $\pm$ 1,09	1,16	0,02 $\pm$ 0,01	0,003	2,08 $\pm$ 1,12	1,15	81,09 $\pm$ 13,34	86,54	0,09 $\pm$ 0,06	0,03	0,02 $\pm$ 0	0,02	0,03 $\pm$ 0	0,03		
H	6	1,3 $\pm$ 0,58	0,54			107 $\pm$ 24,83	97,2	5,79 $\pm$ 1,4	6,8	0,01 $\pm$ 0,01	0,002	2,49 $\pm$ 1,61	1,3	40,21 $\pm$ 13,39	28,19	0,25 $\pm$ 0,11	0,11	0,1 $\pm$ 0,03	0,09	0,63 $\pm$ 0,57	0,06		
DNU	M	6	0,3 $\pm$ 0,13		0,2	4,3 $\pm$ 1,87	2,83	1,01 $\pm$ 0,41	0,76	0,04 $\pm$ 0,03	0,01	0,98 $\pm$ 0,35	0,73	1,39 $\pm$ 0,29	1,19	0,02 $\pm$ 0	0,01	0,02 $\pm$ 0	0,02	0,06 $\pm$ 0,04	0,02		
	B	5	0,77 $\pm$ 0,35		0,74	21,11 $\pm$ 8,63	19,62	1,94 $\pm$ 0,86	1,19	0,17 $\pm$ 0,16	0,01	26,3 $\pm$ 13,68	11,08	12,41 $\pm$ 10,07	1,91	0,03 $\pm$ 0,01	0,03	0,14 $\pm$ 0,1	0,05	0,19 $\pm$ 0,1	0,04		
	H	6	1,68 $\pm$ 0,84		0,67	33,92 $\pm$ 13,37	33,38	1,96 $\pm$ 0,41	1,88	0,02 $\pm$ 0,01	0,01	21,98 $\pm$ 10,26	12,36	8,66 $\pm$ 2,5	8,26	0,15 $\pm$ 0,1	0,04	0,16 $\pm$ 0,06	0,1	0,05 $\pm$ 0,01	0,04		
DNPI	M	7	0,31 $\pm$ 0,1		0,19	8,18 $\pm$ 1,9	7,36	3,41 $\pm$ 1,33	2,2	0,16 $\pm$ 0,11	0,06	2,21 $\pm$ 0,69	1,6	9,2 $\pm$ 2,35	7,96	0,08 $\pm$ 0,04	0,02	0,03 $\pm$ 0	0,03	0,25 $\pm$ 0,2	0,02		
	B	4	0,34 $\pm$ 0,04		0,35	36,74 $\pm$ 13,59	32,3	1,7 $\pm$ 1,06	0,76	0,17 $\pm$ 0,15	0,02	14,97 $\pm$ 2,41	14,16	9,13 $\pm$ 4,29	8,66	0,17 $\pm$ 0,14	0,03	0,06 $\pm$ 0	0,05	0,08 $\pm$ 0,05	0,03		
	H	7	0,18 $\pm$ 0,05		0,19	28,34 $\pm$ 6	30,69	4,25 $\pm$ 1,26	3,5	0,31 $\pm$ 0,16	0,12	37,14 $\pm$ 12,12	21,22	13,73 $\pm$ 2,75	15,29	0,24 $\pm$ 0,12	0,11	0,1 $\pm$ 0,03	0,08	1,17 $\pm$ 0,96	0,05		
DNC	M	6	0,14 $\pm$ 0,08		0,03	4,08 $\pm$ 1,11	3,41	0,99 $\pm$ 0,45	0,6	0,13 $\pm$ 0,07	0,03	1,63 $\pm$ 0,51	1,28	6,31 $\pm$ 2,13	7,12	0,06 $\pm$ 0,04	0,02	0,05 $\pm$ 0,01	0,05	0,4 $\pm$ 0,1	0,39		
	B	4	0,08 $\pm$ 0,03		0,08	21,61 $\pm$ 6,68	19,51	0,68 $\pm$ 0,31	0,68	0,07 $\pm$ 0,03	0,05	2,31 $\pm$ 0,76	2,21	2,53 $\pm$ 0,73	2,23	0,07 $\pm$ 0,05	0,03	0,06 $\pm$ 0,01	0,07	0,18 $\pm$ 0,01	0,19		
	H	6	0,34 $\pm$ 0,18		0,14	29,86 $\pm$ 7,84	26,69	3,77 $\pm$ 2,11	1,47	0,14 $\pm$ 0,11	0,03	58,16 $\pm$ 12,39	63,12	12,63 $\pm$ 2,92	11,93	0,13 $\pm$ 0,07	0,05	0,29 $\pm$ 0,16	0,16	0,53 $\pm$ 0,19	0,43		
DNP	M	6	0,81 $\pm$ 0,25	0,97	3,21 $\pm$ 0,95	3,7	1,18 $\pm$ 0,56	0,68	0,01 $\pm$ 0	0,004	4,56 $\pm$ 1,43	4,41	5,5 $\pm$ 1,16	4,89	0,25 $\pm$ 0,1	0,33	0,007 $\pm$ 0	0,007	0,41 $\pm$ 0,25	0,14			
	B	5	0,42 $\pm$ 0,07	0,44	33,46 $\pm$ 10,05	20,29	0,42 $\pm$ 0,16	0,45	0,003 $\pm$ 0	0,002	5,05 $\pm$ 1,25	3,73	8,4 $\pm$ 2,73	5,47	0,34 $\pm$ 0,09	0,25	0,007 $\pm$ 0	0,007	0,15 $\pm$ 0,03	0,14			

Espécie	Ponto	Tecido	N	Cr (mg/kg peso úmido)		Fe (mg/kg peso úmido)		Mn (mg/kg peso úmido)		Cd (mg/kg peso úmido)		Cu (mg/kg peso úmido)		Zn (mg/kg peso úmido)		Pb (mg/kg peso úmido)		Hg (mg/kg peso úmido)		As (mg/kg peso úmido)			
				Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na	Média ± EP	Media na
				Ocypride quadrata	DSR	H	6	1,23 ± 0,52	0,94	31,82 ± 5,28	31,19	0,62 ± 0,45	0,17	0,07 ± 0,05	0,007	20,56 ± 12,37	10,27	14,9 ± 3,36	16,98	0,42 ± 0,17	0,59	0,04 ± 0,02	0,02
M	6	0,11 ± 0,04	0,08			3,15 ± 0,85	2,49	0,46 ± 0,1	0,41	0,08 ± 0,04	0,04	4,43 ± 1,47	4,86	6,57 ± 2,16	5,26	0,26 ± 0,03	0,24	0,01 ± 0	0,005	0,24 ± 0,07	0,22		
B	6	0,22 ± 0,12	0,14			22,96 ± 8,39	15,52	6,83 ± 2,87	5,96	0,28 ± 0,09	0,19	14,18 ± 8,14	7,06	15,41 ± 4,35	11,02	1,45 ± 0,87	0,43	0,009 ± 0	0,008	1,61 ± 0,72	0,61		
H	6	1,12 ± 1,06	0,05			24,93 ± 7,35	18,52	2,35 ± 1,47	1,16	0,23 ± 0,12	0,15	8,2 ± 3,33	5,01	14,46 ± 4,62	16,56	0,83 ± 0,28	0,55	0,05 ± 0,03	0,01	0,62 ± 0,2	0,44		
DSC	M	6	0,28 ± 0,07		0,32	8,82 ± 2,42	7,46	3,05 ± 0,92	2,39	0,14 ± 0,08	0,08	3,14 ± 0,94	2,85	19,38 ± 3	19,71	0,08 ± 0,05	0,05	0,01 ± 0	0,01	1,35 ± 0,4	0,9		
	B	6	1,7 ± 1,11		0,39	16,55 ± 7,16	9,71	5,42 ± 1,91	3,8	0,1 ± 0,02	0,09	6,19 ± 0,45	6,5	72,8 ± 49,45	11,74	0,32 ± 0,11	0,26	0,06 ± 0,04	0,02	1 ± 0,24	0,92		
	H	6	0,91 ± 0,31		0,81	32,11 ± 7,53	30,49	7,97 ± 3,56	5,77	0,38 ± 0,09	0,42	7,29 ± 2,6	5,08	34,72 ± 14,37	24,93	1,24 ± 1,08	0,17	0,13 ± 0,09	0,04	1,94 ± 0,64	1,53		
ARR	M	6	2,11 ± 0,8		2,14	3,32 ± 0,93	2,83	0,38 ± 0,1	0,34	0,02 ± 0,01	0,01	1,95 ± 0,77	1,44	1,66 ± 0,36	1,73	0,06 ± 0,03	0,04	0,04 ± 0,01	0,03	0,22 ± 0,1	0,1		
	B	5	4,42 ± 3,38		0,83	3,61 ± 1,35	4,93	2,26 ± 1,59	0,54	0,003 ± 0	0,002	1,27 ± 0,42	0,82	0,71 ± 0,53	0,24	0,04 ± 0	0,04	0,09 ± 0,05	0,03	0,84 ± 0,64	0,3		
	H	5	1,83 ± 0,71		1,79	3,87 ± 1,17	4,67	2,89 ± 1,84	0,38	0,1 ± 0,09	0,006	1,84 ± 0,76	1,12	5,88 ± 1,92	4,66	0,11 ± 0,07	0,03	0,24 ± 0,13	0,02	0,19 ± 0,16	0,03		
ARR	M	6	0,18 ± 0,13		0,06	4,64 ± 1,13	4,8	1,54 ± 1,02	0,61	0,02 ± 0,01	0,002	3,29 ± 1,23	2,96	3,54 ± 1,6	1,66	0,02 ± 0	0,014	0,01 ± 0	0,01	1,88 ± 1,23	0,69		
	B	6	0,45 ± 0,3		0,22	20,91 ± 8,68	11,91	1,4 ± 0,97	0,44	0,02 ± 0,02	0,003	5,46 ± 3,8	1,65	10,4 ± 4,6	8,37	0,02 ± 0	0,02	0,02 ± 0	0,02	0,09 ± 0,03	0,07		
	H	6	0,6 ± 0,17	0,66	18,89 ± 6,46	17,88	2,31 ± 0,76	1,67	0,01 ± 0	0,01	9,4 ± 5,29	4,42	12,04 ± 3,79	13,19	0,29 ± 0,24	0,05	0,08 ± 0,03	0,05	1,13 ± 0,67	0,32			

Fonte: Autoria própria.

Para os organismos coletados nas praias, além dos níveis de metais, foram avaliados os níveis de dois biomarcadores de efeito (proteínas carboniladas – PCO somente para *Ocypode quadrata*, e lipoperoxidação - LPO) e um de exposição (metalotioneína - MT) nos diversos pontos que perfazem o monitoramento das praias. Os resultados são apresentados nas tabelas abaixo (Tabela 35 e Tabela 36).

Tabela 35: Resultados da análise dos biomarcadores (lipoperoxidação, e metalotioneína) em anfípodas, no isópode *Exciorolana* sp. e em poliquetas. Os resultados são expressos como média  $\pm$  EP e mediana.

Organismo	Ponto	N	LPO		N	MT	
			Média $\pm$ EP	Mediana		Média $\pm$ EP	Mediana
<i>Exciorolana</i> sp.	DNG	4	3,72 $\pm$ 1,31	3,46	4	14,15 $\pm$ 3,93	10,76
<i>Exciorolana</i> sp.	DNU	4	2,8 $\pm$ 0,82	2,68	4	16,52 $\pm$ 4,14	15,11
<i>Exciorolana</i> sp.	DNPI	3	3,8 $\pm$ 0,7	3,89	4	9,9 $\pm$ 1,56	6,94
<i>Exciorolana</i> sp.	DNC	5	2,36 $\pm$ 0,39	2,28	5	5,57 $\pm$ 1,09	4,72
<i>Exciorolana</i> sp.	DNP	4	3,02 $\pm$ 0,32	3,19	4	10,69 $\pm$ 0,84	10,66
<i>Exciorolana</i> sp.	DSR	4	1,79 $\pm$ 0,5	2,15	4	9,45 $\pm$ 0,37	9,14
<i>Exciorolana</i> sp.	DSC	3	0,69 $\pm$ 0,31	0,6	4	17,9 $\pm$ 8,84	11,68
<i>Exciorolana</i> sp.	ARP	3	2,44 $\pm$ 0,9	1,57	4	11,08 $\pm$ 0,79	10,73
<i>Exciorolana</i> sp.	ARR	3	2,85 $\pm$ 0,85	2	4	10,04 $\pm$ 1,41	9,7
anfípodo	DNG	4	3,15 $\pm$ 0,97	2,26	3	10,23 $\pm$ 0,81	10,5
anfípodo	DNU	3	3,99 $\pm$ 0,6	3,99	4	12,56 $\pm$ 1,59	11,98
anfípodo	DNPI	3	2,77 $\pm$ 0,46	2,77	4	6,64 $\pm$ 0,88	6,43
anfípodo	DNC	4	2,15 $\pm$ 0,45	1,89	4	13,69 $\pm$ 4,51	14,6
anfípodo	DNP	4	1,53 $\pm$ 0,42	1,47	3	6,8 $\pm$ 1,72	7,79
anfípodo	DSR	3	0,86 $\pm$ 0,09	0,86	4	14,31 $\pm$ 5,2	12,04
anfípodo	DSC	5	4,45 $\pm$ 1,47	2,91	4	15,26 $\pm$ 2,64	16,76
anfípodo	ARP	4	3,87 $\pm$ 0,69	3,85	3	13 $\pm$ 2,18	13,28
anfípodo	ARR	4	3,34 $\pm$ 1,65	2,08	4	25,6 $\pm$ 4,54	26,42
poliqueto	DNU	3	29,56 $\pm$ 6,18	32,47	3	6,25 $\pm$ 1,91	6,33
poliqueto	DNPI	3	15,33 $\pm$ 2,39	15,25	4	5,54 $\pm$ 1,57	4,9
poliqueto	DNC	5	16,77 $\pm$ 4,94	14,52	5	14,88 $\pm$ 4,22	15,67
poliqueto	DNP	5	49,25 $\pm$ 12,72	47,04	3	26,18 $\pm$ 8,45	21,15
poliqueto	DSC	5	25,34 $\pm$ 10,91	21,35	5	4,95 $\pm$ 2,33	2,95
poliqueto	ARP	4	39,32 $\pm$ 14,25	30,33	5	21,63 $\pm$ 6,9	18,56
poliqueto	ARR	4	31,16 $\pm$ 15,14	20,9	4	23,79 $\pm$ 7,78	21,53

Fonte: Autoria própria.

Tabela 36: Resultados da análise dos biomarcadores (lipoperoxidação, metalotioneína e proteínas carboniladas) em brânquias (B), hepatopâncreas (H) e músculo (M) de *Ocypode quadrata*. Os resultados são expressos como média  $\pm$  EP e mediana. NA = não se aplica (dosagem não prevista no TR4). NR = dosagem não realizada.

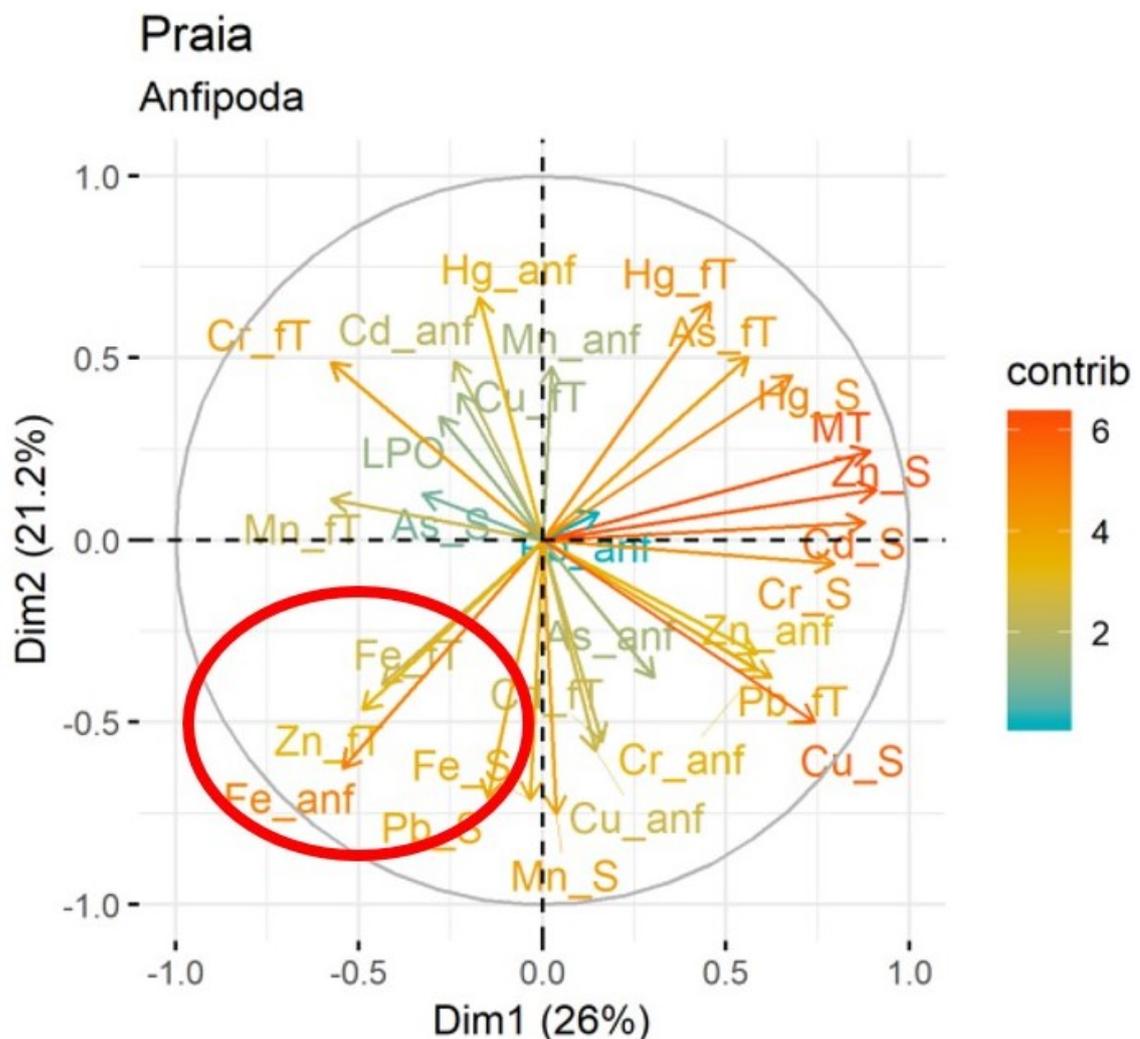
Organismo	Ponto	Tecido	N	LPO (nmol MDA/mg ptna)		N	MT ( $\mu$ g MT/mg ptna)		N	PCO (nmol PC/mg ptna)	
				Média $\pm$ EP	Mediana		Média $\pm$ EP	Mediana		Média $\pm$ EP	Mediana
<i>Ocypode quadrata</i>	DNG	M	-	NA	NA	-	NA	NA	6	0,63 $\pm$ 0,17	0,49
		B	6	1,43 $\pm$ 0,21	1,44	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	6	4,94 $\pm$ 0,66	4,75	6	44,87 $\pm$ 8,87	45,95	-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	DNU	M	-	NA	NA	-	NA	NA	2	0,88 $\pm$ 0,01	0,88
		B	2	0,81 $\pm$ 0,07	0,81	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	6	6,95 $\pm$ 1,67	6,99	4	25,67 $\pm$ 4,64	25,61	-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	DNPI	M	-	NA	NA	-	NA	NA	4	1,81 $\pm$ 0,97	0,95
		B	6	1,65 $\pm$ 0,31	1,39	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	6	9,85 $\pm$ 2,93	8,16	6	44,14 $\pm$ 11,44	27,07	-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	DNC	M	-	NA	NA	-	NA	NA	5	2,35 $\pm$ 0,5	2,07
		B	3	1,9 $\pm$ 0,1	1,97	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	4	14,42 $\pm$ 3,68	14,61	3	20,49 $\pm$ 4,51	19,44	-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	DNP	M	-	NA	NA	-	NA	NA	4	0,82 $\pm$ 0,06	0,83
		B	4	1,03 $\pm$ 0,11	0,98	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	6	4,43 $\pm$ 0,9	3,37	5	22,74 $\pm$ 7,4	21,1	-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	DSR	M	-	NA	NA	-	NA	NA	2	1,1 $\pm$ 0,47	1,1
		B	4	1,04 $\pm$ 0,18	1,08	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	4	3,24 $\pm$ 0,38	3,49	3	22,67 $\pm$ 12,28	17,96	-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	DSC	M	-	NA	NA	-	NA	NA	5	1,76 $\pm$ 0,51	1,4
		B	6	1,7 $\pm$ 0,12	1,66	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	5	10,86 $\pm$ 2,35	10,88	5	138,92 $\pm$ 53,01	152,92	-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	ARP	M	-	NA	NA	-	NA	NA	-	NR	NR
		B	5	1,73 $\pm$ 0,85	0,98	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	6	9,35 $\pm$ 3,36	5,84	1	39,25		-	NA	NA
<i>Ocypode quadrata</i>	ARR	M	-	NA	NA	-	NA	NA	6	1,06 $\pm$ 0,24	0,98
		B	6	1,12 $\pm$ 0,16	1,11	-	NA	NA	-	NA	NA
		H	4	3,5 $\pm$ 0,63	3,05	3	86,93 $\pm$ 26,74	111,12	-	NA	NA

Fonte: Autoria própria.

Para avaliar possíveis correlações entre os níveis de metais nos organismos, no ambiente e os biomarcadores, foi realizada uma estatística multivariada, através da análise de componentes principais (PCA). Os níveis de todos os metais e os níveis de todos os biomarcadores nos diferentes organismos/tecidos analisados foram correlacionados. Os resultados serão apresentados por organismo analisado. A partir desta análise, podemos observar que existem correlações positivas entre metais e biomarcadores como observado nas setas em vermelho e cor de laranja (Figura 90).

Dentre os organismos analisados nas praias, nos anfípodos encontramos diversas correlações, como a concentração de Fe nos organismos, os níveis de Fe e Zn na água e de Fe no sedimento.

Figura 90: Representação gráfica da PCA realizada para os anfípodos. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1).



Quando é feita uma avaliação visual do agrupamento dos pontos de amostragem, em função das variáveis analisadas, podemos observar diferenças entre os pontos (Figura 91). Essas diferenças entre os pontos são encontradas para todos os organismos analisados e, estão, provavelmente, associadas às características ambientais, especialmente características morfodinâmicas (tamanho de partícula de sedimento, conteúdo de matéria orgânica e índice de praia). E, no caso dos anfípodos o ponto ARP

(Aracruz Padres) é o que apresenta os maiores níveis de Fe no sedimento (Figura 92) e, também, os anfípodos desse ambiente são os que apresentam os maiores níveis de Fe (Figura 93). Dessa forma, é necessário levar em conta que o ponto ARP (Aracruz Padres) faz parte da APA Costa das Algas.

Figura 91: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento praiial.

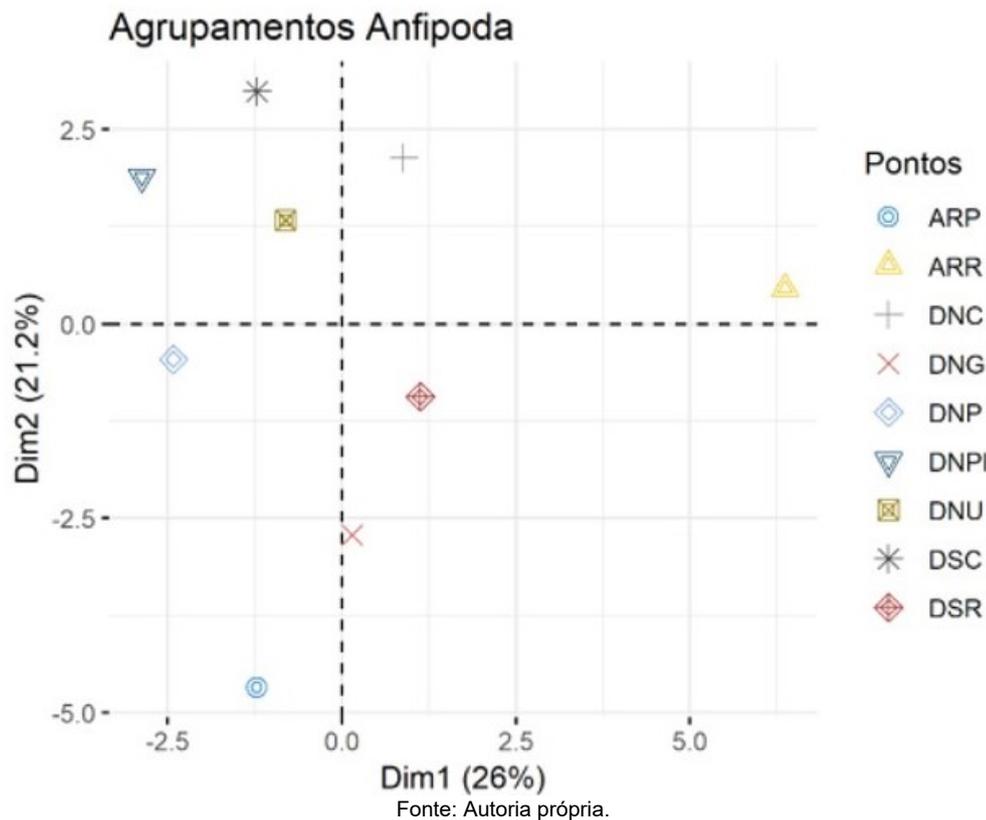


Figura 92: Valores de Fe (mg/kg) no sedimento nos diferentes pontos de coleta. Os dados são apresentados como média  $\pm$  erro padrão.

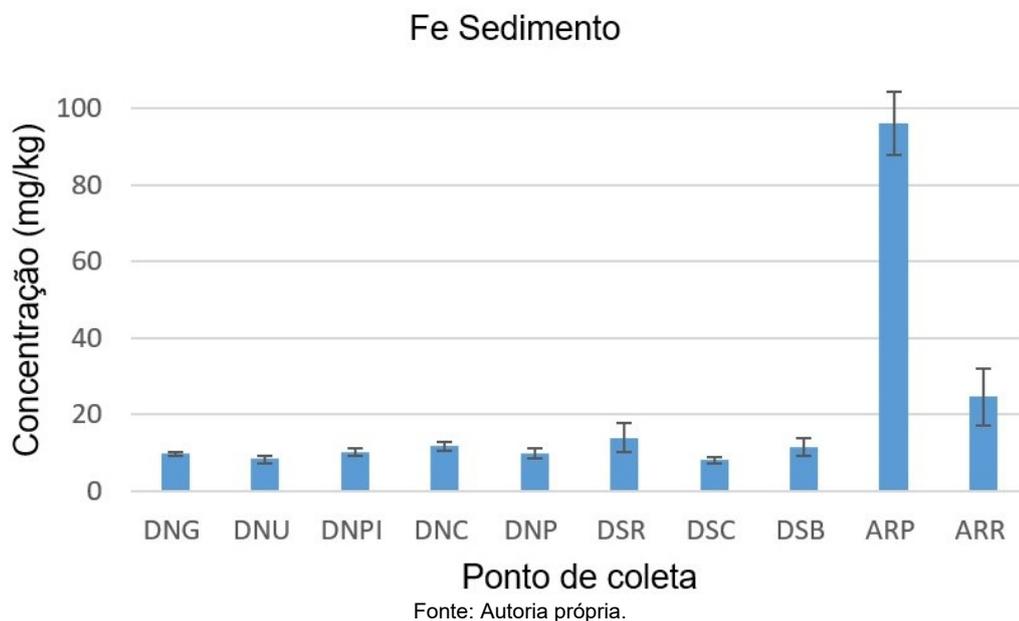
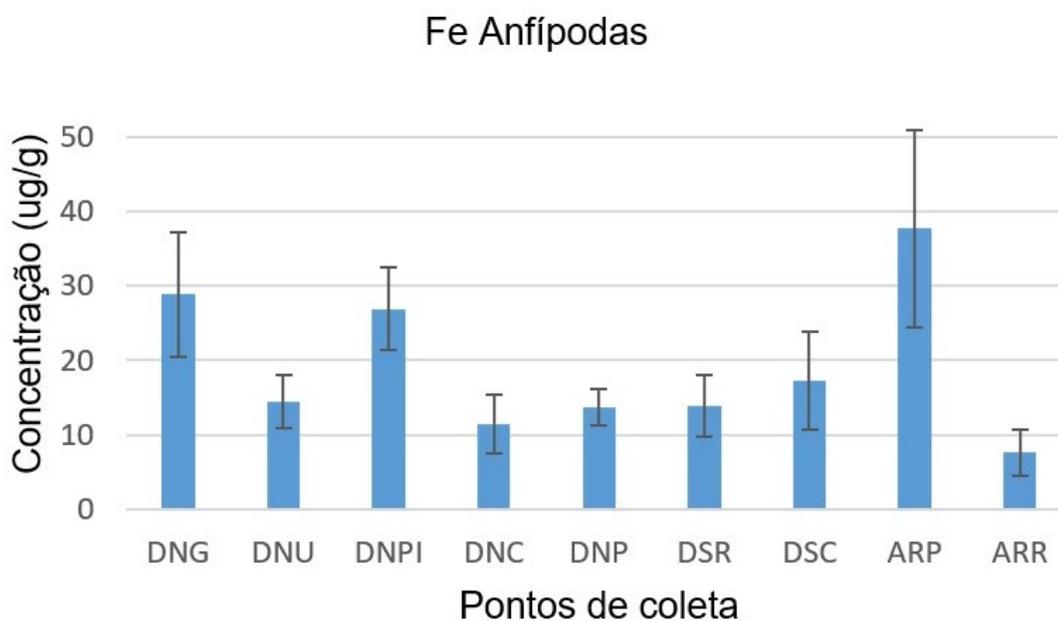


Figura 93: Valores de Fe ( $\mu\text{g/g}$ ) nos anfípodos nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

Anfípodos bentônicos são os organismos-teste mais utilizados em ensaios ecotoxicológicos para avaliar a contaminação do sedimento. Embora os níveis de metais no sedimento dos diferentes pontos amostrados não estejam acima da legislação, com base nesses resultados podemos concluir que esses indivíduos estão bioacumulando ferro a partir do ambiente. Alguns invertebrados costeiros expostos a metais potencialmente tóxicos biodisponíveis estão sob pressão seletiva para desenvolver adaptações fisiológicas para uma maior tolerância aos metais (Raibow et al., 1999). Klerks e Weis (1987) conseguiram concluir que muitas populações de organismos aquáticos que vivem em áreas poluídas com metais pesados têm um aumento na resistência aos seus efeitos tóxicos.

Em vista da falta de dados pretéritos ao rompimento da barragem para comparações com os dados do ecossistema praial, foram realizadas comparações com os níveis de metais encontrados na literatura. Em trabalhos realizados com o anfípodo *Talitrus saltator* em locais contaminados na Itália (Ugolini et al., 2004) e na Polônia (Rainbow et al., 1998; Fialkowski et al., 2000), os níveis de ferro encontrados nos organismos estão acima dos dados encontrados no presente monitoramento (Quadro 23).

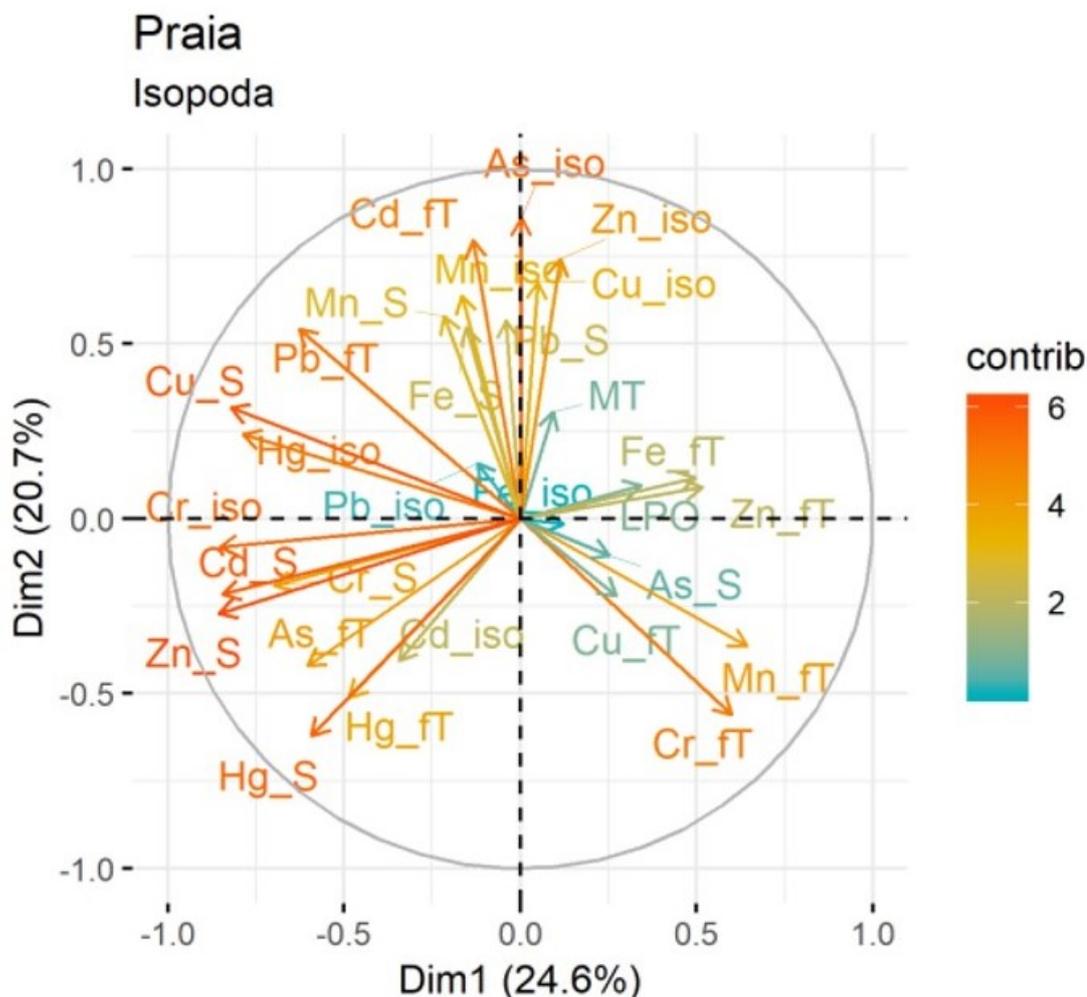
Quadro 23: Valores de mínimo e máximo (Min - Max) do Fe analisado em anfípodos nos diferentes pontos de coleta do monitoramento praial. Também são mostrados os dados de Min e Max da literatura para ambientes considerados contaminados para simples comparação. Os resultados são expressos em  $\mu\text{g/g}$  de peso úmido.

Espécie	Fe ( $\mu\text{g/g}$ ) Min - Máx
Anfípodo	0,63 – 77,35
<i>T. saltator</i> (Ugolini et al., 2004)	23,15 – 115,02
<i>T. saltator</i> (Rainbow et al., 1998)	34,29 – 104,79
<i>T. saltator</i> (Fialkowski et al., 2000)	29,18 – 118

Fonte: Autoria própria.

Na PCA realizada para os isópodos *Excirrolana sp.*, a principal correlação encontrada é entre os níveis de Fe nos organismos e LPO, além dos níveis de Cr, Hg, Cd e Zn no sedimento (Figura 94).

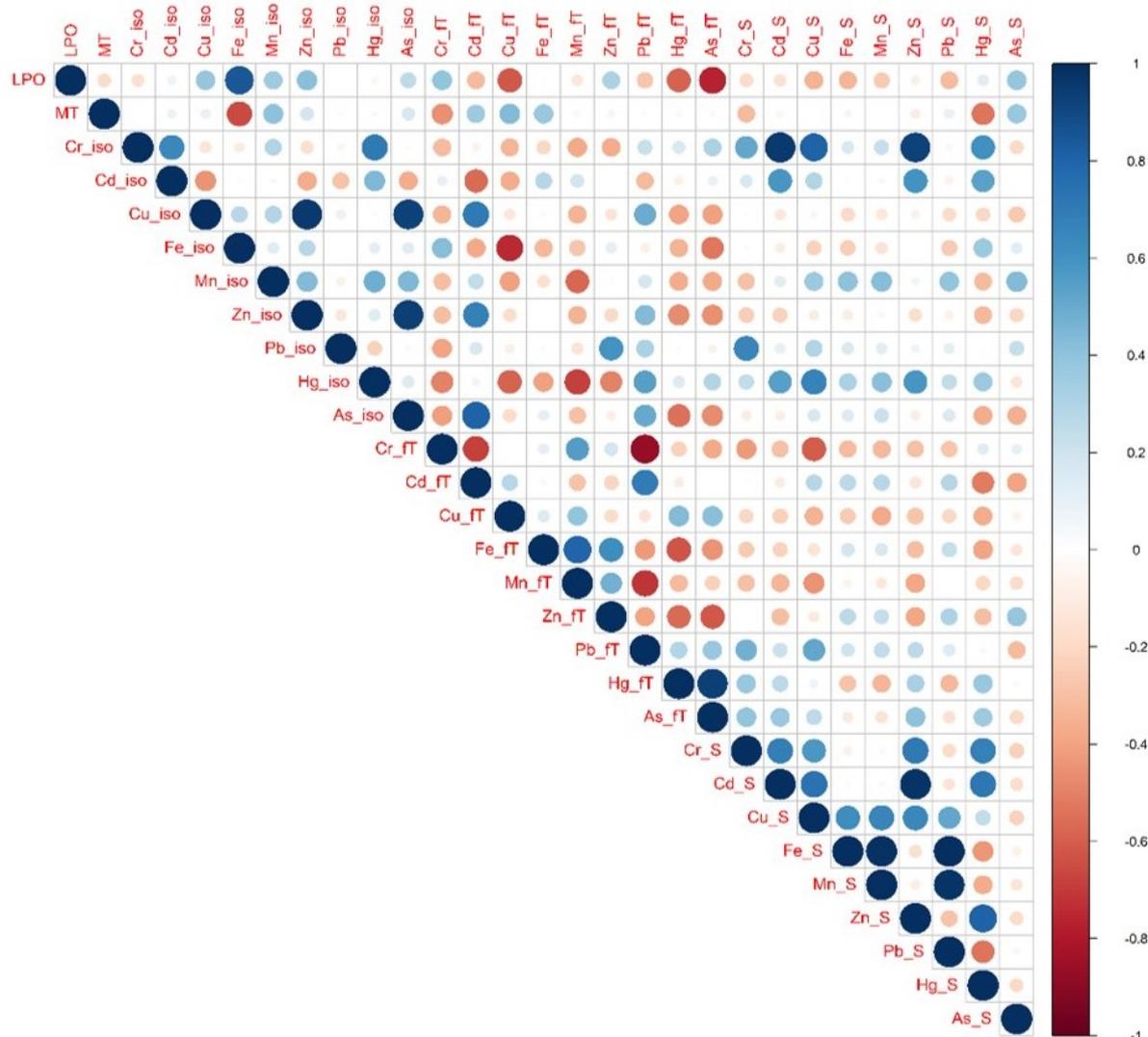
Figura 94: Representação gráfica da PCA realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1).



Fonte: Autoria própria.

Algumas correlações se tornam mais claras através de uma comparação par a par (Pearson) (Figura 95). Nessa figura, podemos ver claramente a correlação entre os níveis de Fe no organismo e LPO. Assim como os níveis de Cr, Cd, Zn e Hg no sedimento.

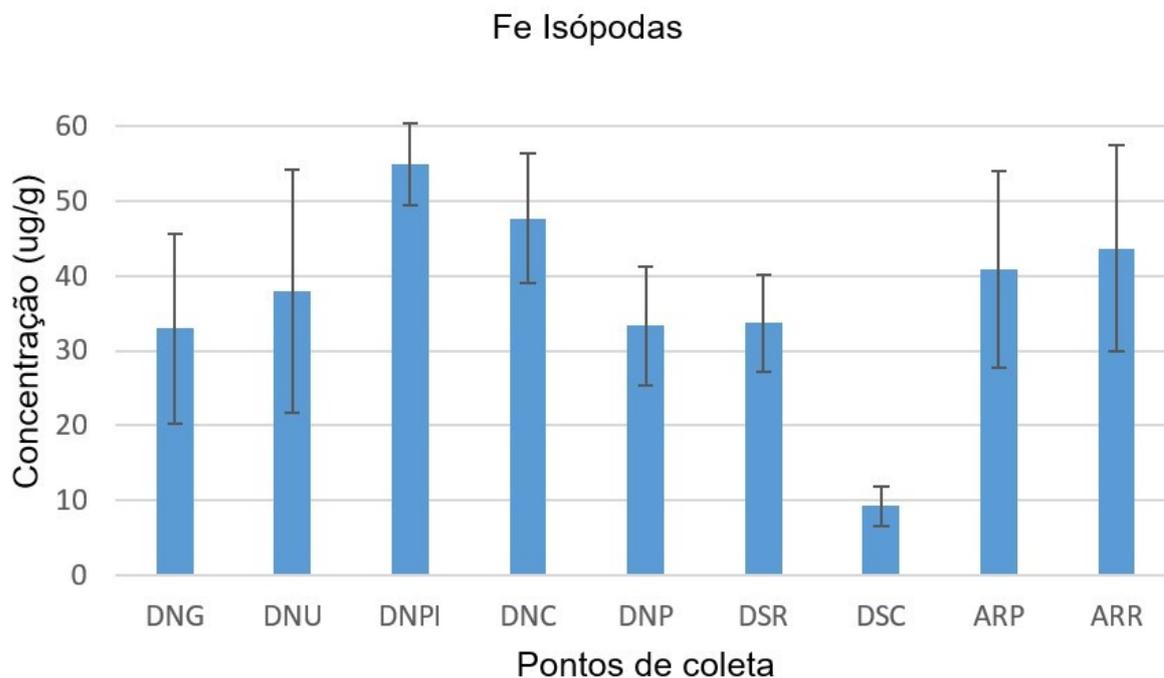
Figura 95: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas.



Fonte: Autoria própria.

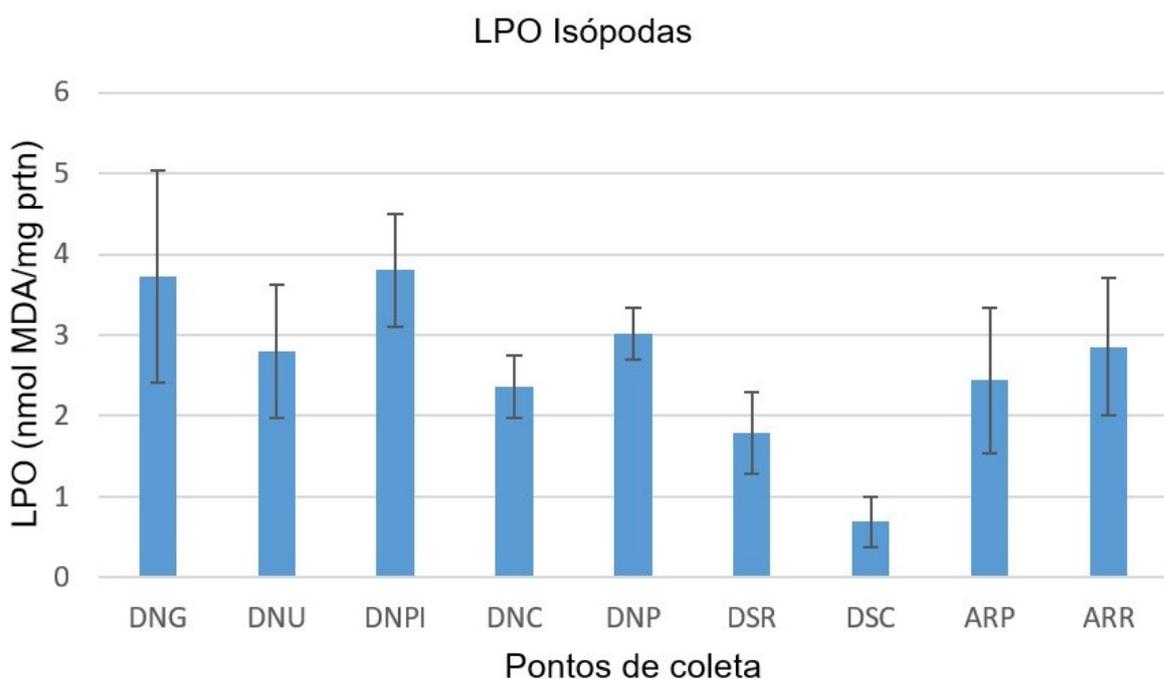
Quando analisamos as correlações encontradas por ponto de coleta, podemos ver que os isópodas que apresentam maiores níveis de Fe e de LPO são do ponto DNPI (Pontal do Ipiranga) (Figura 96 e Figura 97). O mesmo padrão de variação entre os pontos é mantido para as duas variáveis, inclusive os menores níveis de ambos encontrados em DSC (Comboios), exceto para DNC (Vila de Cacimbas) onde a lipoperoxidação não acompanha os níveis de ferro nos organismos.

Figura 96: Valores da concentração de Fe ( $\mu\text{g/g}$ ) nos isópodas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 97: Valores de LPO (nmol MDA/mg proteína) nos isópodas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

Com base nos resultados encontrados para o isópoda *Excirolana* sp. podemos concluir que os níveis de Fe encontrados no organismo são suficientes para causar dano oxidativo no organismo, visto a correlação positiva com a lipoperoxidação. Mesmo o Fe sendo importante em diversos processos fisiológicos, altos níveis deste metal nos organismos podem conduzir a um aumento na geração de dano oxidativo, principalmente lipoperoxidação (LPO) (Sies, 1991; Halliwell, 2009). Esse metal, que é encontrado na água e nos tecidos em alta quantidade, está facilitando a transformação do ânion superóxido ( $O_2^{\bullet-}$ ) e do peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), altamente reativos, a propósito de induzir o início da peroxidação lipídica. Dessa forma, como observamos correlação entre o Fe e a LPO e o mecanismo bioquímico que relaciona a causa e o efeito destes dois constituintes estar bem fundamentada na literatura, sugerimos que danos oxidativos (LPO) ocorreram em função da bioacumulação de Fe.

Na PCA realizada para os poliquetas (Figura 98) as correlações mais interessantes encontradas foram: MT e Cr nos poliquetas, LPO e as concentrações de Mn, As e Hg no organismo, além dos metais Cd, Cr, Zn e Hg no sedimento. Tais correlações se tornam mais claras quando é realizada uma comparação par a par (Pearson) (Figura 99).

Figura 98: Representação gráfica da PCA realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1).

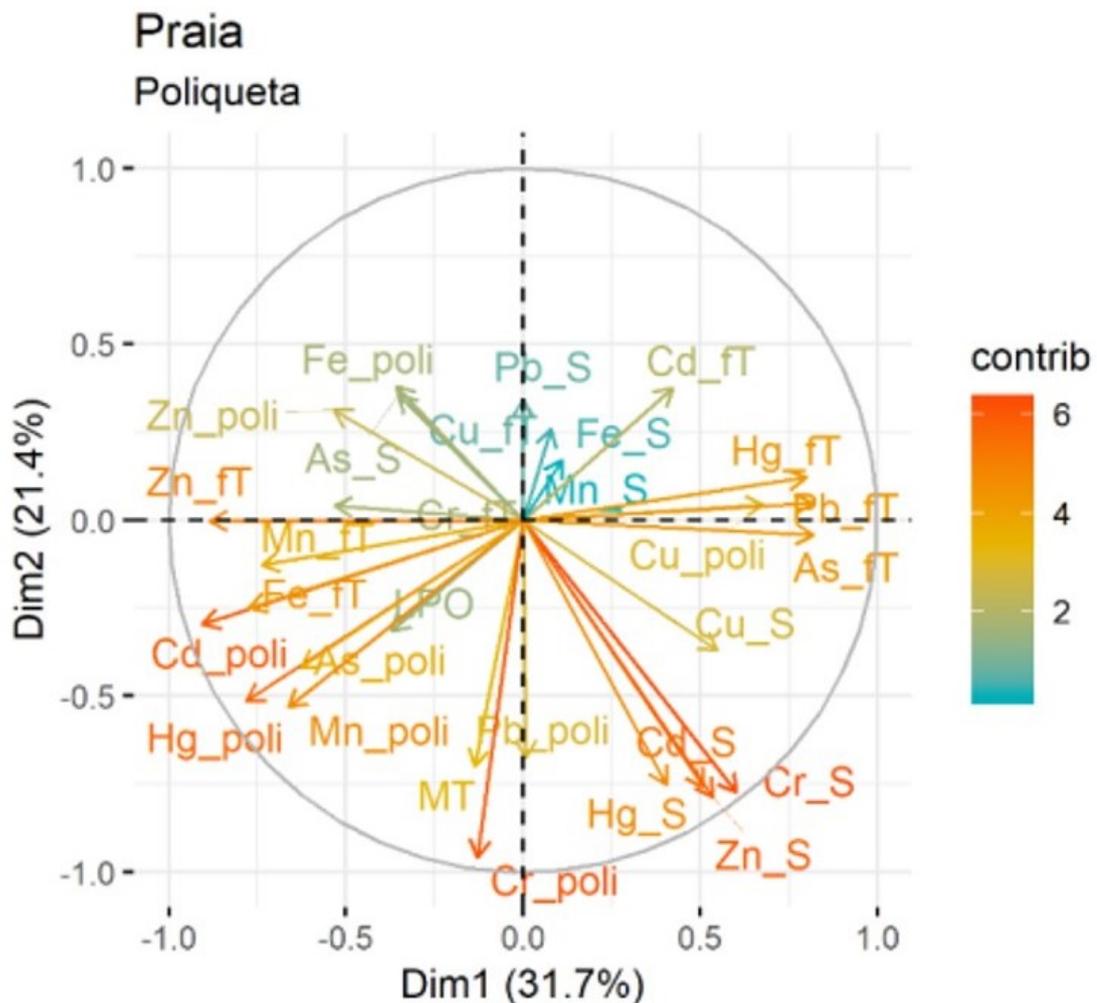
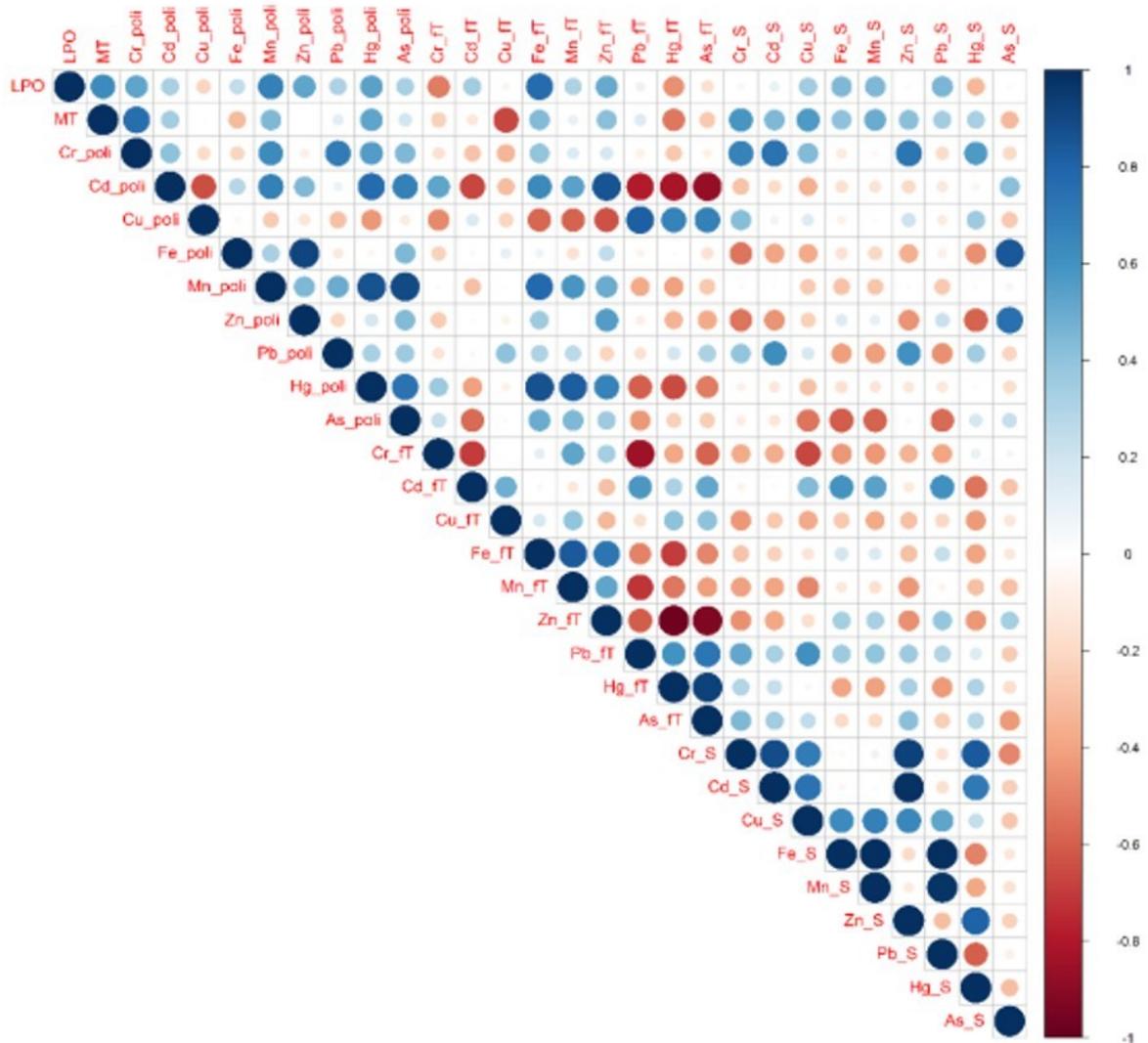


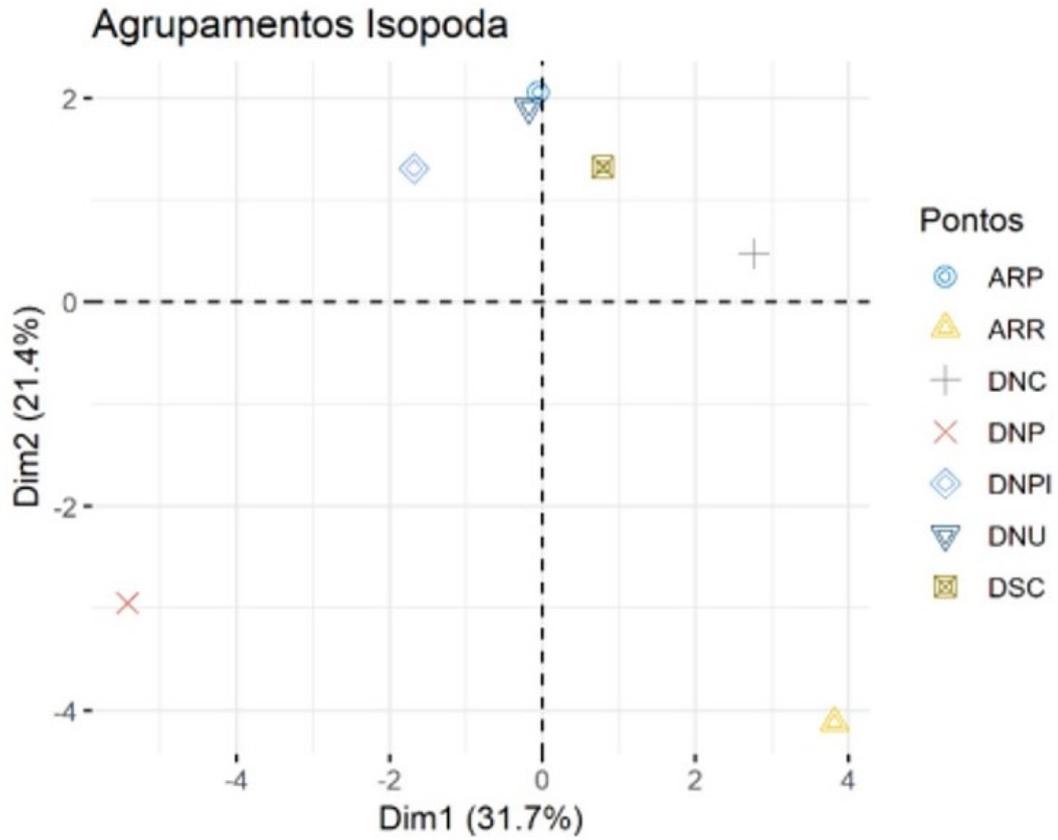
Figura 99: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas.



Fonte: Autoria própria.

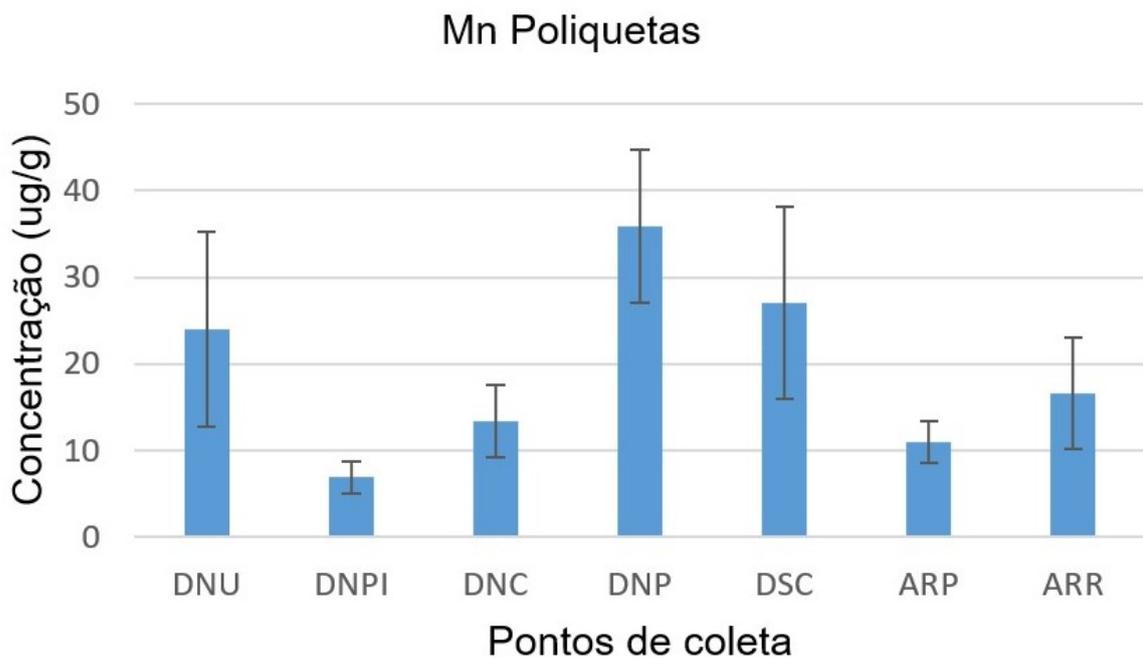
Da mesma forma que para os demais organismos, ocorre diferenças entre os pontos amostrais (Figura 100), e os poliquetas coletados em DNP (Povoação) apresentam os maiores níveis de Mn (Figura 101), Hg (Figura 102) e Cr (Figura 103), além dos maiores níveis de LPO (Figura 104) e MT (Figura 105), em relação aos demais pontos.

Figura 100: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento praial.



Fonte: Autoria própria.

Figura 101: Valores da concentração de Mn ( $\mu\text{g/g}$ ) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.



Fonte: Autoria própria.

Figura 102: Valores da concentração de Hg ( $\mu\text{g/g}$ ) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.

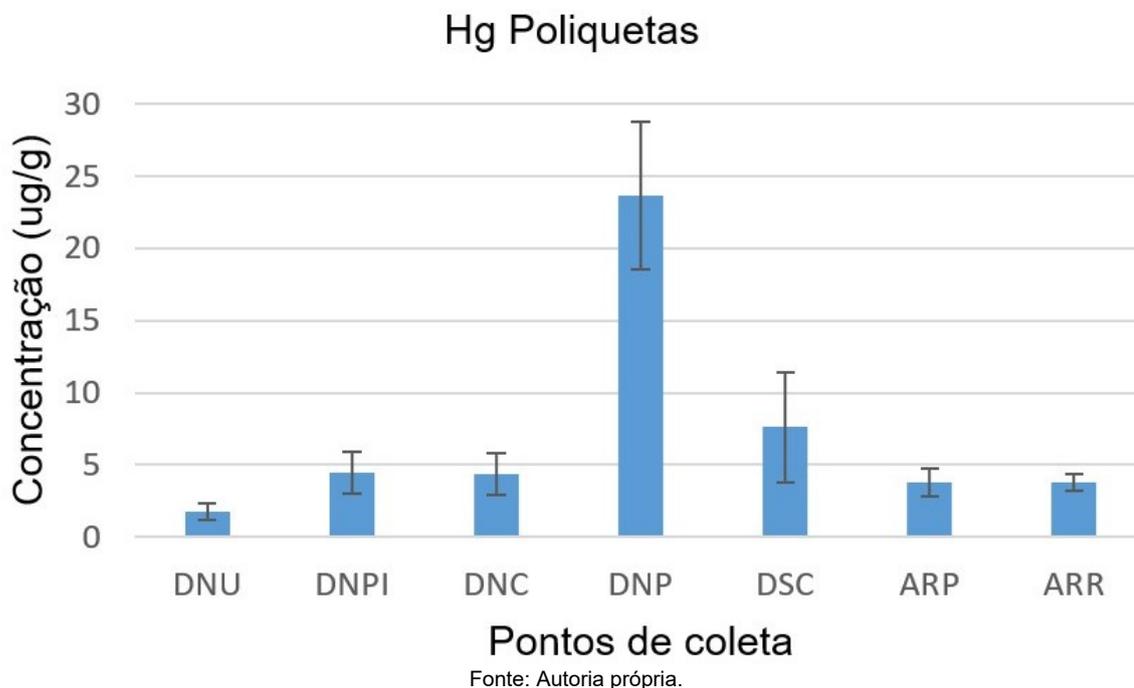


Figura 103: Valores da concentração de Cr ( $\mu\text{g/g}$ ) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.

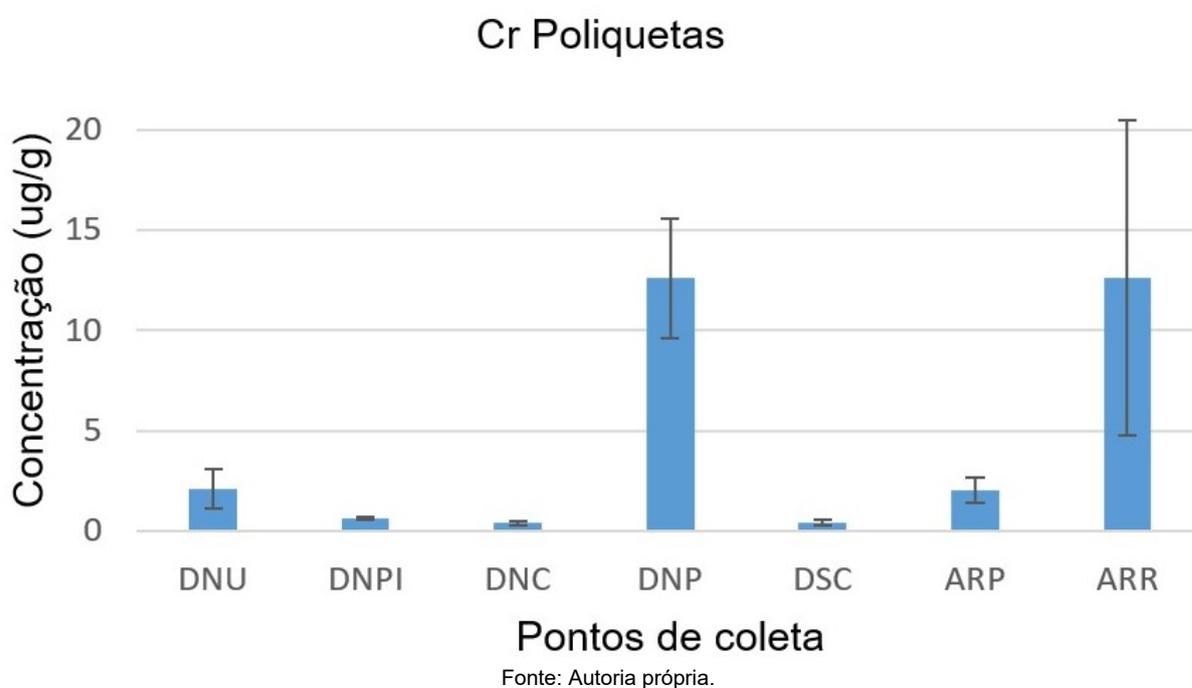


Figura 104: Valores de LPO (nmol MDA/mg proteína) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média ± erro padrão.

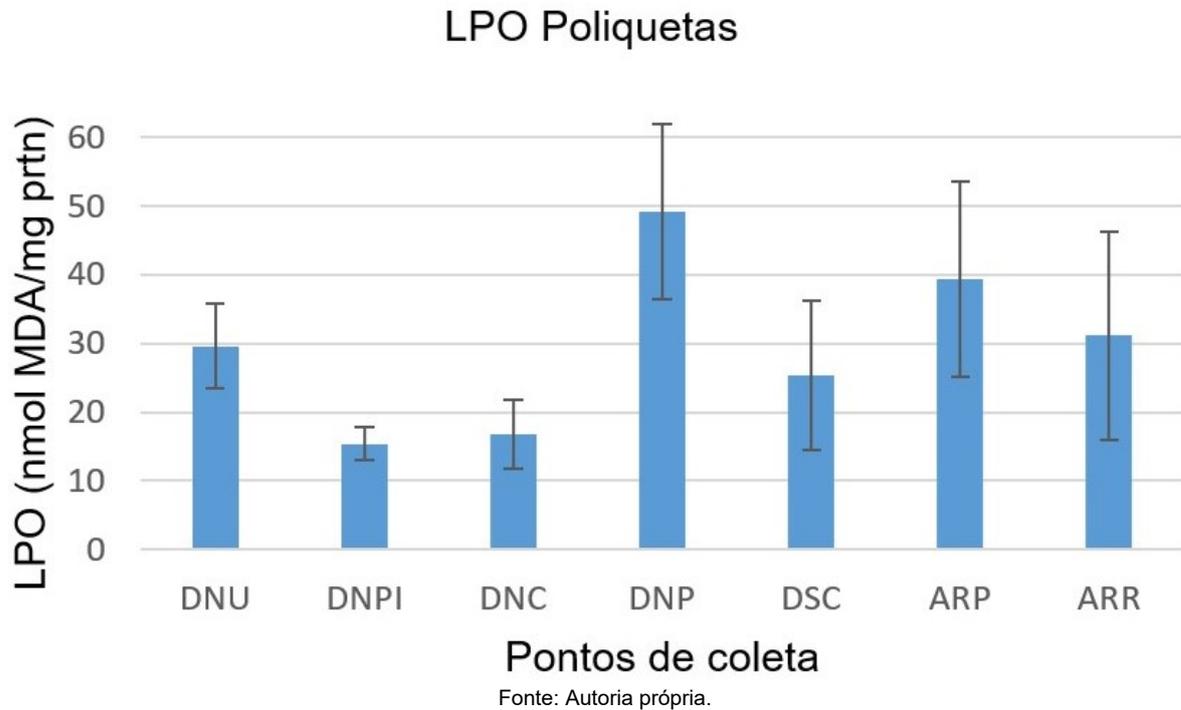
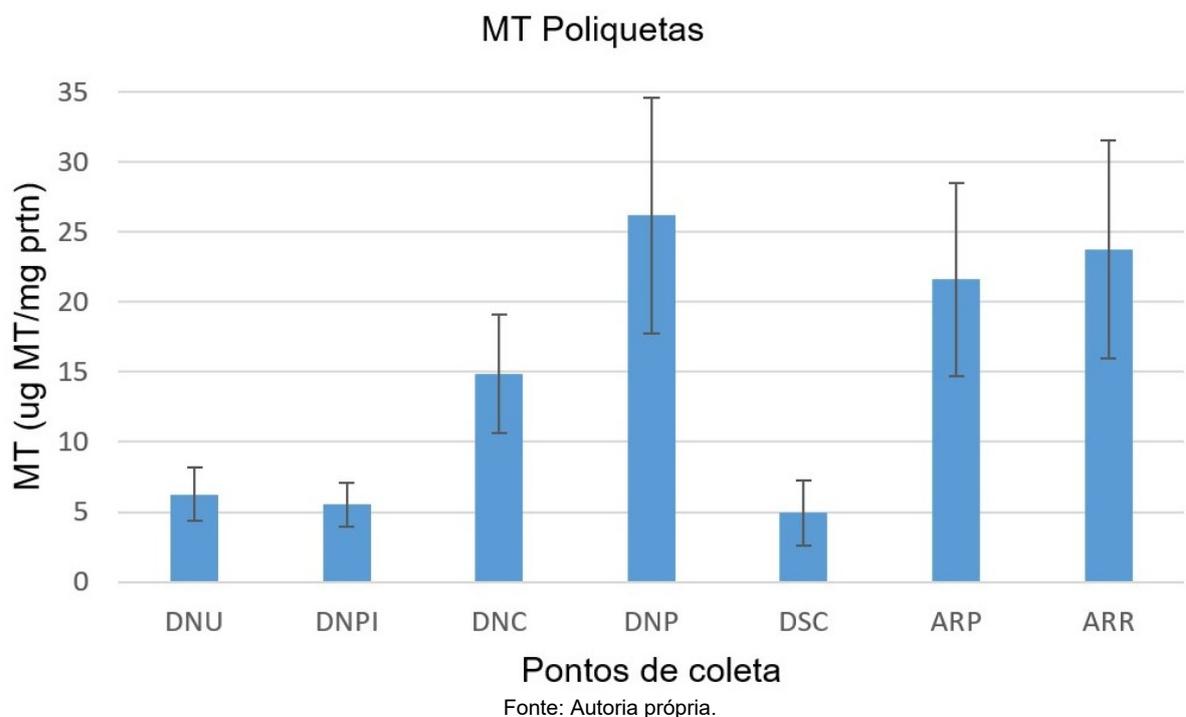


Figura 105: Valores de MT (µg MT/mg proteína) nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média ± erro padrão.



Tendo como base os resultados encontrados, podemos concluir que os níveis de Mn, Hg e Cr encontrados no organismo são suficientes para causar dano oxidativo, levando em consideração a correlação positiva com LPO. Fazendo um comparativo com a literatura existente para dois ambientes

diferentes (controle e contaminado) (Said et al., 2017), podemos perceber que os níveis de Mn encontrados nos poliquetas analisados são realmente altos (Quadro 24). Além disso, em relação aos valores médios do ambiente contaminado (Porto de Pesca), não só a concentração média de Mn encontrada no presente estudo se encontra acima, mas também Cu, Cd e Pb para alguns pontos. Inclusive, os valores médios da concentração de Cd mais altos são encontrados em DNP (Povoação).

Quadro 24: Valores médios da concentração de alguns metais analisados nos poliquetas nos diferentes pontos de coleta do monitoramento praial. Também são mostrados os dados médios da concentração de metais obtidos da literatura (Said et al., 2017) para simples comparação. Os resultados são expressos em  $\mu\text{g/g}$  de peso úmido.

Espécie		Mn ( $\mu\text{g/g}$ )	Cu ( $\mu\text{g/g}$ )	Cd ( $\mu\text{g/g}$ )	Pb ( $\mu\text{g/g}$ )
Poliqueta	DNU	23,97	25,33	0,81	0,61
	DNPI	6,88	3,43	0,79	0,3
	DNC	13,39	53,69	0,44	0,11
	DNP	35,91	8,34	2,98	1,22
	DSC	26,99	13,31	0,25	1,75
	ARP	10,95	23,44	1,07	0,22
	ARR	16,58	19,28	0,46	1,15
<i>Nereis succinea</i>	Estação Ecológica	0,18	0,31	0,26	0,59
<i>Nereis succinea</i>	Porto de Pesca	0,87	0,95	0,85	0,78

Fonte: Autoria própria.

A partir da PCA feita para o caranguejo *Ocypode quadrata* podemos observar algumas correlações interessantes (Figura 106): LPO no hepatopâncreas com os níveis de Cu e Hg nesse tecido, assim como PCO no músculo com níveis de Hg. Tais correlações se tornam mais claras quando é realizada uma comparação par a par (Pearson) (Figura 107).

Figura 106: Representação gráfica da PCA realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1).

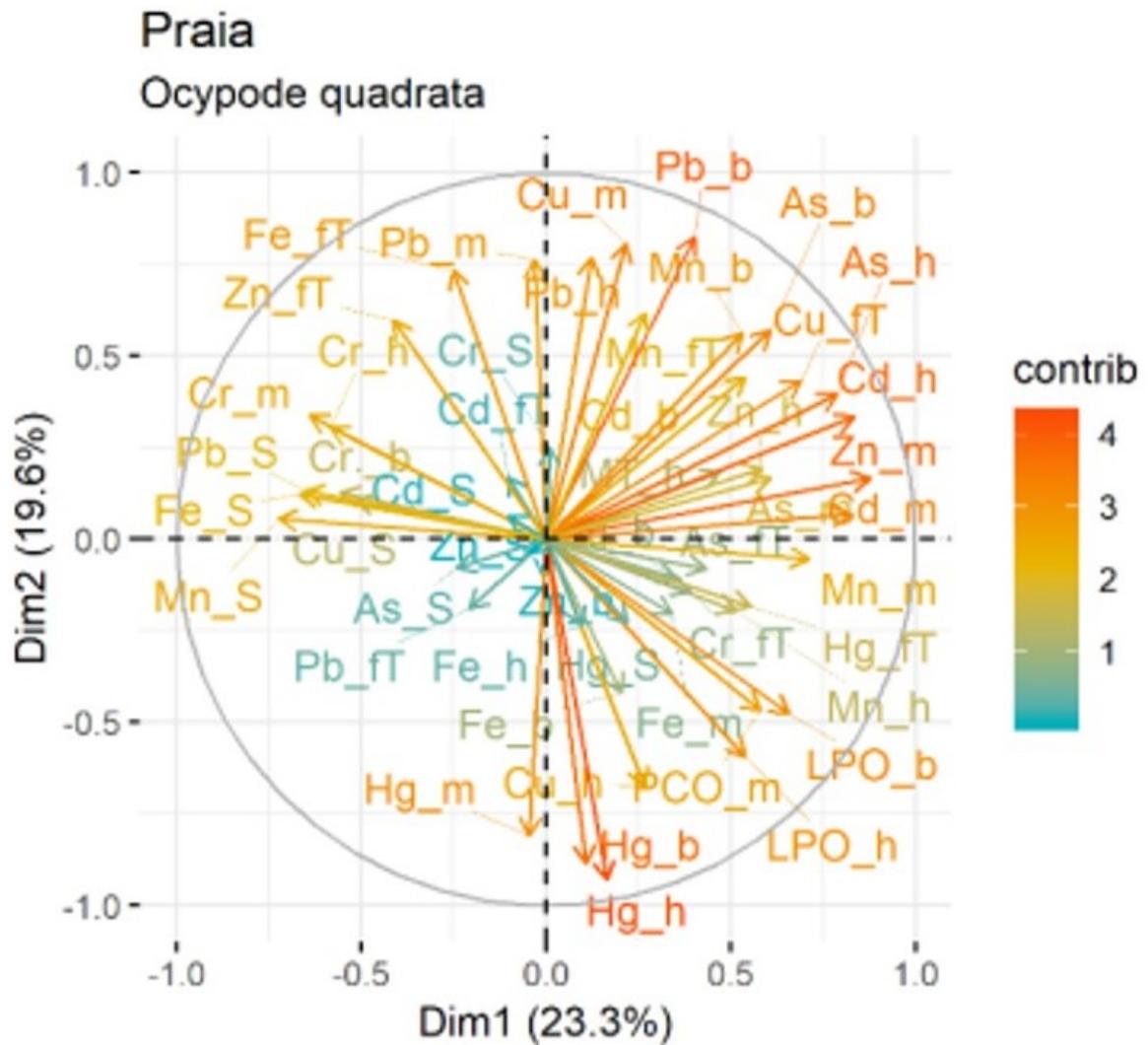
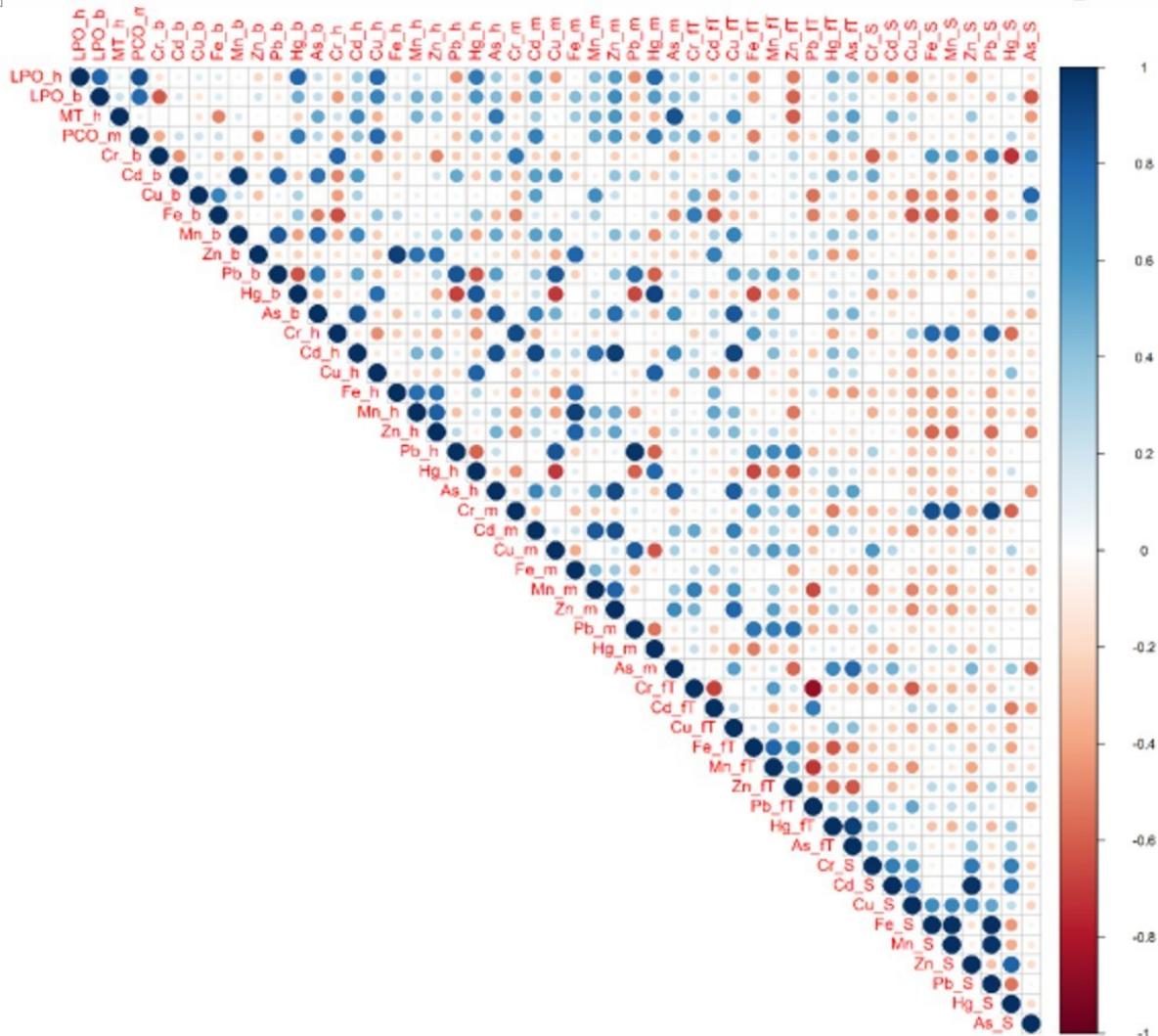


Figura 107: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas.



Fonte: Autoria própria.

Na avaliação visual do agrupamento dos pontos de amostragem em função das variáveis analisadas (Figura 108), percebemos claramente que DNC (Vila de Cacimbas) é onde estão agrupadas tais correlações. Corroborando com essa avaliação, os caranguejos coletados nesse ponto apresentam os maiores níveis de LPO (Figura 109) e PCO (Figura 110), além de Cu no hepatopâncreas (Figura 111) e, Hg no hepatopâncreas (Figura 112) e no músculo (Figura 113). O ponto DNC (Vila de Cacimbas) está situado na Área de Relevante Interesse Ecológico de Degredo.

Figura 108: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento praial.

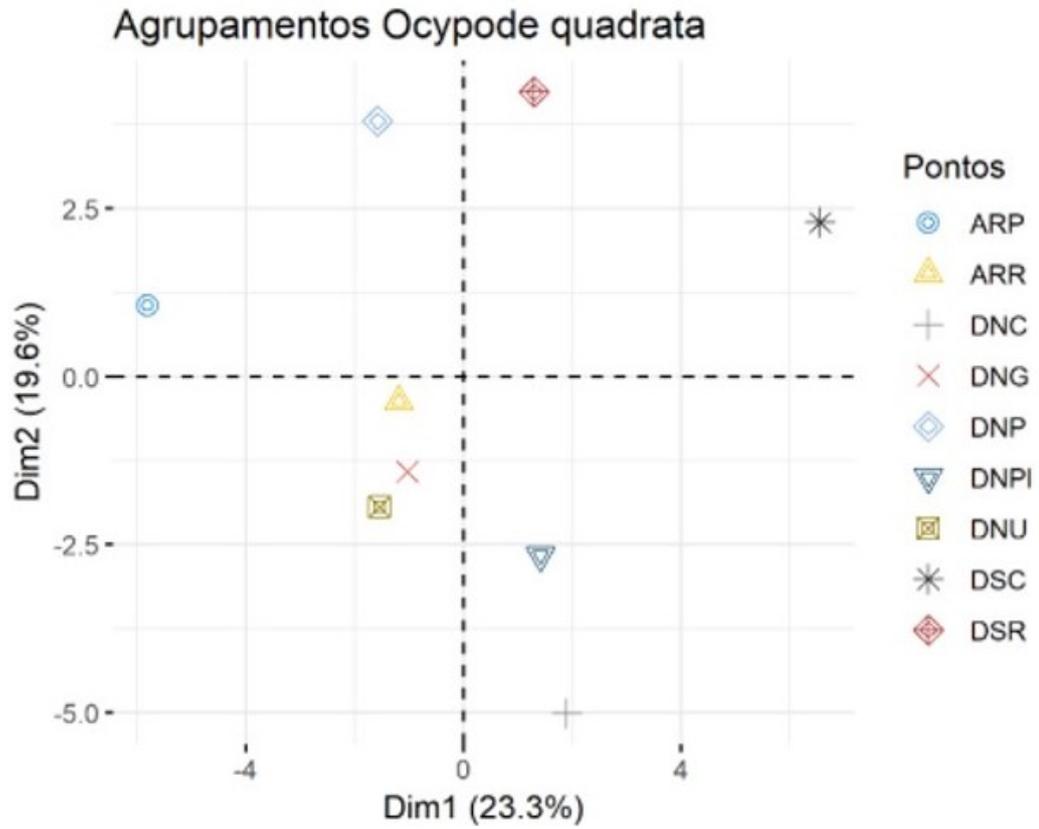


Figura 109: Valores de LPO (nmol MDA/mg proteína) no hepatopâncreas de *O. quadrata* nos diferentes pontos de coleta.

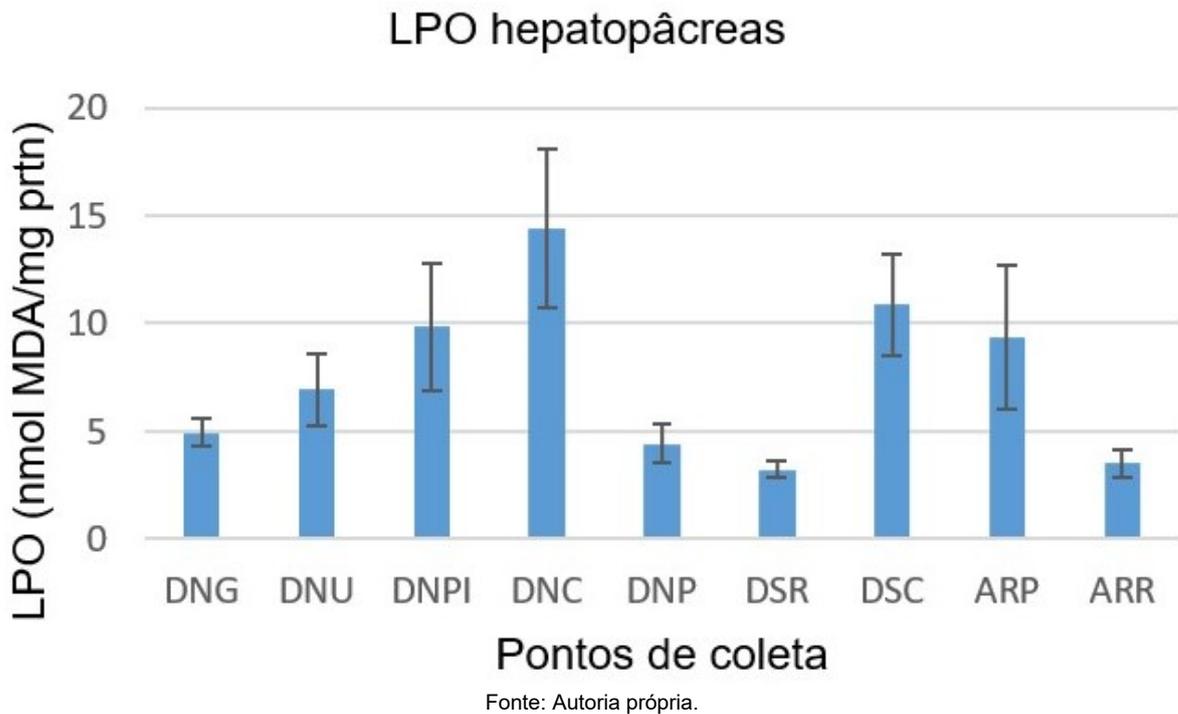


Figura 110: Valores de PCO (nmol PC/mg proteína) no músculo de *O. quadrata* nos diferentes pontos de coleta.

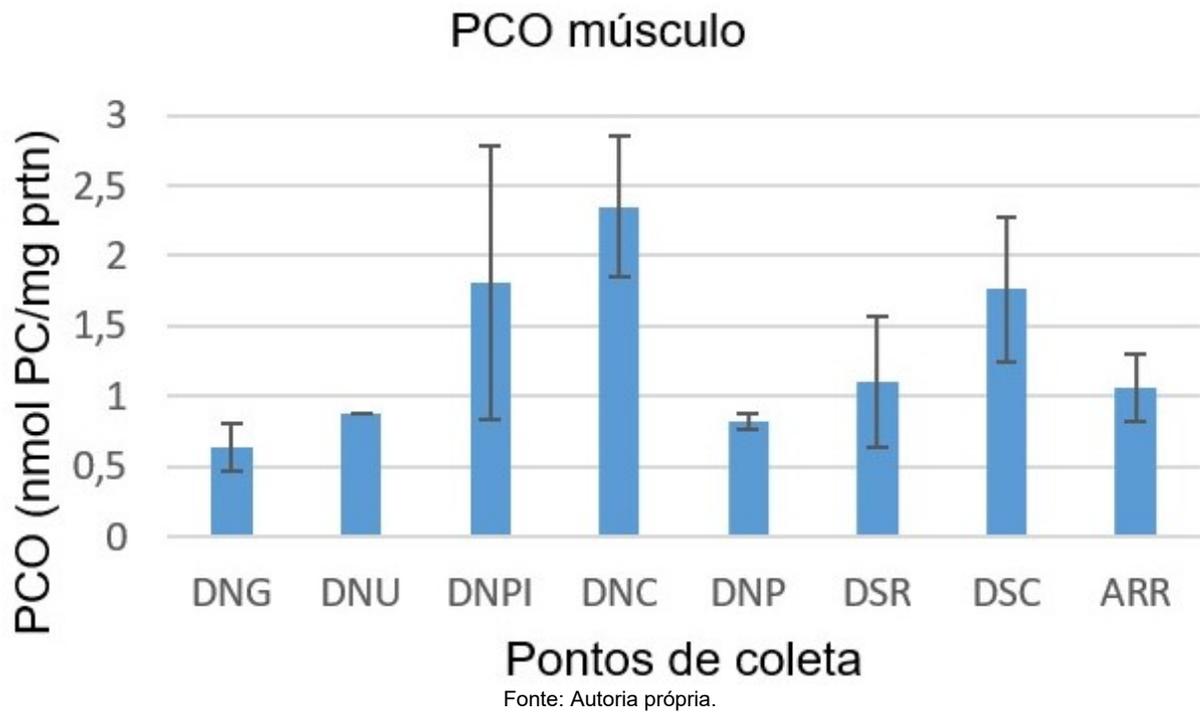


Figura 111: Valores da concentração de Cu ( $\mu\text{g/g}$ ) no hepatopâncreas de *Ocypode quadrata* nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.

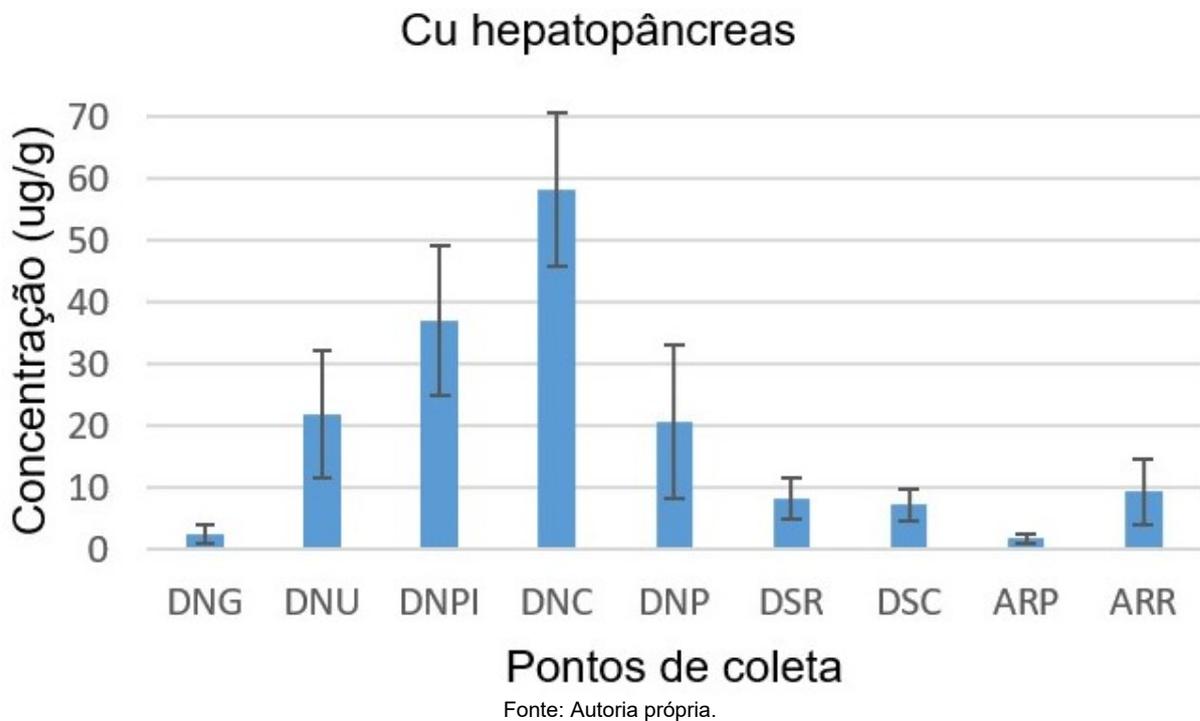


Figura 112: Valores da concentração de Hg ( $\mu\text{g/g}$ ) no hepatopâncreas de *Ocypode quadrata* nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.

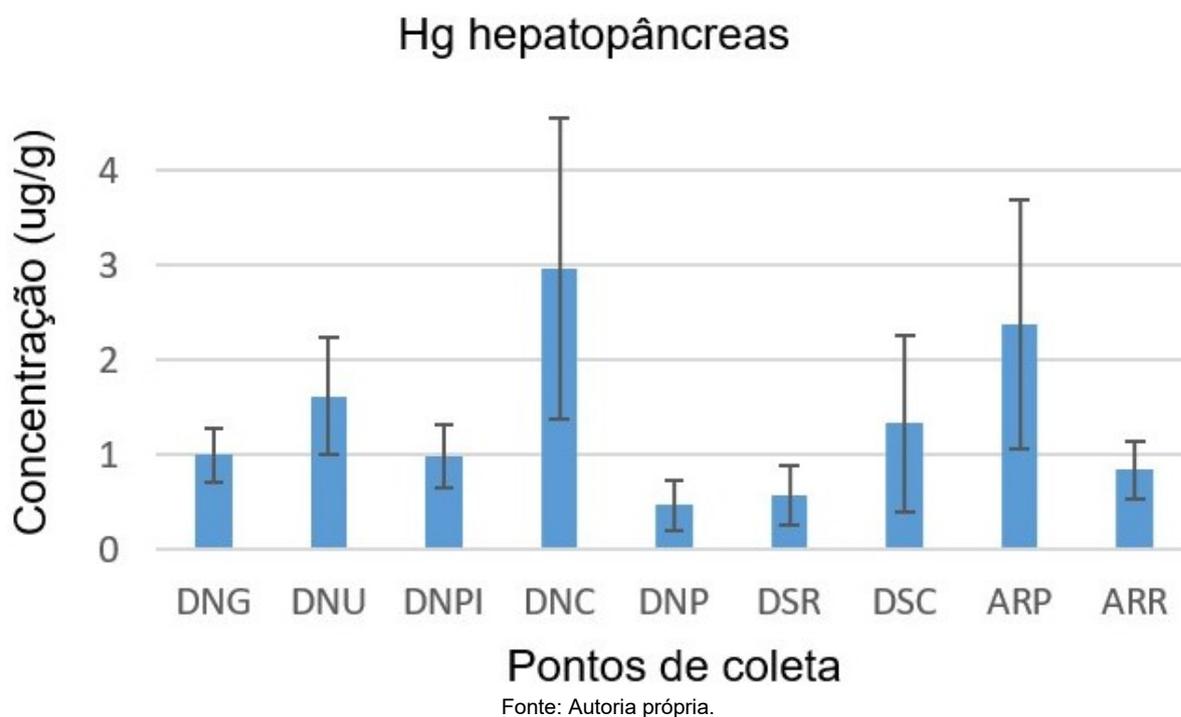
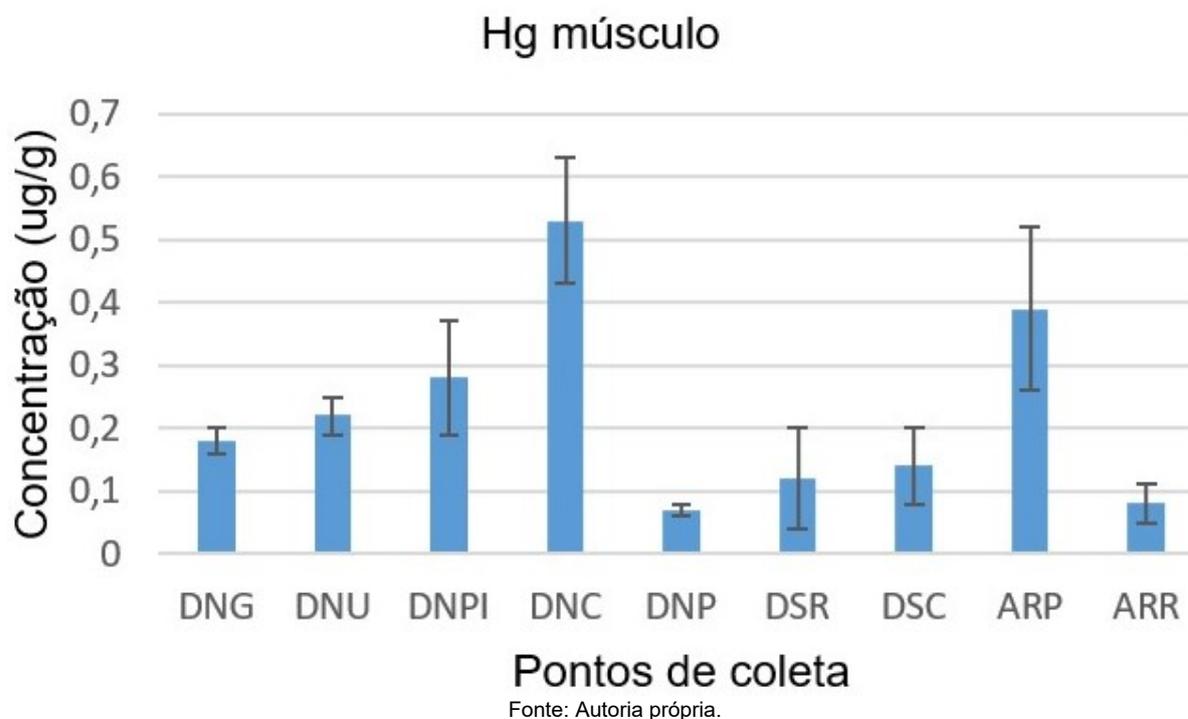


Figura 113: Valores da concentração de Hg ( $\mu\text{g/g}$ ) no músculo de *Ocypode quadrata* nos diferentes pontos de coleta. Os dados são expressos como média  $\pm$  erro padrão.



A partir dos resultados obtidos para *Ocypode quadrata*, podemos concluir que os níveis de Cu e Hg encontrados no hepatopâncreas são suficientes para causar dano, visto que foram encontradas correlações positivas dos níveis de Hg e LPO no hepatopâncreas, além de Hg e PCO no músculo.

Fazendo um comparativo com a literatura existente para *Ocypode* sp e outros crustáceos em locais contaminados e não contaminados, fica claro que os valores de Hg e Cu encontrados no presente estudo são realmente altos (Quadro 25 e Quadro 26). Os dados para comparação são apresentados em 2 quadros, uma apresentando as médias das concentrações dos metais no tecido, enquanto a outra os dados são apresentados como mínima e máxima.

Quadro 25: Valores médios de Hg disponíveis na literatura, nos tecidos de *Ocypode* sp. e outros crustáceos, de ambientes contaminados, para simples comparação. Os resultados são expressos em µg/g de peso úmido.

Literatura	Espécie	Tecido	Hg (µg/g)
			Média
	<i>Ocypode quadrata</i>	Hepatopâncreas	1,33
		Brânquia	0,51
		Músculo	0,23
Dadvar et al., 2013 (Irã, contaminado)	<i>Ocypode saratan</i>	Brânquia	0,41
		Músculo	0,25
Moura e Lacerda, 2018 (Ceará/BR)	<i>Callinectes bocourti</i>	Músculo	0,05
	<i>Callinectes larvatus</i>	Músculo	0,03
	<i>Callinectes danae</i>	Músculo	0,03

Fonte: Autoria própria.

Quadro 26: Valores mínimos e máximos de Hg e Cu disponíveis na literatura, nos tecidos de *Ocypode quadrata* e do siri *Callinectes danae*, para simples comparação. Os resultados são expressos em µg/g de peso úmido.

Literatura	Espécie	Tecido	Hg (µg/g)	Cu (µg/g)
			Min - Máx	Min - Máx
	<i>Ocypode quadrata</i>	Hepatopâncreas	0 – 1,06	0,04 – 92,7
		Brânquia	0 – 0,56	0,08 – 71,4
		Músculo	0 – 0,1	0,14 – 9,98
		Organismo	0 – 1,06	0,04 – 92,7
Cabrini et al., 2018 (RJ)	<i>Ocypode quadrata</i>	Organismo		0,24 – 13,29
Bordon et al., 2016 (SP)	<i>Callinectes danae</i>	Hepatopâncreas	<LOQ – 0,06	0,68 – 52,3
		Brânquia	<LOQ – 0,03	3,56 – 21,65
		Músculo	<LOQ – 0,13	0,87 – 6,69

Fonte: Autoria própria.

### 6.3 CONCLUSÃO

A partir dos resultados obtidos nas análises realizadas das amostras obtidas durante a 1ª expedição no ambiente praial e sobre o que foi exposto neste relatório, fica claro que:

Existe contaminação por metais na água coletada nas diferentes áreas de estudo, sendo que em alguns casos os níveis observados representam concentrações acima dos limites permitidos para as águas de Classe I, conforme definido pela Resolução 357, de 17 de março de 2005, do Conselho Nacional do Meio Ambiente - CONAMA. Foram detectadas concentrações de ferro (Fe) dissolvido na água acima daquela permitida na legislação vigente em alguns pontos analisados.

O padrão espacial de resposta do biomarcador de estresse utilizado (lipoperoxidação) coincide com os padrões observados de bioacumulação dos metais analisados (principalmente Cu, Fe, Mn e Hg) indicando que os metais associados ao evento do rompimento da barragem de Mariana ainda se encontram disponíveis para assimilação pelos organismos analisados.

A biota do ambiente praial foi impactada pelo rompimento da barragem, e mesmo após 3 anos do evento continua sofrendo em vista do ocorrido, seja através dos efeitos encontrados (LPO e MT) ou da bioacumulação dos metais citados anteriormente nos organismos/tecidos analisados.

Sendo assim, é de extrema importância o monitoramento de longo prazo na região estudada utilizando-se os parâmetros físico-químicos, bioindicadores e biomarcadores avaliados durante as atividades realizadas. Dentre os bioindicadores os que mostraram maior correlação com a contaminação no ambiente, bioacumulação dos metais associados ao rompimento da barragem e efeito foram os isópodos e poliquetas, mostrando serem os mais sensíveis aos parâmetros analisados.

#### 6.4 REFERÊNCIAS

- Bordon, I.C.A.C., Sarkis, J.E.S., Andrade, N.P., Hortellani, M.A., Favaro, D.I.T., Kakazu, M.H., Cotrim, M.E.B., Lavradas, R.T., Moreira, I., Saint'Pierre, T.D., & Hauser-Davis, R.A. (2016). An environmental forensic approach for tropical estuaries based on metal bioaccumulation in tissues of *Callinectes danae*. *Ecotoxicology*, 25, 91–104.
- Cabrini, T.M.B., Barboza, C.A.M., Skinner, V.B., Hauser-Davis, R.A., Rocha, R.C., Saint'Pierre, T.D., Valentin, J.L., & Cardoso, R.S. (2018). Investigating heavy metal bioaccumulation by macrofauna species from different feeding guilds from sandy beaches in Rio de Janeiro, Brazil. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 162, 655–662.
- Dadvar, E., Shapoori, M., & Sinaei, M. (2013). Bioavailability of some heavy metals in gill and muscle tissues of ghost crab (*Ocypode saratan*) in the tidal shores of Chabahar. *Journal of Marine Biology*, 19.
- Fialkowski, W., Rainbow, P.S., Fialkowska, E., & Smith, B.D. (2000). Biomonitoring of trace metals along the Baltic Coast of Poland using the sandhopper *Talitrus saltator* (Montagu) (Crustacea: Amphipoda). *Ophelia*, 52, 183–192.
- Halliwell, B. (2009). The wanderings of a free radical. *Free Radical Biology and Medicine*, 46 (5), 531-42.
- Klerks, P.L., & Weis, J.S. (1987). Genetic adaptation to heavy metals in aquatic organisms: a review. *Environmental Pollution*, 45 (3), 173-205.
- Moura, V.L., & Lacerda, L.D. (2018). Contrasting mercury bioavailability in the marine and fluvial dominated areas of the Jaguaribe River Basin, Ceará, Brazil. *Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology*, 101, 49–54.
- Rainbow, P.S., Moore, P.G., & Watson, D. (1998a). Talitrid amphipods (Crustacea) as biomonitors for copper and zinc. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 28, 567–582.
- Rainbow, P.S., Fialkowski, W., & Smith, B.D. (1998b). The sandhopper *Talitrus saltator* as a trace metal biomonitor in the Gulf of Gdansk, Poland. *Marine Pollution Bulletin*, 36, 193–200.
- Rainbow, P.S., Amiard-Triquet, C., Amiard, J.C., Smith, B.D., Best, S.L., Nassiri, YX., & Langston, W.J. (1999). Trace metal uptake rate in crustaceans (amphipods and crabs) from coastal sites in NW Europe differentially enriched with trace metals. *Marine Ecology Progress Series*, 183, 189-203.
- Said, R.E.S.M., AbdAllah, A.T., Mostafa, M.A., & El-Shimy, N.A. (2017). Biomarker response in the Polychaete *Nereis succinea* as early signal for heavy metals pollution in the Red Sea, Egypt. *Journal of Ecology and Toxicology*, 1, 104.
- Sies, H. (1991). Oxidative Stress: Introduction. In: *Oxidative Stress: Oxidant and Antioxidants*. Academic Press. San Diego, CA. p.15-22.

Ugolini, A., Borghini, F., Calosi, P., Bazzicalupo, M., Chelazzi, G., & Focardi S. (2004). Mediterranean *Talitrus saltator* (Crustacea, Amphipoda) as a biomonitor of heavy metals contamination. *Marine Pollution Bulletin*, 48, 526–532.

## 7 SUBPROJETO: MONITORAMENTO DOS MANGUEZAIS

### 7.1 OBJETIVO

Como objetivo geral o presente subprojeto visa o monitoramento ecotoxicológico dos manguezais através da avaliação da biota. Este monitoramento foi baseado em: (a) determinações das concentrações de metais na biota; e (b) análise de biomarcadores.

### 7.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO

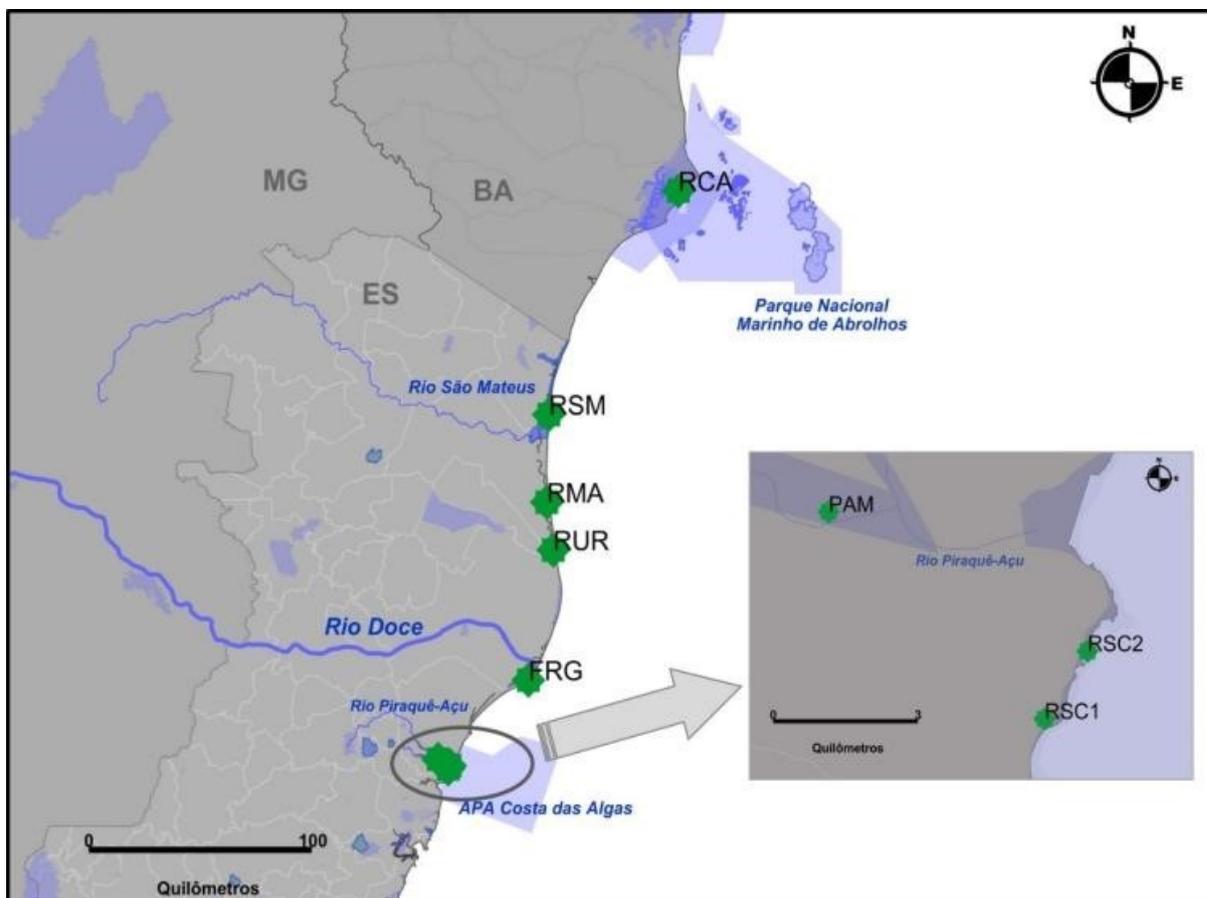
No que se refere aos manguezais, conforme descrito no Apêndice V (Alterações Ecológicas na Dinâmica dos Manguezais e Vegetação de Restinga sob Influência dos Sedimentos Provenientes do Rio Doce), o monitoramento foi realizado na área de influência direta do rompimento da barragem (foz do Rio Doce), bem como nas áreas de influência consideradas atualmente como indiretas, a saber: Confluência dos Rios Piraquê Açú e Mirim (pertencente à Reserva do Desenvolvimento Sustentável Municipal Piraquê Açú e Piraquê Mirim) Manguezais de franja na área do Revis de Santa Cruz ) pertencente à APA Costa das Algas e Revis Santa Cruz) a Rio Urussuquara, Rio Mariricu, Rio São Mateus (pertencente à APA Conceição da Barra) e Rio Caravelas (pertencente à APA Ponta da Baleia/Abrolhos). Durante a execução do monitoramento, houve a necessidade de inclusão de um novo ponto de coleta na região de Revis Santa Cruz (RSC2). Isso se deve ao fato de que o crustáceo da espécie *Cardisoma guanhumu* não foi encontrada no ponto RSC1. Neste sentido, o ponto RSC2 foi adicionado ao monitoramento, sendo monitoradas ao total 8 regiões de manguezal (Quadro 27 e Figura 114). Considerando a proximidade entre RSC1 e RSC2, os resultados para estes pontos serão unidos e apresentados como um ponto único (RSC).

Quadro 27: Estações amostrais referente ao monitoramento de manguezais. Coordenadas apresentadas no formato UTM Sirgas 2000.

NOME DA ESTAÇÃO AMOSTRAL	CÓDIGO DA ESTAÇÃO	LATITUDE	LONGITUDE
Rio Piraque-Açu	PAM	375807,78	7793773,70
RVS Santa Cruz 1	RSC1	380046,67	7789712,90
RVS Santa Cruz 2	RSC2	380874,96	7791054,80
Foz de Regência	FRG	413724,67	7827888,28
Rio Urussuquara (Barra seca)	RUR	423977,15	7883642,67
Rio Mariricu (Barra nova)	RMA	421175,81	7904064,17
Rio São Mateus (Conceição da Barra)	RSM	421850,06	7941617,31
Rio Caravelas	RCA	476880,37	8037464,47

Fonte: Autoria própria.

Figura 114: Mapa amostral da campanha de monitoramento dos manguezais do Espírito Santo e Sul da Bahia, identificando em verde os pontos de coleta de biota.



Fonte: Autoria própria.

Nos manguezais, em cada ponto amostral foram coletados os caranguejos guaiamu (*Cardisoma guanhumí*) (n=6) e o caranguejos-uçá (*Ucides cordatus*) (n=6). Entretanto, durante a execução do monitoramento, houve a necessidade de inclusão de uma nova espécie, pertencente ao mesmo nível trófico das outras, conhecida popularmente como caranguejo vermelho (*Goniopsis cruentata*) (n=6). A inclusão desta nova espécie se deve ao fato da inexistência de *U. cordatus* no ponto referente a Foz do Rio Doce. Sendo assim, a espécie *G. cruentata* foi coletada apenas no ponto FRG em substituição a *U. cordatus*.

Após coleta, os caranguejos (machos e/ou fêmeas) foram crioplanados e foram coletadas hemolinfa, para dosagem de biomarcadores de danos de DNA {sítios apurínicos/pirimidínicos (AP) e micronúcleo}, bem como músculo, brânquias e hepatopâncreas para avaliação de conteúdo de metais e biomarcadores bioquímicos (proteínas oxidadas, lipoperoxidação e metalotioneína). Os metais analisados nos tecidos de caranguejos foram: arsênio (As), cádmio (Cd), chumbo (Pb), cobre (Cu), cromo (Cr), ferro (Fe), manganês (Mn), mercúrio (Hg) e zinco (Zn).

Com relação às análises de dano de DNA, a quantificação de sítios AP está em fase de finalização, devendo ser finalizadas nas próximas semanas. Entretanto, a análise de danos ao DNA através do ensaio de Micronúcleo nos hemócitos de caranguejos, apesar de ter sido padronizado com sucesso

em laboratório, não obteve êxito ao ser realizada em campo. O protocolo padronizado em laboratório foi devidamente executado em campo, entretanto as lâminas geradas não estavam adequadas para análise e poderiam prejudicar a interpretação dos dados e gerar falsos positivos. Entre os principais problemas encontrados na análise ressaltamos o baixo número de células que em geral estavam com suas estruturas deformadas. A bibliografia atual utilizando hemolinfa para esta análise alerta para o fato de que a principal limitação deste tecido é a complexidade dos tipos de células, dificultando assim as análises. Além disto, a bibliografia também indica que os organismos devem ser rapidamente transportados para o laboratório para posterior execução do protocolo (Bolognesi e Fenech, 2012). Sendo assim, identificamos que o teste de Micronúcleo especificamente na hemolinfa de crustáceos é inviável de ser realizado nas condições de campo encontradas no monitoramento.

Como mencionado nos relatórios de monitoramento anteriores, o fato de não haver referência ou preocupação com avaliações na fauna ou flora associada aos ambientes de manguezal em programas de monitoramento, compromete o diagnóstico do real impacto neste ambiente. Portanto, em vista da falta de dados pretéritos pré e/ou pós-acidente para comparações no ecossistema manguezal, foram realizadas comparações com os níveis de metais encontrados na literatura tendo como base estudos realizados em regiões de alta contaminação por metais.

Neste sentido, os primeiros dados a serem mostrados neste relatório são os níveis de metais mensurados nos diferentes tecidos (brânquias, hepatopâncreas e músculo) de *U. cordatus*, *C. guanhamu* e *G. cruentata* (Tabela 37).

Tabela 37: Tabela mostrando os valores de média  $\pm$  EP e mediana das concentrações de metais (Cr, Fe, Mn, Cd, Cu, Zn, Pb, Hg e As) nas brânquias, hepatopâncreas e músculo de *U. cordatus*, *C. guanhamu* e *G. cruentata* nas diversas estações de coleta do monitoramento do manguezal. Os resultados são expressos em  $\mu\text{g. g}$  peso úmido<sup>-1</sup>.

Espécie	Tecido	Ponto	N	Cr		Fe		Mn		Cd		Cu		Zn	Pb		Hg		As				
				mg / kg peso seco																			
				Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana																		
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	PAM	7	1,73 $\pm$ 0,41	1,68	18,40 $\pm$ 4,19	18,08	15,10 $\pm$ 2,41	16,94	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	13,81 $\pm$ 6,23	7,51	0,64 $\pm$ 0,13	0,49	0,09 $\pm$ 0,01	0,08	0,08 $\pm$ 0,01	0,07	0,05 $\pm$ 0,02	0,05		
	Hepatopâncreas		7	7,36 $\pm$ 2,22	5,24	54,42 $\pm$ 10,73	49,93	17,16 $\pm$ 8,80	4,69	0,04 $\pm$ 0,01	0,04	26,13 $\pm$ 4,93	23,83	2,00 $\pm$ 0,35	1,71	0,59 $\pm$ 0,20	0,31	0,17 $\pm$ 0,03	0,20	0,32 $\pm$ 0,12	0,21		
	Músculo		7	1,43 $\pm$ 0,42	1,26	29,52 $\pm$ 3,80	27,73	21,24 $\pm$ 8,75	15,08	0,12 $\pm$ 0,03	0,14	1,49 $\pm$ 0,17	1,44	0,62 $\pm$ 0,19	0,51	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	0,03 $\pm$ 0,01	0,03	0,23 $\pm$ 0,06	0,23		
<i>Cardisoma guanhami</i>	Brânquia	PAM	6	1,53 $\pm$ 0,32	1,58	15,32 $\pm$ 4,09	11,07	5,89 $\pm$ 1,12	5,80	0,01 $\pm$ 0,00	0,00	92,04 $\pm$ 36,99	61,70	0,45 $\pm$ 0,08	0,44	0,07 $\pm$ 0,01	0,06	0,07 $\pm$ 0,01	0,06	0,18 $\pm$ 0,06	0,14		
	Hepatopâncreas		6	4,56 $\pm$ 1,83	4,01	37,65 $\pm$ 9,49	30,35	6,09 $\pm$ 2,49	3,44	0,01 $\pm$ 0,01	0,00	22,14 $\pm$ 11,12	12,15	1,51 $\pm$ 0,57	1,08	0,32 $\pm$ 0,07	0,25	0,13 $\pm$ 0,04	0,09	0,13 $\pm$ 0,03	0,13		
	Músculo		6	1,85 $\pm$ 0,59	1,96	26,28 $\pm$ 3,58	27,29	6,63 $\pm$ 3,00	4,27	0,02 $\pm$ 0,01	0,02	2,81 $\pm$ 0,27	2,82	0,69 $\pm$ 0,10	0,76	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	0,25 $\pm$ 0,06	0,26		
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	RSC	6	4,78 $\pm$ 1,58	2,80	57,46 $\pm$ 13,78	40,32	95,45 $\pm$ 39,20	68,29	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	4,75 $\pm$ 0,77	3,80	2,12 $\pm$ 0,43	2,03	0,27 $\pm$ 0,005	0,24	0,29 $\pm$ 0,05	0,26	0,12 $\pm$ 0,04	0,10		
	Hepatopâncreas		6	6,43 $\pm$ 0,93	6,02	223,06 $\pm$ 60,14	210,83	16,96 $\pm$ 9,83	4,57	0,025 $\pm$ 0,006	0,02	5,81 $\pm$ 1,16	5,61	2,33 $\pm$ 0,57	1,79	0,16 $\pm$ 0,04	0,13	0,16 $\pm$ 0,05	0,14	0,21 $\pm$ 0,05	0,15		
	Músculo		6	3,20 $\pm$ 0,44	3,73	25,80 $\pm$ 4,12	28,26	12,27 $\pm$ 3,48	11,21	0,094 $\pm$ 0,06	0,04	0,72 $\pm$ 0,18	0,54	0,61 $\pm$ 0,18	0,49	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	0,22 $\pm$ 0,04	0,21		
<i>Cardisoma guanhami</i>	Brânquia	RSC	7	1,82 $\pm$ 0,22	1,50	34,09 $\pm$ 6,96	34,56	8,70 $\pm$ 2,66	7,74	0,009 $\pm$ 0,002	0,01	0,12 $\pm$ 0,02	0,11	0,53 $\pm$ 0,09	0,46	0,15 $\pm$ 0,06	0,15	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	0,23 $\pm$ 0,07	0,20		
	Hepatopâncreas		7	2,82 $\pm$ 0,97	1,70	74,77 $\pm$ 30,37	45,13	1,69 $\pm$ 0,49	1,88	0,004 $\pm$ 0,001	0,00	1,46 $\pm$ 0,19	1,55	0,98 $\pm$ 0,35	0,63	0,02 $\pm$ 0,00	0,02	0,03 $\pm$ 0,01	0,02	0,18 $\pm$ 0,08	0,10		
	Músculo		7	2,06 $\pm$ 0,43	2,34	25,26 $\pm$ 1,69	23,50	1,10 $\pm$ 0,20	1,36	0,001 $\pm$ 0,00	0,00	1,50 $\pm$ 0,21	1,32	0,18 $\pm$ 0,05	0,12	0,41 $\pm$ 0,17	0,22	0,09 $\pm$ 0,02	0,11	0,05 $\pm$ 0,02	0,04		
<i>Goniopsis cruentata</i>	Brânquia	FRG	6	3,01 $\pm$ 0,38	2,82	23,22 $\pm$ 3,01	21,65	5,40 $\pm$ 1,48	3,71	0,014 $\pm$ 0,003	0,01	0,12 $\pm$ 0,04	0,11	0,87 $\pm$ 0,14	0,78	0,19 $\pm$ 0,09	0,10	0,01 $\pm$ 0,00	0,01	0,20 $\pm$ 0,07	0,15		
	Hepatopâncreas		6	9,63 $\pm$ 3,01	6,73	124,73 $\pm$ 33,45	116,00	3,32 $\pm$ 1,49	1,56	0,015 $\pm$ 0,003	0,01	8,06 $\pm$ 4,00	4,48	1,21 $\pm$ 0,30	1,20	0,12 $\pm$ 0,03	0,09	0,24 $\pm$ 0,06	0,19	0,26 $\pm$ 0,08	0,19		

Espécie	Tecido	Ponto	N	Cr		Fe		Mn		Cd		Cu		Zn	Pb		Hg		As				
				mg / kg peso seco																			
				Média (± erro padrão)	Mediana																		
	Músculo		6	2,94 ± 0,54	2,54	9,08 ± 1,05	8,91	3,05 ± 1,21	1,58	0,001 ± 0,000	0,00	1,47 ± 0,38	1,10	0,64 ± 0,12	0,50	0,55 ± 0,12	0,69	0,12 ± 0,02	0,11	0,10 ± 0,01	0,09		
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia		6	2,27 ± 0,26	2,25	52,35 ± 20,93	33,28	10,28 ± 3,12	11,18	0,005 ± 0,001	0,00	0,02 ± 0,01	0,01	0,44 ± 0,07	0,39	0,10 ± 0,02	0,10	0,004 ± 0,00	0,00	0,13 ± 0,03	0,11		
	Hepatopâncreas		6	2,62 ± 0,62	1,99	31,71 ± 8,00	32,38	5,75 ± 2,38	4,15	0,002 ± 0,001	0,00	0,26 ± 0,08	0,19	0,64 ± 0,17	0,51	0,05 ± 0,02	0,01	0,13 ± 0,02	0,13	0,11 ± 0,05	0,07		
	Músculo		6	2,30 ± 0,19	2,29	25,19 ± 3,11	26,08	2,44 ± 0,59	2,39	0,001 ± 0,000	0,00	1,44 ± 0,29	1,16	3,20 ± 1,00	3,05	1,15 ± 0,45	0,97	0,04 ± 0,02	0,00	0,07 ± 0,02	0,06		
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia		6	2,90 ± 1,41	1,61	3,29 ± 0,92	2,27	4,30 ± 2,31	1,13	0,01 ± 0,00	0,00	0,07 ± 0,03	0,06	0,88 ± 0,28	0,58	0,10 ± 0,03	0,09	0,03 ± 0,03	0,00	0,18 ± 0,09	0,10		
	Hepatopâncreas		6	3,46 ± 0,90	2,48	50,34 ± 25,57	20,39	3,20 ± 1,15	2,19	0,001 ± 0,00	0,00	0,04 ± 0,02	0,03	0,05 ± 0,01	0,04	0,05 ± 0,01	0,05	0,13 ± 0,03	0,11	0,06 ± 0,04	0,02		
	Músculo		6	2,28 ± 0,13	2,21	23,67 ± 0,95	22,81	1,02 ± 0,27	1,14	0,000 ± 0,00	0,00	1,18 ± 0,13	1,18	0,25 ± 0,09	0,25	0,33 ± 0,10	0,38	0,001 ± 0,00	0,00	0,05 ± 0,01	0,04		
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia	RUR	6	8,83 ± 1,37	8,25	31,60 ± 11,91	29,51	19,94 ± 5,96	15,49	0,01 ± 0,00	0,01	0,17 ± 0,10	0,07	1,38 ± 0,53	1,12	0,30 ± 0,04	0,32	0,05 ± 0,01	0,05	0,43 ± 0,18	0,31		
	Hepatopâncreas		6	2,34 ± 0,43	2,12	29,99 ± 12,25	12,91	3,54 ± 1,44	2,15	0,003 ± 0,00	0,00	0,02 ± 0,01	0,02	0,06 ± 0,01	0,07	0,06 ± 0,02	0,05	0,13 ± 0,03	0,14	0,07 ± 0,02	0,06		
	Músculo		6	2,38 ± 0,37	2,36	25,62 ± 1,03	24,66	17,79 ± 14,01	4,34	0,002 ± 0,00	0,00	0,98 ± 0,11	1,05	0,25 ± 0,07	0,25	0,92 ± 0,29	1,03	0,01 ± 0,00	0,01	0,11 ± 0,06	0,07		
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia		6	3,59 ± 0,84	3,26	23,68 ± 5,47	19,70	9,50 ± 3,54	7,66	0,02 ± 0,01	0,01	4,36 ± 0,75	4,24	0,48 ± 0,08	0,43	0,12 ± 0,03	0,11	0,06 ± 0,01	0,06	0,13 ± 0,07	0,07		
	Hepatopâncreas		6	2,17 ± 0,55	2,00	64,10 ± 13,74	71,30	30,22 ± 8,39	27,45	0,03 ± 0,01	0,02	0,15 ± 0,06	0,09	0,90 ± 0,30	0,68	0,03 ± 0,01	0,02	0,05 ± 0,02	0,03	0,19 ± 0,05	0,20		
	Músculo	RMA	6	1,99 ± 0,23	1,96	30,33 ± 2,92	29,07	1,68 ± 0,61	1,01	0,001 ± 0,00	0,00	2,22 ± 0,42	2,26	0,09 ± 0,03	0,09	0,03 ± 0,01	0,03	0,01 ± 0,00	0,01	0,08 ± 0,02	0,07		
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia		6	1,20 ± 0,46	0,70	14,19 ± 2,09	14,42	1,89 ± 0,98	0,99	0,04 ± 0,02	0,03	3,16 ± 0,97	2,51	0,46 ± 0,07	0,42	0,04 ± 0,01	0,04	0,04 ± 0,01	0,04	0,06 ± 0,02	0,04		
	Hepatopâncreas		6	1,41 ± 0,47	1,20	17,53 ± 2,77	15,80	3,99 ± 0,94	3,52	0,01 ± 0,00	0,01	0,56 ± 0,54	0,03	0,22 ± 0,06	0,20	0,01 ± 0,01	0,01	0,01 ± 0,00	0,00	0,06 ± 0,03	0,03		

Espécie	Tecido	Ponto	N	Cr		Fe		Mn		Cd		Cu		Zn	Pb		Hg		As				
				mg / kg peso seco																			
				Média (± erro padrão)	Mediana																		
	Músculo		6	2,32 ± 0,61	1,79	28,82 ± 2,48	30,44	2,73 ± 2,11	0,81	0,001 ± 0,00	0,00	2,30 ± 0,37	2,41	0,16 ± 0,06	0,15	0,03 ± 0,01	0,03	0,01 ± 0,00	0,01	0,16 ± 0,05	0,10		
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia		6	4,53 ± 1,07	3,59	10,66 ± 4,75	5,23	22,15 ± 13,15	10,41	0,02 ± 0,01	0,02	2,33 ± 0,61	2,01	2,88 ± 0,76	2,45	0,18 ± 0,03	0,17	0,04 ± 0,01	0,04	0,12 ± 0,03	0,15		
	Hepatopâncreas		6	1,97 ± 0,41	1,74	4,91 ± 2,08	3,87	15,30 ± 5,84	9,18	0,004 ± 0,00	0,00	2,76 ± 0,56	2,52	1,69 ± 0,58	1,14	1,00 ± 0,28	0,82	0,21 ± 0,04	0,20	0,10 ± 0,06	0,05		
	Músculo		6	4,48 ± 0,68	3,72	26,59 ± 1,37	26,65	1,68 ± 0,44	1,58	0,001 ± 0,00	0,00	0,79 ± 0,17	0,78	0,40 ± 0,14	0,30	0,66 ± 0,22	0,45	0,01 ± 0,00	0,01	0,06 ± 0,02	0,05		
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia	RSM	6	3,92 ± 0,29	3,86	5,98 ± 1,43	4,93	12,12 ± 3,55	10,90	0,02 ± 0,01	0,02	2,55 ± 0,33	2,41	2,72 ± 0,62	2,45	0,18 ± 0,04	0,14	0,05 ± 0,01	0,05	0,13 ± 0,05	0,08		
	Hepatopâncreas		6	1,78 ± 0,38	1,58	3,42 ± 0,96	3,11	9,12 ± 4,72	4,90	0,004 ± 0,00	0,00	3,90 ± 0,82	3,31	1,15 ± 0,30	1,01	0,50 ± 0,34	0,08	0,20 ± 0,03	0,18	0,06 ± 0,03	0,04		
	Músculo		6	3,225 ± 0,55	3,13	24,51 ± 1,51	24,83	1,27 ± 0,22	1,22	0,001 ± 0,00	0,00	0,32 ± 0,06	0,36	0,29 ± 0,07	0,29	1,39 ± 0,39	1,41	0,01 ± 0,00	0,01	0,20 ± 0,12	0,11		
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	RCA	6	1,73 ± 0,34	2,03	21,52 ± 2,72	22,64	91,73 ± 39,58	80,58	0,02 ± 0,01	0,01	1,79 ± 0,49	1,31	2,34 ± 1,51	0,91	0,32 ± 0,07	0,28	0,05 ± 0,00	0,06	0,06 ± 0,02	0,06		
	Hepatopâncreas		6	1,61 ± 0,35	1,35	15,94 ± 4,37	11,54	63,13 ± 26,94	39,36	0,01 ± 0,01	0,01	0,24 ± 0,13	0,14	0,88 ± 0,24	0,77	0,08 ± 0,01	0,09	0,08 ± 0,00	0,01	0,12 ± 0,01	0,11		
	Músculo		6	0,88 ± 0,27	1,03	8,97 ± 4,26	4,82	2,26 ± 0,77	1,66	0,01 ± 0,00	0,01	1,29 ± 0,23	1,36	0,54 ± 0,16	0,37	0,11 ± 0,03	0,08	0,05 ± 0,01	0,06	0,14 ± 0,06	0,11		
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia		6	1,93 ± 0,58	2,24	15,55 ± 3,02	15,01	1,93 ± 0,35	2,17	0,16 ± 0,06	0,13	2,85 ± 0,63	2,77	1,66 ± 0,37	1,61	0,27 ± 0,13	0,18	0,08 ± 0,01	0,07	0,08 ± 0,01	0,08		
	Hepatopâncreas		6	1,71 ± 0,51	1,47	10,64 ± 2,69	10,21	74,19 ± 39,75	35,80	0,004 ± 0,00	0,00	1,69 ± 0,74	0,94	0,74 ± 0,17	0,81	0,11 ± 0,03	0,10	0,01 ± 0,00	0,01	0,08 ± 0,01	0,08		
	Músculo		6	1,30 ± 0,40	0,87	29,14 ± 2,65	26,68	7,22 ± 3,17	3,90	0,003 ± 0,00	0,00	1,94 ± 0,54	1,45	0,26 ± 0,10	0,20	0,08 ± 0,01	0,08	0,05 ± 0,01	0,05	0,11 ± 0,03	0,09		

Fonte: Autoria própria.

Comparando os dados apresentados na Tabela 37 com estudos da literatura (Quadro 28), observamos níveis elevados de Cromo (Cr) em todos os tecidos analisados de caranguejos para todas os pontos analisados do mangue, com valores que variaram de 1 a 9  $\mu\text{g. g}^{-1}$  (Ver Tabela 37; coluna Cr). Com relação ao Ferro (Fe), também foram observados níveis elevados deste metal com valores que variaram de 3 a 223  $\mu\text{g. g}^{-1}$  (Ver Tabela 37; coluna Fe). Similarmente, para o Manganês (Mn), também foram observados níveis elevados nas estações avaliadas com valores que variaram de 1 a 95  $\mu\text{g. g}^{-1}$  (Ver Tabela 37; coluna Mn).

Quadro 28: Quadro mostrando os valores de Mínimo e Máximo (Min - Max), a partir das médias da Tabela 37, para os metais (Cr, Fe, Mn) nas brânquias, hepatopâncreas e músculo de *U. cordatus* e *C. guanhumi* nas diversas estações de coleta do monitoramento do manguezal. Também são mostrados os valores de Min e Max em estudos publicados para ambientes considerados contaminados para simples comparação. Os resultados são expressos em  $\mu\text{g. g}$  peso úmido<sup>-1</sup>.

Espécie	Tecido	Cr ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )	Fe ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )	Mn ( $\mu\text{g.g}^{-1}$ )
		Min - Max	Min - Max	Min - Max
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	1,73 – 4,78	3,29 – 57,46	4,30 – 95,45
	Hepatopâncreas	1,61 – 7,36	4,91 – 223,1	3,20 – 63,13
	Músculo	0,88 – 4,48	8,97 – 30,33	1,02 – 21,73
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia	1,20 – 8,83	5,98 – 52,36	1,89 – 19,94
	Hepatopâncreas	1,41 – 7,36	3,41 – 74,76	1,69 – 74,18
	Músculo	1,30 – 3,23	24,51 – 29,14	1,10 – 17,80
Dados da Bibliografia	Brânquia	0,09 <sup>a</sup> – 3,59 <sup>b</sup>	1,43 <sup>c</sup> – 125,4 <sup>d</sup>	0,31 <sup>a</sup> – 56,9 <sup>b</sup>
	Hepatopâncreas	0,12 <sup>a</sup> – 4,17 <sup>b</sup>	10,9 <sup>c</sup> – 79 <sup>f</sup>	1,62 <sup>a</sup> – 27,1 <sup>b</sup>
	Músculo	0,05 <sup>a</sup> – 0,66 <sup>b</sup>	2,86 <sup>c</sup> – 49,6 <sup>e</sup>	0,05 <sup>a</sup> – 1,8 <sup>b</sup>

Fonte: Autoria própria.

Os resultados do monitoramento apresentados na Tabela 37 (Min e Max) foram comparados com os valores de Min e Max dos seguintes estudos da literatura: Al- Mohama et al. 2001<sup>a</sup>; Carneiro et al. 2018<sup>b</sup>; Harris et al. 2000<sup>c</sup>; Firat et al. 2008<sup>d</sup>; Saldana et al. 2018<sup>e</sup>, Hwang et al. 2017<sup>f</sup>.

No Quadro 28 são apresentados os valores de mínimo (Min) e máximo (Max) dos metais (Cr, Fe e Mn) nos tecidos dos animais para o monitoramento do manguezal podendo ser comparados com valores de Min e Max observados em estudos realizados com caranguejos em ambientes impactados. Os resultados demonstram níveis elevados ou na mesma faixa de concentração em comparação com os dados da literatura.

Quando avaliamos os níveis de dois biomarcadores de efeito (proteínas carboniladas - PCO e lipoperoxidação - LPO) e um de exposição (metalotioneína - MT) não observamos variações significativas em função dos pontos amostrais (Tabela 38). Portanto, partimos para uma estatística multivariada, através da análise de componentes principais (PCA) (Figura 115).

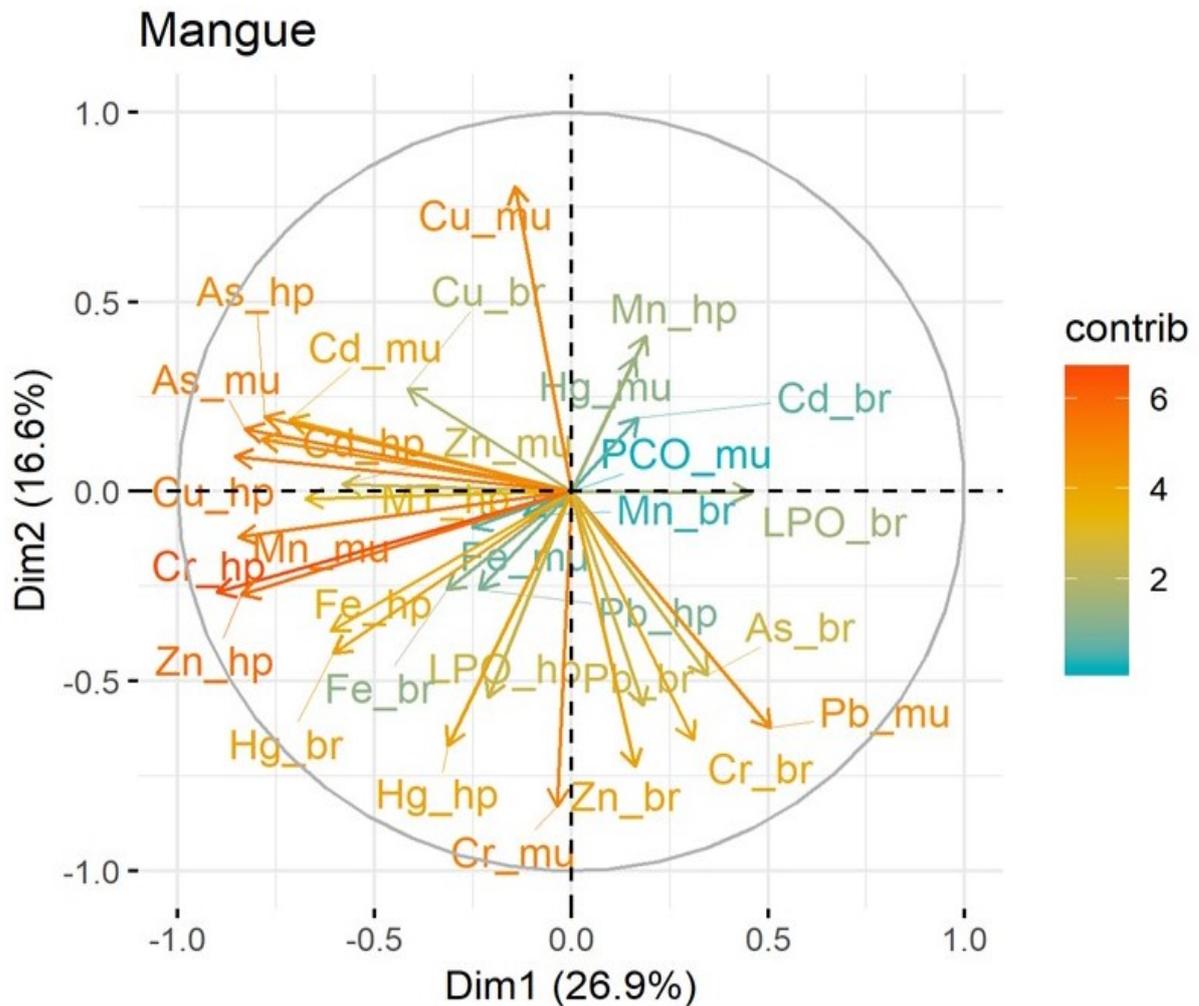
Tabela 38: Tabela mostrando os resultados da análise dos biomarcadores (lipoperoxidação - LPO, proteínas carboniladas - PCO e metalotioneína - MT) em brânquias, hepatopâncreas e músculo de *U. Cordatus*, *C. guanhamu* e *G. cruentata*. Os resultados são expressos como Média  $\pm$  EP e mediana. NA – Não se aplica (dosagem não prevista no TR4).

Espécie	Tecido	Ponto	N	LPO ( $\eta\text{mol MDA.mg de proteina}^{-1}$ )		Metalotioneína ( $\mu\text{mol.mg de proteina}^{-1}$ )		PCO ( $\eta\text{mol.mg de proteina}^{-1}$ )	
				Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana	Média ( $\pm$ erro padrão)	Mediana
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	PAM	7	1,30 $\pm$ 0,39	0,69				
	Hepatopâncreas		7	1,33 $\pm$ 0,25	1,23	17,55 $\pm$ 1,67	15,84		
	Músculo		7					0,79 $\pm$ 0,10	0,94
<i>Cardisoma guanhamu</i>	Brânquia	PAM	6	0,58 $\pm$ 0,087	0,54				
	Hepatopâncreas		6	1,63 $\pm$ 0,24	1,51	13,99 $\pm$ 2,38	12,49		
	Músculo		6					0,56 $\pm$ 0,09	0,49
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	RSC	5	0,67 $\pm$ 0,14	0,60				
	Hepatopâncreas		6	2,63 $\pm$ 0,39	2,79	16,72 $\pm$ 2,20	15,36		
	Músculo		6					0,62 $\pm$ 0,13	0,57
<i>Cardisoma guanhamu</i>	Brânquia	RSC	7	0,73 $\pm$ 0,09	0,69				
	Hepatopâncreas		7	2,64 $\pm$ 0,48	1,93	8,02 $\pm$ 1,30	8,46		
	Músculo		7					0,48 $\pm$ 0,08	0,38
<i>Goniopsis cruentata</i>	Brânquia	FRG	6	1,92 $\pm$ 0,27	1,87				
	Hepatopâncreas		6	3,07 $\pm$ 1,43	1,98	8,46 $\pm$ 2,68	7,5		
	Músculo		6					2,17 $\pm$ 0,35	2,36
<i>Cardisoma guanhamu</i>	Brânquia	FRG	6	0,88 $\pm$ 0,18	0,74				
	Hepatopâncreas		6	1,72 $\pm$ 0,65	1,13	17,17 $\pm$ 6,82	13,12		
	Músculo		6					0,70 $\pm$ 0,10	0,70
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	RUR	6	1,18 $\pm$ 0,20	1,07				
	Hepatopâncreas		6	1,85 $\pm$ 0,44	1,5	13,58 $\pm$ 1,45	13,77		
	Músculo		6					1,08 $\pm$ 0,22	0,96
<i>Cardisoma guanhamu</i>	Brânquia	RUR	6	0,89 $\pm$ 0,17	0,85				
	Hepatopâncreas		6	1,32 $\pm$ 0,14	1,46	5,32 $\pm$ 0,54	5,83		
	Músculo		6					0,82 $\pm$ 0,14	0,74
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	RMA	6	0,54 $\pm$ 0,07	0,46				
	Hepatopâncreas		6	2,38 $\pm$ 1,01	1,74	18,38 $\pm$ 4,18	13,68		
	Músculo		6					0,77 $\pm$ 0,09	0,70
<i>Cardisoma guanhamu</i>	Brânquia	RMA	6	0,94 $\pm$ 0,17	0,79				
	Hepatopâncreas		6	1,14 $\pm$ 0,36	0,9	9,97 $\pm$ 1,87	9,24		

Espécie	Tecido	Ponto	N	LPO (nmol MDA.mg de proteína <sup>-1</sup> )		Metalotioneína (µmol.mg de proteína <sup>-1</sup> )		PCO (nmol.mg de proteína <sup>-1</sup> )	
				Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana	Média (± erro padrão)	Mediana
	Músculo		6					1,03 ± 0,23	0,87
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	RSM	6	0,65 ± 0,15	0,52				
	Hepatopâncreas		6	1,48 ± 0,44	1,01	13,03 ± 2,53	13,68		
	Músculo		6					0,78 ± 0,08	0,74
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia		6	0,78 ± 0,12	0,73				
	Hepatopâncreas		6	2,80 ± 0,95	2,28	9,31 ± 3,49	7,90		
	Músculo		6					1,25 ± 0,49	0,75
<i>Ucides cordatus</i>	Brânquia	RCA	6	0,74 ± 0,15	0,68				
	Hepatopâncreas		6	0,72 ± 0,13	0,71	5,91 ± 1,94	4,64		
	Músculo		6					0,81 ± 0,13	0,69
<i>Cardisoma guanhumi</i>	Brânquia		6	1,11 ± 0,37	0,69				
	Hepatopâncreas		6	1,60 ± 0,20	1,75	10,95 ± 4,03	8,76		
	Músculo		6					0,81 ± 0,13	0,69

Fonte: Autoria própria.

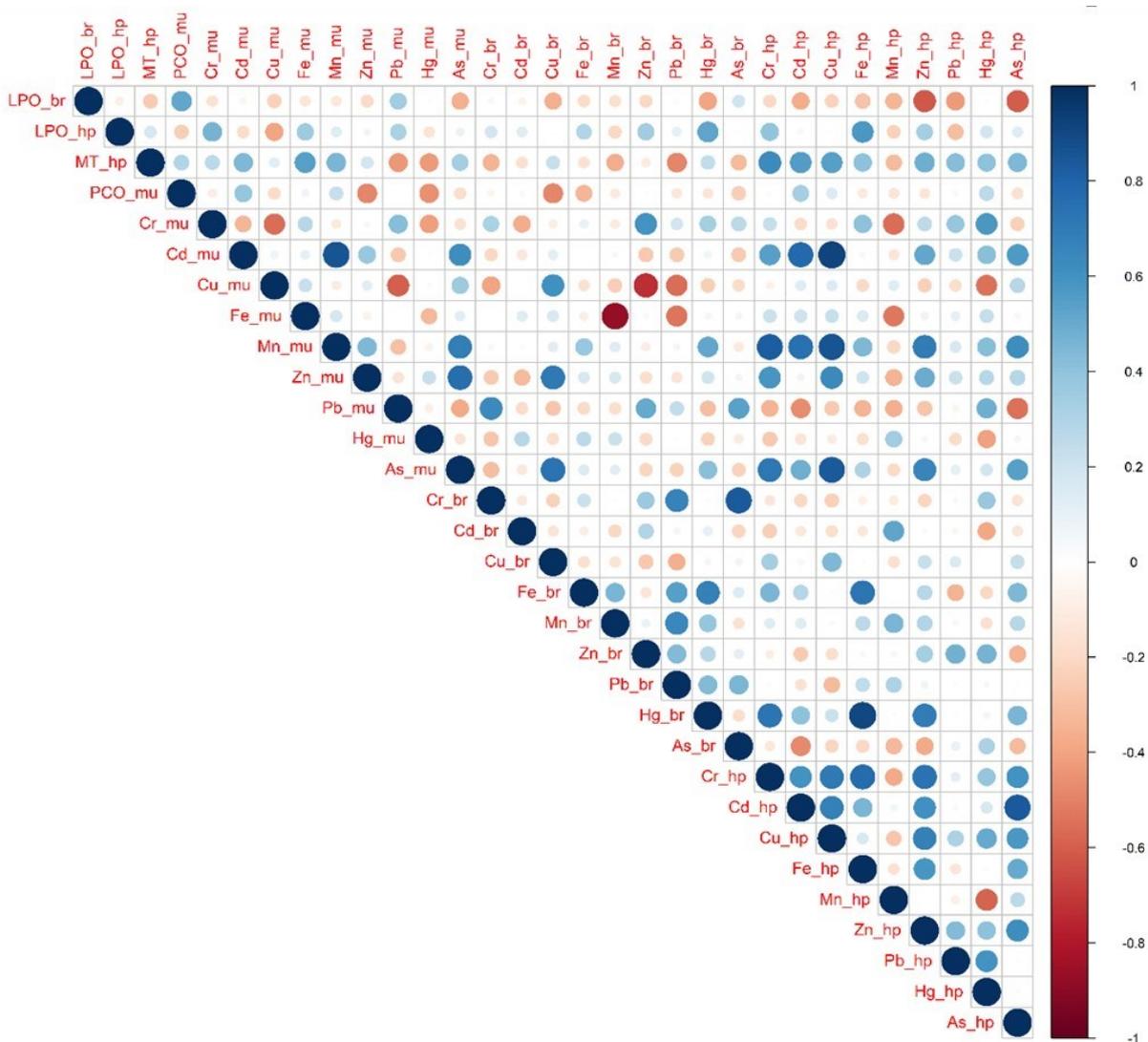
Figura 115: Representação gráfica da Análise de Componentes Principais (PCA) realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1).



Fonte: Autoria própria.

Em um primeiro momento, correlacionamos os níveis de todos os metais nos tecidos com os níveis dos biomarcadores analisados. A partir desta análise, podemos observar que existem correlações positivas entre a acumulação de metais e alguns biomarcadores, como observado através das setas em vermelho e laranja (Figura 115). As concentrações de Cr, Fe, Zn, Cu, As, Pb e Hg nos tecidos contribuem significativamente para a explicação da variabilidade resumida no eixo 1/componente principal 1 (altos valores de contribuição). A partir disso, realizamos uma comparação par a par (Pearson) a fim de verificar de forma mais clara a existência destas correlações (Figura 116).

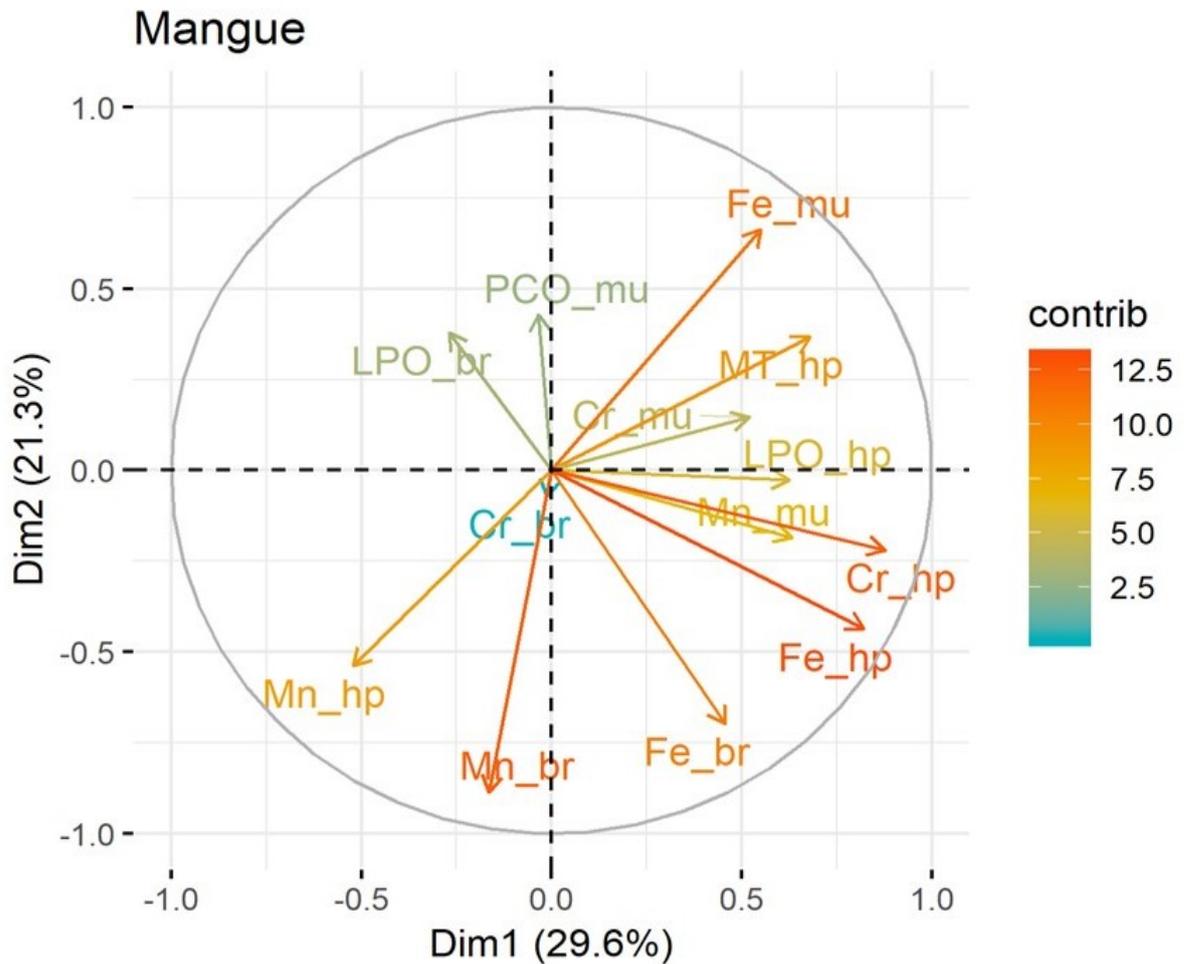
Figura 116: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. Apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ) são mostradas.



Fonte: Autoria própria.

Sendo assim, a partir da análise de correlações par a par conseguimos observar que existem várias correlações positivas (representadas pelos círculos em azul) quando avaliamos a acumulação de metais e os biomarcadores nos diferentes tecidos. Quanto maior o círculo, maior a correlação entre os fatores. Como nos interessa correlacionar os metais que apresentaram altos níveis nos tecidos (Cr, Fe e Mn) com possíveis efeitos sobre biomarcadores (LPO, PCO e MT), realizamos uma nova PCA (Figura 117).

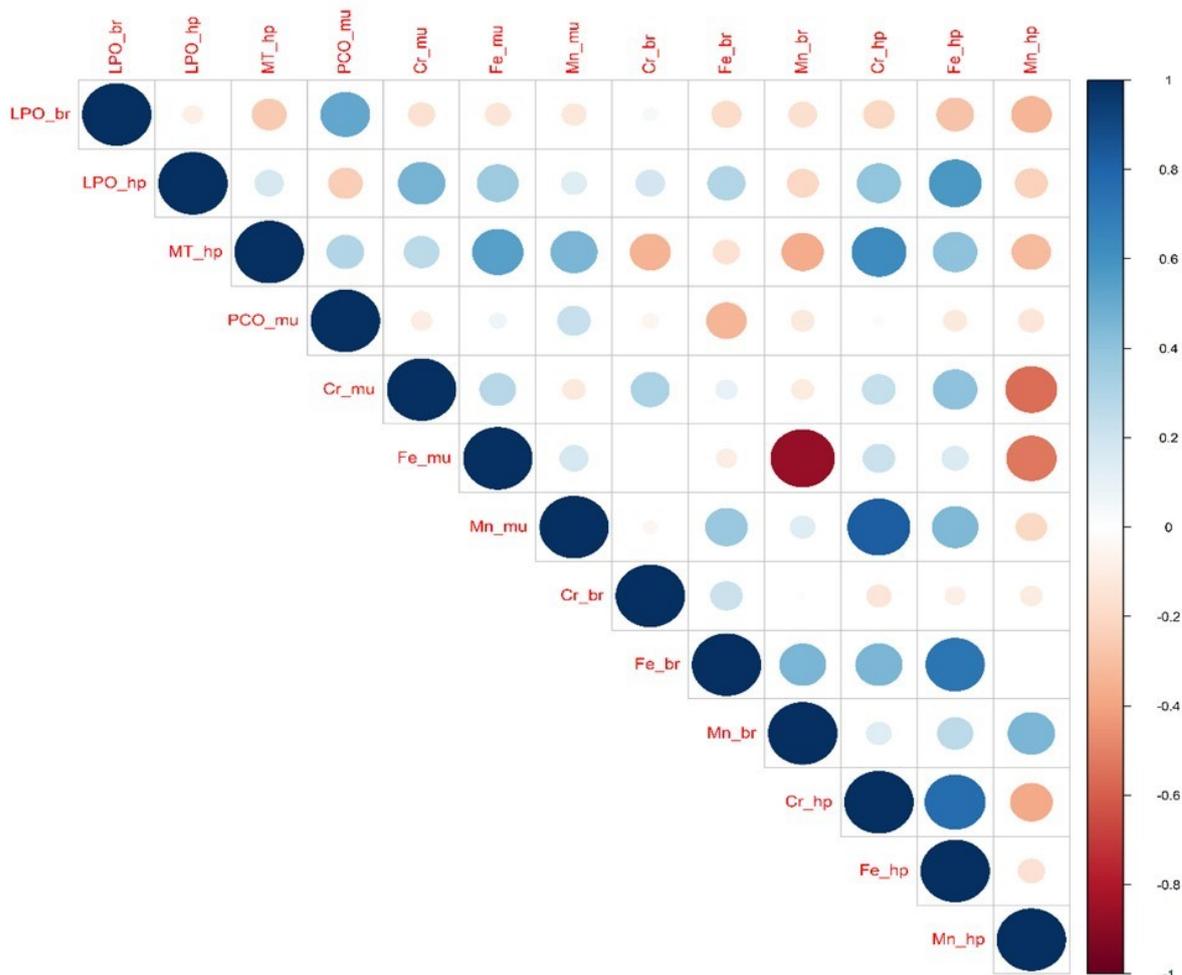
Figura 117: Representação gráfica da Análise de Componentes Principais (PCA) realizada. A posição entre setas indica relações entre variáveis. A cor indica a contribuição da referida variável para o componente principal (PC1).



Fonte: Autoria própria.

Neste resultado, podemos observar que existe uma correlação entre a acumulação de Fe para todos os tecidos (brânquias, hepatopâncreas e músculo) e Cr no hepatopâncreas com os biomarcadores LPO e MT também no hepatopâncreas. Realizando uma nova comparação par a par (Pearson), podemos observar melhor estas correlações existentes (Figura 118).

Figura 118: Representação gráfica de correlações (Pearson) par a par entre as variáveis estudadas. Correlações positivas são exibidas em azul e negativas na cor vermelha. A intensidade da cor e o tamanho do círculo são proporcionais aos coeficientes de correlação. São mostradas apenas correlações significativas ( $p < 0.05$ ).

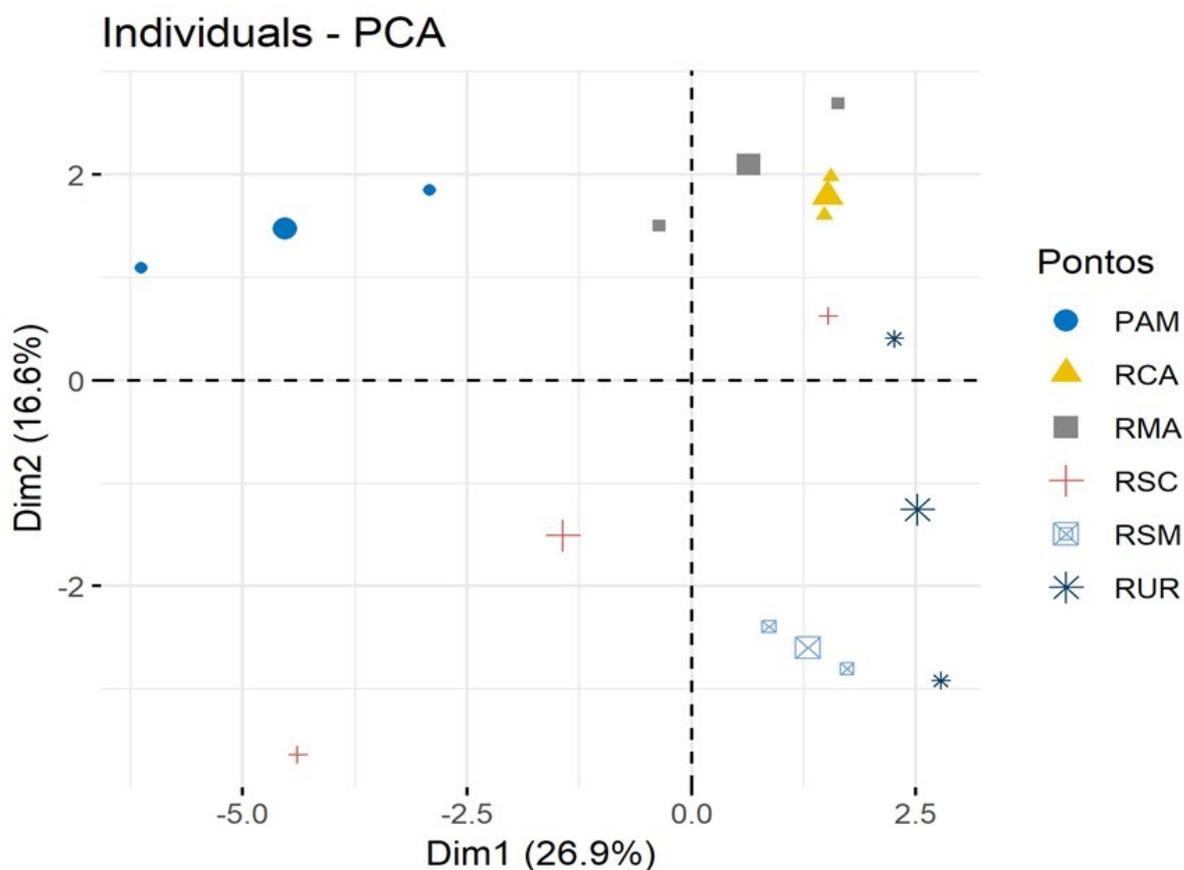


Fonte: Autoria própria.

Neste caso, fica mais claro a existência de correlação positiva entre os metais Fe em todos os tecidos, Cr no hepatopâncreas e Mn no músculo. Além disso, observa-se correlação positiva entre os biomarcadores LPO e MT no hepatopâncreas e brânquias, bem como uma correlação entre o Fe e LPO no hepatopâncreas, Fe e MT no hepatopâncreas, bem como entre Cr e MT no hepatopâncreas.

Por fim, quando realizamos uma avaliação visual do agrupamento dos pontos de amostragem do mangue, em função das variáveis analisadas, não observamos diferenças significativas entre os pontos (Figura 119).

Figura 119: Representação gráfica da PCA do agrupamento ponto a ponto em função das estações de coleta do monitoramento do manguezal.



Fonte: Autoria própria.

A partir dos resultados dos relatórios anteriores pode-se observar que o rompimento da barragem teve um impacto imediato nas condições de química da água e concentração de sólidos em suspensão (UFES, 2016). Com isso, foi observado um aumento expressivo de vários metais dissolvidos e totais na água. Dentre estes, destacamos que Cr, Fe e Mn tiveram grande elevação com a passagem da pluma (UFES, 2016).

Os resultados obtidos para o presente monitoramento mostraram níveis elevados dos mesmos metais (Cr, Fe e Mn) presentes no evento agudo em todos os tecidos de ambas as espécies de caranguejos quando comparamos com dados publicados em ambientes conhecidamente contaminados por estes metais. Por exemplo, em relação ao Cr estudos realizados em locais como Baía de Curuçá (PA), Baía de Todos os Santos (BA) e Cubatão (SP) também realizados com *U. cordatus* reportaram níveis de acumulação nos tecidos abaixo dos encontrados no presente estudo (Pinheiro et al. 2012; Ramos et al. 2012; Silva et al. 2018). Estes resultados apontam para a contaminação por metais nos manguezais analisados.

Com relação ao Fe (Ver Tabela 37 e Quadro 28), podemos observar níveis de contaminação tecidual acima do que encontrado em tecidos de *U. cordatus* coletados em um ponto considerado contaminado no litoral de Santos – SP (2.51 µg. g<sup>-1</sup> para músculo, 1.43 µg. g<sup>-1</sup> para brânquias, e 9.3 µg. g<sup>-1</sup> para

hepatopâncreas) (Harris et al. 2000). Em outro estudo realizado com a espécie *Cardisoma crassum*, pertencente ao mesmo gênero *C. guanhama*, valores semelhantes aos do presente estudo foram encontrados tanto na estação de seca (12.3  $\mu\text{g. g}^{-1}$  brânquias) quanto chuvosa (49.6  $\mu\text{g. g}^{-1}$ , músculo) em uma região que recebe aporte de contaminação em Puerto Vallarta – México (Rodrigues-Saldana et al. 2018). Como podemos observar, os altos níveis de Fe encontrados na literatura para diferentes locais contaminados estão ou abaixo ou na mesma faixa de concentração dos resultados obtidos para o presente monitoramento, demonstrando alta contaminação com Fe em praticamente todas estações de mangue avaliadas.

Para o Manganês (Mn), também foram observados níveis elevados nas estações de manguezal monitoradas (ver Tabela 37 e Quadro 28). Por exemplo, em um estudo realizado no Rio Jequitinhonha no sul da Bahia com a espécie *Goniopsis cruentata*, também utilizado em nosso monitoramento, foram observados níveis de Mn na mesma faixa de concentração observado em nosso monitoramento para o músculo (1.8  $\mu\text{g. g}^{-1}$ ), hepatopâncreas (27  $\mu\text{g. g}^{-1}$ ) e brânquias (57  $\mu\text{g. g}^{-1}$ ) (Carneiro et al. 2018). Por outro lado, em um estudo com a espécie *Portunus pelagicus* realizado na Baía do Kuwait, a qual recebeu grande aporte de contaminação por metais na época da Guerra do Golfo, baixos níveis de Mn foram encontrados no músculo (2.1  $\mu\text{g. g}^{-1}$ ), brânquias (1.1  $\mu\text{g. g}^{-1}$ ) e hepatopâncreas (1.6  $\mu\text{g. g}^{-1}$ ) (Al Mohama et al. 2001) quando comparados com nossos dados de monitoramento (ver Tabela 37). Portanto, da mesma forma como observado para os outros dois metais (Cr e Fe), alta bioacumulação de Mn foi observada nos caranguejos avaliados.

Tal fato demonstra existir evidências bastante claras que o evento de rompimento da barragem acarretou em contaminação do ambiente de manguezal (água e/ou sedimento) (UFES, 2016). Com a biodisponibilidade destes contaminantes uma bioacumulação por Cr, Fe e Mn foi observado em todos os tecidos de ambos os caranguejos analisados. Quando comparamos os resultados de bioacumulação com a literatura, observamos níveis bem acima do que foi reportado em estudos realizados em ambientes considerados contaminados (Harris et al., 2000; Al Mohama et al., 2001; Pinheiro et al., 2012; Ramos et al., 2012; Hwang et al., 2017; Carneiro et al., 2018; Rodrigues-Saldana et al., 2018; Silva et al., 2018). Portanto, estes resultados demonstram que, após três anos do rompimento, o ambiente de manguezal e sua biota foram impactados pelo rompimento da barragem, sendo estas evidências classificadas como sendo de segundo grau (dados biológicos em nível de organismo). A partir destes resultados, o próximo passo é avaliar se o aumento pronunciado destes metais na biota do mangue está causando algum efeito a nível bioquímico, através da avaliação sobre biomarcadores de efeito e de exposição.

Quando analisamos os resultados obtidos para os biomarcadores (Média  $\pm$  EP), foi observada uma alta variabilidade dos dados. Isso pode estar ocorrendo pelo fato dos animais terem sido coletados diretamente no ambiente. Tal variabilidade pode estar relacionada às características físico-químicas e geológicas dos diferentes locais de coleta. Além disso, não podemos descartar a hipótese de estar ocorrendo uma alta variabilidade intraespecífica relacionadas a idade, gênero, tamanho, senescência

ou populações, mascarando possíveis efeitos dos metais. Portanto, partimos para estudos de correlação, através da análise de componentes principais (PCA).

Quando correlacionamos todos os componentes (metais e biomarcadores, por tecido), observamos várias correlações positivas entre eles. Realizando uma nova PCA, filtrando somente as correlações positivas, observamos novamente uma correlação positiva para Fe e Cr no músculo, Fe e Mn no hepatopâncreas e dos biomarcadores LPO e MT no hepatopâncreas (Figura 117). A partir disso, realizamos comparações par a par (Correlações de Pearson), entre todas estas variáveis (Figura 118). Nesta análise, observamos existir correlações positivas entre Cr e Fe no músculo e hepatopâncreas e Fe e Mn nas brânquias. Esses resultados demonstram que todos estes metais (Cr, Fe e Mn) aumentaram nos tecidos em um mesmo evento agudo. Estas evidências corroboram com os resultados de bioacumulação de metais apresentados acima, mostrando terem surgido de uma fonte única de contaminação, possivelmente os metais disponibilizados pelo rompimento da barragem. Além disso, a análise de correlação de Pearson mostrou existir correlação positiva entre o Fe e LPO no hepatopâncreas. Tal resultado, demonstra que o aumento na LPO no hepatopâncreas ocorreu concomitantemente com um aumento nos níveis de Fe. Entretanto, quando avaliamos possíveis correlações positivas nos diversos pontos do monitoramento do mangue, não conseguimos observar a existência de correlações fortes entre os pontos de coleta (Figura 119).

Apesar do Fe ser importante em diversos processos fisiológicos, altos níveis deste metal nos organismos podem conduzir a um aumento na geração de espécies reativas de oxigênio (ERO) a qual pode promover a geração de danos oxidativos, principalmente peroxidação lipídica (LPO) (Sies, 2000; Halliwell, 2009; Boveris et al., 2012). Isso ocorre pelo fato de que o Fe quando está disponível nos sistemas biológicos reage com ERO, principalmente radical ânion superóxido ( $O_2^{\bullet-}$ ) e peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), através da reação de Fenton (Figura 120). Como resultado, o radical hidroxila ( $\bullet OH$ ), considerado a espécie reativa de oxigênio mais nociva a constituintes biológicos, aumenta muito nos tecidos, podendo conduzir a danos em macromoléculas como proteínas, lipídios de membrana e DNA (Sies, 2000; Halliwell e Gutteridge, 2007; Luschack et al., 2015). Como em nosso monitoramento observamos existir correlação entre os níveis de Fe e de LPO no hepatopâncreas, e o mecanismo bioquímico que relaciona estes dois fatores estar bem fundamentada na literatura (Figura 120), sugerimos que danos oxidativos (LPO) ocorreram em função da bioacumulação de Fe em algum momento desde o evento agudo do rompimento da barragem aos ambientes de manguezal estudados até o presente monitoramento.

Figura 120: Sequência química da reação de Fenton.

### Sequência da Reação de Fenton



Fonte: Adaptado de Halliwell e Gutteridge, 2017.

Portanto, em vista dos resultados apresentados, são levantadas hipóteses para explicar o que pode estar ocorrendo no ambiente de manguezal. Uma hipótese seria o possível processo de aclimatização dos caranguejos aos metais. Quando os animais são expostos a diversos estressores de forma crônica, ocorrem alterações nas funções moleculares, bioquímicas e fisiológicas a fim de aumentar a tolerância destas espécies ao estressor, neste caso específico os metais. A fim de evitar a geração de danos biológicos, e com isso levar a situação de estresse oxidativo, os organismos investem energia para manter as suas defesas antioxidantes altas (Storey et al., 1996, Halliwell e Guteridge, 2017). Dentre as defesas antioxidantes, modulações nas atividades das enzimas superóxido dismutase (SOD), catalase, glutathione peroxidase (GPX) e glutathione s-transferase (GST), ou de constituintes não enzimáticos como tripeptídeo glutathione (GSH) podem estar ocorrendo (Storey et al., 1996; Halliwell e Guteridge, 2015). Isso levaria uma diminuição dos níveis de ERO, levando também a uma diminuição na geração de danos oxidativos, como, por exemplo, a LPO. Portanto, a resposta dos biomarcadores avaliados poderia estar sendo mascarada pela modulação das defesas dos organismos em função do processo de aclimatização. Entretanto, se pensarmos que toda função bioquímica e/ou fisiológica necessita de energia na forma de trifosfato de adenosina (ATP) para ser mantida e que a necessidade de aumentar a eficiência de uma função acarreta mais uso de ATP em detrimento da manutenção de outras funções, justificaria avaliar nos próximos monitoramentos conjuntamente aos presentes biomarcadores, os constituintes do sistema antioxidante, e constituintes do metabolismo aeróbico e anaeróbico.

Uma outra hipótese seria em relação aos biomarcadores utilizados. Inicialmente, os biomarcadores escolhidos neste projeto são ferramentas de avaliação biológica em situações de estresse agudo. Por exemplo, tais biomarcadores (LPO, PCO e MT) deveriam ter sido utilizados para monitorar a biota logo após o evento de rompimento ou pouco tempo após este evento. Pelo simples fato de o acidente ter ocorrido a mais de três anos, os efeitos dos metais na biota do mangue podem estar ocorrendo em níveis biológicos mais altos. Neste caso, justificaria nos próximos monitoramentos avaliar possíveis biomarcadores de estresse crônicos, como por exemplo ferramentas que avaliam o crescimento e a reprodução destas espécies.

Os resultados observados neste primeiro monitoramento, realizado na estação de seca, podem ser completamente diferentes dos resultados do seguinte monitoramento (estação chuvosa), na qual o Anexo 1 já possui as amostras. Por exemplo, na estação de chuva a alta pluviosidade pode disponibilizar os metais da matriz sedimentar para a coluna d'água, e com isso, aumentar a disponibilidade do metal no ambiente. Portanto, não se descarta que diferentes respostas biológicas podem ser acionadas pela biota de manguezal em diferentes estações o que mostraria evidências relacionadas a sazonalidade.

### 7.3 CONCLUSÃO

De maneira geral, fica claro que a biota do ambiente de manguezal do presente relatório, inclusive os pontos que perfazem as áreas de preservação ambiental, foi impactada pelo rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG), através dos altos níveis de Cr, Fe e Mn nas brânquias, hepatopâncreas e músculo das espécies analisadas. Um possível processo de aclimatização pode ter ocorrido, mesmo existindo uma correlação positiva entre Fe e LPO e um mecanismo bioquímico que demonstram relação causa/efeito entre estes dois componentes. Nos próximos monitoramentos sugere-se incluir ensaios que abordem os componentes do sistema antioxidante (enzimas e antioxidantes de baixo peso molecular), metabolismo (componentes do metabolismo aeróbico e anaeróbico), crescimento e reprodução.

#### 7.4 REFERÊNCIAS

- Al-mohanna, S. Y., & Subrahmanyam, M. N. V. (2001). Flux of heavy metal accumulation in various organs of the intertidal marine blue crab, *Portunus pelagicus* (L.) from the Kuwait coast after the Gulf War. *Environment International*, 27 (4), 321-326.
- Bolognesi, C., & Fenech, M. (2012). Mussel micronucleus cytome assay. *Nature protocols*, 7 (6), 1125.
- Boveris, A., Musacco-Sebio, R., Ferrarotti, N., Saporito-Magriñá, C., Torti, H., Massot, F., & Repetto, M. G. (2012). The acute toxicity of iron and copper: biomolecule oxidation and oxidative damage in rat liver. *Journal of Inorganic Biochemistry*, 116, 63-69.
- Carneiro, L. M., da Silva, D. J., dos Reis, L. C., de Oliveira, D. A., Maciel, L. D. C., Garcia, K. S., & Queiroz, A. F. D. S. (2018). Distribution of trace elements in tissues of *Goniopsis cruentata* (Latreille, 1803) Caught from south of Bahia/Brazil mangroves and potential of risk assessment in consumption. *Química Nova*, 41 (9), 959-968.
- Halliwell, B. (2009). The wanderings of a free radical. *Free Radical Biology and Medicine*, 46 (5), 531-542.
- Halliwell, B. (2007). Biochemistry of oxidative stress. *Biochemical Society Transactions*, 35 (5), 1147-1150.
- Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (2015). *Free radicals in biology and medicine*. Fifth Edition. Oxford University Press, USA.
- Halliwell, B., & Gutteridge, J. M. C. (2007). Oxygen is a toxic gas - an introduction to oxygen toxicity and reactive species. *Free Radical Biology and Medicine*, 4, 179-186.
- Harris, R. R., & Santos, M. C. F. (2000). Heavy metal contamination and physiological variability in the Brazilian mangrove crabs *Ucides cordatus* and *Callinectes danae* (Crustacea: Decapoda). *Marine Biology*, 137 (4), 691-703.
- Hwang, D. W., Choi, M., Lee, I. S., Shim, K. B., & Kim, T. H. (2017). Concentrations of trace metals in tissues of *Chionoecetes* crabs (*Chionoecetes japonicus* and *Chionoecetes opilio*) caught from the East/Japan Sea waters and potential risk assessment. *Environmental Science and Pollution Research*, 24 (12), 11309-11318.
- Lushchak, V. I. (2015). Free radicals, reactive oxygen species, oxidative stresses and their classifications. *The Ukrainian Biochemical Journal*, 87 (6), 11-18.
- Pinheiro, M. A. A., e Silva, P. P. G., de Almeida Duarte, L. F., Almeida, A. A., & Zanotto, F. P. (2012). Accumulation of six metals in the mangrove crab *Ucides cordatus* (Crustacea: Ucididae) and its food source, the red mangrove *Rhizophora mangle* (Angiosperma: Rhizophoraceae). *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 81, 114-121.

Ramos, M. A. V. (2012). Avaliação preliminar dos teores de metais traço em peixes e crustáceos provenientes da Porção Norte da Baía de Todos os Santos, Bahia-Brasil. Dissertação (Mestrado). Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Centro de Ciências Agrárias, Ambientais e Biológicas. Cruz das Almas, BA. 87p.

Rodríguez-Saldaña, V., González-Farías, F., & Miranda-Navarro, S.V. (2018). Bioaccumulation of metal (loid) s in *Cardisoma crassum* and pollution assessment in a mangrove protected area in Mexico. *Environmental monitoring and assessment*, 190 (12), 732.

Sies, H. (2000). What is oxidative stress? In: *Oxidative stress and vascular disease*, 224,1-8. Springer, Boston, MA.

## **8 SUBPROJETO: MONITORAMENTO DE AVES**

### **8.1 OBJETIVO**

O monitoramento ecotoxicológico das aves está baseado em (a) determinações laboratoriais das concentrações de metais e de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio em amostras de sangue e penas de contorno de aves capturadas vivas; ou (b) através de determinações laboratoriais das concentrações de metais e de isótopos estáveis de carbono e nitrogênio em amostras de sangue, músculo peitoral, fígado, penas de contorno e osso, bem como do conteúdo estomacal de aves abatidas ou encontradas mortas.

### **8.2 RESULTADOS E DISCUSSÃO**

Conforme definido no Plano de Trabalho, o monitoramento ecotoxicológico das aves está sendo realizado sazonalmente (período seco e período chuvoso). No presente relatório serão descritos os resultados obtidos a partir das análises das amostras de aves coletadas no período seco (setembro-outubro/2018). Porém, cabe ressaltar que as amostras referentes ao período chuvoso (janeiro/fevereiro/2019) já foram coletadas e encontram-se devidamente armazenadas nos laboratórios da Universidade Federal do Rio Grande - FURG (Rio Grande, RS) e serão analisadas a partir do mês de abril/2019.

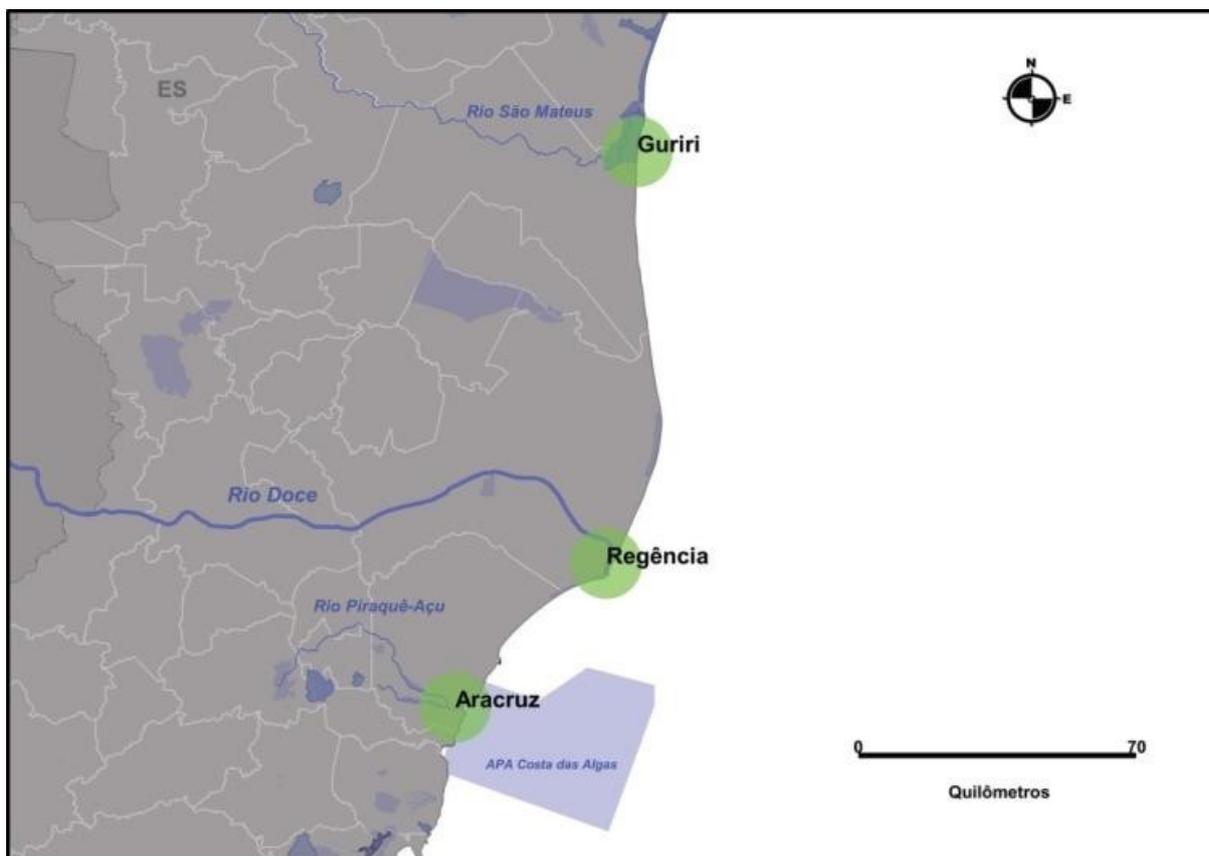
As atividades de campo para coleta das amostras de aves foram realizadas pela TEIA – Projetos Ambientais Ltda em regiões estuarinas, manguezais e costeiras nos municípios de Aracruz, Linhares e São Mateus no estado do Espírito Santo (Figura 121). A execução destas atividades foi realizada conforme o contrato nº 032/2018 celebrado com a Fundação de Apoio à Universidade do Rio Grande (FAURG), através do Processo Licitatório nº 462/2018 – Dispensa de Licitação, art. 24, XXI. Os dados apresentados no presente relatório são referentes à primeira campanha executada durante o período de 16 de setembro a 11 de outubro de 2018.

A coleta de amostras foi realizada conforme os hábitos alimentares das aves relacionadas aos ambientes dulcícola e estuarino nos ambientes de estuário, mangues e litoral de três áreas amostrais: estuário do Rio Doce - Linhares (ES); manguezal na foz do Rio Piraquê-açú – Aracruz (ES); e costa adjacente à foz do Rio Doce Norte e Sul (Figura 121). A representatividade das amostras seguiu os exemplos e prioridades estabelecidas no Plano de Trabalho do Anexo 1 - Ecotoxicologia (Quadro 29). Porém, quando não foi observada a ocorrência de representante de uma determinada guilda, esta foi substituída por outras guildas, desde que seus representantes possuíssem hábitos alimentares relacionados em ambientes dulcícola e estuarino nos ambientes de estuário, mangue e litoral. Com isso, optou-se por substituir espécies de aves que contemplavam guildas tróficas específicas (i.e. filtradores e malacófagos) e que, de fato, não ocorreram em certas áreas amostradas por táxons com outras representatividades em seus hábitos alimentares, como as seguintes guildas tróficas e

respectivas espécies: Onívoros, consumidores de invertebrados, pequenos vertebrados e frutos (exemplos: *Cuculidae/Crotophaga major*, *Tyrannidae/Pitangus sulphuratus*, *Mimidae/Mimus gilvus*, *Thraupidae/Conirostrum bicolor*) e Insetívoros, consumidores de pequenos invertebrados aquáticos e terrestres (exemplos: *Dendrocolaptidae/Dendroplex picus*, *Tyrannidae/Fluvicola nengeta*, *Furnariidae/Furnarius figulus*, *Certhiaxis cinnamomeus*, *Hirundinidae/Tachycinetta albiventer*). As espécies aqui citadas possuem associação com ambientes de mangue, restinga, corpos d'água e ou podem estar presentes em ambientes dulcícola e estuarino (Sick, 1996; Sigrist, 2006).

Todas as aves amostradas receberam uma numeração sequencial de três dígitos (#000), correspondente ao indivíduo da espécie que foi amostrada, independentemente do método (captura, coleta ou recolhimento). A amostra e o material referente à ave amostrada receberam uma etiqueta ou marcação, com a respectiva numeração de campo. Cada número de campo possui informações do nome científico, local da amostra com coordenadas geográficas, data da amostra, nome do coletor, método de obtenção da amostra, outras informações e observações pertinentes. As informações correspondentes à relação das amostras obtidas foram organizadas pela sequência dos números de campo e tabulada em arquivo Excel.

Figura 121: Mapa amostral da campanha de monitoramento das aves nas três áreas de coleta no Espírito Santo.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 29: Lista das famílias de aves estuarinas, de manguezais e da região costeira previstas para serem amostradas no monitoramento de contaminantes, com seu respectivo hábito alimentar e exemplo de espécies a serem priorizadas quando presentes na área amostral.

Hábito Alimentar/Guilda Trófica	Famílias	Espécies priorizadas
Invertebrados aquáticos, ovos e larvas de anfíbios, pequenos vertebrados e de origem vegetal.	Anseridae, Rallidae, Charadriidae, Scolopacidae	<i>Charadrius collaris</i> , <i>Actitis macularius</i> , <i>Aramides saracura</i> , <i>Gallinula galeata</i>
Filtradores, plantas aquáticas e invertebrados	Anatidae	<i>Dendrocygna autumnalis</i> , <i>Dendrocygna viduata</i> , <i>Amazonetta brasiliensis</i>
Peixes e invertebrados aquáticos	Podicipedidae, Ardeidae, Cerylidae	<i>Egretta caerulea</i> , <i>Egretta thula</i> , <i>Chloroceryle americana</i>
Piscívoras	Phalacrocoracidae, Sternidae, Rhynchopidae, Alcedinidae	<i>Phaetusa simplex</i> , <i>Rynchops niger</i>
Malacófagos	Acciptridae*, Aramidae	* <i>Rostrhamus sociabilis</i>

Fonte: Autoria própria.

As capturas de aves foram realizadas com o uso de redes com malha de 20 mm e/ou 35 mm x 6 ou 9 ou 12 m, instaladas nos diferentes ambientes das áreas pré-definidas com auxílio de hastes de alumínio e cordas (Figura 122). A quantidade de redes utilizadas variou diante das condições ambientais dos locais de coleta, tendo sido utilizadas no máximo dez redes. O esforço de captura se deu pelo menos ao longo de dois dias/noites consecutivos ou alternados. As aves capturadas (Figura 123) foram acondicionadas em sacos de tecido e levadas até um local próximo das redes (Figura 124), onde foram realizadas a manipulação, identificação, coleta de amostras e posterior liberação de cada ave.

Nas aves capturadas vivas, foram coletadas as seguintes amostras: sangue (máximo de 1% da massa corporal da ave; coleta em microtubo ou frasco de 1,5 ml, sem anticoagulante); e penas de contorno e penas em crescimento (mínimo de 5 a 10 penas, para ambos os tipos de penas). A coleta de sangue das aves vivas foi realizada após a limpeza do local com álcool gel 70% e a avaliação da condição física do estado de estresse da ave. Visando reduzir o nível de estresse, optou-se pela colheita do sangue com agulha de insulina, através de punção da veia ulnar (Figura 125), ou pelo corte de uma das unhas no caso de espécimes de menor massa corporal (Figura 126). A quantidade de sangue coletado variou no máximo de 0,2 ml nas aves menores a até 2 ml nas aves com massa corporal superior a 500 g. Após a colheita de sangue, o frasco contendo a amostra foi mantido refrigerado até ser congelado. A retirada das penas de crescimento e de contorno foi realizada manualmente com o auxílio de uma pinça (Figura 127). As amostras de penas foram acondicionadas em sacos plásticos e mantidas refrigeradas, até serem congeladas.

As coletas foram realizadas através do recolhimento de aves encontradas mortas nas áreas amostradas e com os usos de carabinas de ar comprimido (Gamo CFX 4,5; Gamo Black Maxxim 5,5;

e pistola Beemam 4,5). Os esforços de coletas foram complementares e direcionados às espécies não capturadas nas redes de neblinas. Cada ave coletada foi individualmente acondicionada em saco plástico, e tão logo possível, foi mantida refrigerada em caixa térmica com gelo ou congelada, até ser preparada em laboratório. No laboratório, foi realizada a coleta das seguintes amostras (Figura 128): sangue coagulado, tecidos do músculo peitoral, parte do fígado e um osso (fêmur). Após isso, foi realizada a identificação do sexo da ave, através da visualização das gônadas (Figura 129) e a retirada do trato digestório para separação do conteúdo estomacal, completando assim a coleta das amostras das aves mortas (Figura 130 e Figura 131). Em seguida, foi realizada a taxidermia dos espécimes (Figura 132). As aves taxidermizadas foram provisoriamente acondicionadas em sacos plásticos lacrados e posteriormente acondicionadas a seco em caixa de isopor (Figura 133), até o transporte para o Instituto de Ciências Biológicas da FURG, em Rio Grande/RS.

Para todas as aves amostradas foram tomadas anotações de morfometria, muda das penas, idade, sexo, peso da ave e, quando presente, foram coletados ectoparasitas e endoparasitas. Para as aves coletadas foram adicionalmente anotados o peso total do conteúdo estomacal, coletada a carcaça da ave após a coleta das amostras e realizada a taxidermia da pele do indivíduo, visando o aproveitamento científico e tombamento na Coleção de Aves da FURG (CAFURG). As amostras, exceto as peles taxidermizadas, foram mantidas congeladas. Após o encerramento da campanha, as amostras e peles taxidermizadas foram transportadas via terrestre até o Instituto de Ciências Biológicas da FURG, em Rio Grande, RS.

Figura 122: Rede de captura para aves instalada na primeira campanha do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 123: Ave capturada em rede instalada na primeira campanha do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 124: Base de apoio para triagem, manipulação e coleta de amostras das aves capturadas na primeira campanha do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 125: Coleta de amostra de sangue através da punção na veia ulnar de ave capturada durante a primeira campanha do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 126: Coleta de amostra de sangue através do corte da unha de ave capturada na primeira campanha do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 127: Coleta de amostra de pena de ave capturada na primeira campanha do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 128: Coleta, em laboratório, de amostras das aves capturadas na primeira campanha do Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 129: Determinação, em laboratório, do sexo de ave coletada durante a primeira campanha do Anexo 1, através da visualização das gônadas (testículos).



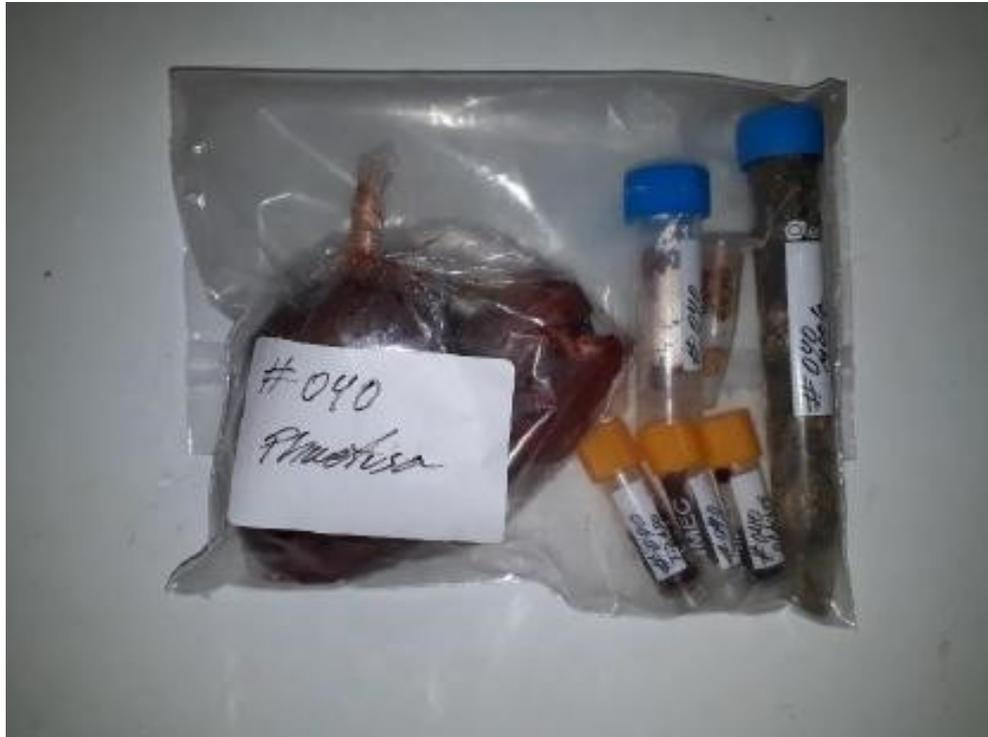
Fonte: Autoria própria.

Figura 130: Exemplo de amostras obtidas, em laboratório, durante a preparação das aves coletadas na primeira campanha Anexo 1.



Fonte: Autoria própria.

Figura 131: Exemplo de amostras obtidas de ave coletada na primeira campanha do Anexo 1 e prontas para serem congeladas.



Fonte: Autoria própria.

Figura 132: Aves taxidermizadas e acondicionadas provisoriamente até serem transportadas para a FURG (Rio Grande, RS), visando o aproveitamento científico e tombamento na Coleção de Aves desta Instituição.



Fonte: Autoria própria.

Figura 133: Aves taxidermizadas e acondicionadas para transporte via terrestre até o Instituto de Ciências Biológicas da FURG (Rio Grande, RS).



Fonte: Autoria própria.

A primeira campanha do Anexo 1 para a coleta de aves teve início no dia 16/09/2018, com o deslocamento da equipe para Vitória/ES. No dia 17/09/2018 foi realizado o treinamento de SST na Universidade Federal do Espírito Santo (UFES). Posteriormente, a equipe se deslocou para as áreas de coleta de aves nos municípios de Aracruz/ES (mangue: 18 a 24/09/2018); Regência/ES (estuário e litoral: 25/09/2018 a 02/10/2018) e São Mateus/ES (litoral, estuário e mangue: 03 a 10/10/2018). Em cada área amostral foram instaladas redes de captura em locais propícios à presença das espécies alvo do estudo (Quadro 29), bem como efetuadas as coletas de maneira oportuna, através de traslado na área amostral e ou através de locais estratégicos para a obtenção das aves, conforme apresentado no Quadro 30.

Quadro 30: Lista dos locais amostrados e respectivos métodos utilizados em cada local, no período de 18/09/2018 a 10/10/2018, durante a realização da primeira campanha do Anexo 1.

Município	Localidade	Coordenadas (DATUM WGS 84)	Método
Aracruz	Mangue Pontal Piraque-açú	19°57'0.28"S, 40° 9'23.98"O	Captura
		19°57'0.44"S, 40° 9'19.70"O	
		19°57'0.85"S, 40° 9'24.15"O	
		19°57'1.19"S, 40° 9'23.11"O	
		19°57'1.24"S, 40° 9'19.87"O	
		19°56'59.30"S, 40° 9'25.80"O	Coleta
		19°57'0.76"S, 40° 9'18.33"O	
		19°57'0.76"S, 40° 9'18.33"O	

Município	Localidade	Coordenadas (DATUM WGS 84)	Método
		19°57'0.80"S, 40° 9'17.8"O	
	Manguezal Piraque-açú	19°57'17.1"S, 40°10'18.5"O	
	Mangue Pontal Piraque-açú	19°57'7.60"S, 40° 9'49.3"O	
Regência Augusta	Estuário Fóz Rio Doce, Ilha	19°37'20.25"S, 39°48'53.04"O	Captura
		19°37'20.68"S, 39°48'54.62"O	
		19°37'20.85"S, 39°48'56.40"O	
		19°37'21.13"S, 39°48'58.63"O	
	Estuário Fóz Rio Doce	19°38'1.81"S, 39°49'26.56"O	
		19°38'3.57"S, 39°49'26.67"O	
		19°38'7.46"S, 39°49'26.13"O	
	Estuário Fóz Rio Doce, Ilha	19°36'59.95"S, 39°48'53.79"O	Coleta
		19°37'13.60"S, 39°49'1.70"O	
		19°37'18.63"S, 39°48'58.26"O	
		19°37'20.07"S, 39°48'59.23"O	
		19°37'49.60"S, 39°49'20.00"O	
Estuário Fóz Rio Doce	19°38'22.95"S, 39°48'57.38"O		
	19°38'27.22"S, 39°49'26.70"O		
	19°38'5.56"S, 39°49'26.72"O		
São Mateus	Praia de Guriri	19°38'7.46"S, 39°49'26.13"O	Coleta
		18°36'30.31"S, 39°43'44.86"O	
		18°36'36.51"S, 39°43'40.83"O	
		18°36'42.13"S, 39°43'44.57"O	
		18°37'2.00"S, 39°43'52.23"O	
	Praia de Guriri	18°36'21.31"S, 39°43'39.01"O	Coleta
		18°36'23.8"S, 39°43'50.4"O	
		18°36'31.23"S, 39°44'09.27"O	
		18°36'32.81"S, 39°43'39.92"O	
		18°37'52.73"S, 39°44'10.31"O	
		18°37'57.10"S, 39°44'12.45"O	
	Praia de Guriri	18°40'56.73"S, 39°44'42.01"O	Recolhimento
18°37'0.99"S, 39°43'50.06"O			
		18°38'49.53"S, 39°44'22.47"O	

Fonte: Autoria própria.

### 8.2.1 Área 1 - Aracruz/ES (mangue)

Nesta área foram realizadas as capturas e coletas de aves na localidade de Pontal Piraquê-Açu, próximo à praia de Coqueiral. As redes de captura foram instaladas na borda do mangue (Figura 134), bem como no seu interior (Figura 135). Foram utilizadas as redes em locais disponíveis de acesso e instalação durante quatro dias e, devido à variação diária da maré, que inundava todo estrato baixo do mangue (Figura 135), houve a necessidade de antecipação do fechamento das redes (Figura 136), desprendendo-se, para tanto, um esforço de 28 h e 30 min (Quadro 31).

Através do método de captura foram obtidas amostras de 29 indivíduos referentes a 13 espécies de aves, que representaram oito guildas tróficas. Por sua vez, através de disparos com armas de ar comprimido foram obtidas amostras de seis indivíduos referentes a seis espécies de aves, que representaram quatro guildas tróficas. Nesta primeira área de coleta, foram obtidas amostras de 35 indivíduos referentes a 16 espécies de aves: *Actitis macularis* (Figura 137), *Amazilia versicolor*, *Charadrius semipalmatus*, *Chloroceryle americana* (Figura 138), *Columbina talpacoti*, *Conirostrum bicolor* (Figura 139), *Crotophaga major*, *Dendroplex picus* (Figura 140), *Egretta caerulea* (Figura 141), *Euphonia violacea*, *Myiarchus tyrannulus*, *Myiozetes similis*, *Nyctanassa violacea* (Figura 142), *Paroaria dominicana* e *Pitangus sulphuratus*. Estas espécies representaram oito guildas tróficas: frugívoro (n=1), granívoro (n=2), insetívoro (invertebrados terrestres e aquáticos, n=6), invertebrados aquáticos (n=3), nectarívoro e insetívoro (n=2), onívoro (12), piscívoro (n=5), piscívoro e invertebrados aquáticos (n=3).

Quadro 31: Lista do esforço amostral para obtenção das amostras de aves através do método de captura com auxílio de redes de captura, em Aracruz/ES, durante a execução da primeira campanha da expedição RRDM/FAURG.

Data	Nº de redes	Horário de Abertura	Horário de Fechamento	Esforço diário (Horas)	Esforço Total
21/09/2018	6	7:00	14:00	7 horas	28 horas e 30 min
21/09/2018		16:00	18:30	4 horas e 30 min	
22/09/2018		5:00	14:00	9 horas	
24/09/2018		4:00	12:00	8 horas	

Fonte: Autoria própria.

Figura 134: Rede para captura de aves instalada no mangue do Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 135: Mangue com a influência da maré alta no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 136: Rede para captura de ave, fechada devido a maré alta, no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 137: Indivíduo de *Actitis macularis*, coletado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 138: Indivíduo de *Chloroceryle amazona*, capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 139: Indivíduo de *Conirostrum bicolor*, capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 140: Indivíduo de *Dendroplex picus*, capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 141: Indivíduo de *Egretta caerulea* capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 142: Indivíduo de *Nyctanassa violacea* capturado no ambiente de mangue no Pontal do Piraquê-Açu, em Aracruz/ES.



Fonte: Autoria própria.

### 8.2.2 Área 2 - Regência/ES (estuário e litoral)

Nesta área foram realizadas as capturas e coletas de aves na foz do Rio Doce, onde foi despendido esforços nas proximidades do porto da cidade de Regência, no braço/canal do rio e nas ilhas próximas da foz do rio (Quadro 32). Para obter acesso aos locais das amostras foram utilizados barco e caiaques,

bem como realizado acessos caminhando pela praia. Para atingir a borda da margem do rio foram utilizadas estradas existentes, com auxílio de veículo 4x4. As redes de captura foram instaladas numa das ilhas do rio (Figura 143 e Figura 144), nas margens do braço/canal do rio (Figura 145) e sobre o braço/canal do rio (Figura 144 e Figura 146). Foram utilizadas as redes para captura de aves durante cinco dias, sendo despendido um esforço de 46 h e 30 min (Quadro 32). Através do método de captura foram obtidas amostras de 24 indivíduos referentes a 15 espécies de aves, que representaram sete guildas tróficas. Por sua vez, através de disparos com armas de ar comprimido, foram obtidas amostras de nove indivíduos referentes a nove espécies de aves, que representaram seis guildas tróficas. Portanto, na segunda área, foram coletadas amostras de 33 indivíduos referentes a 21 espécies: *Amazonetta brasiliensis*, *Anthus lustescens* (Figura 147), *Celeus flavescens*, *Certhiaxis cinnamomea* (Figura 148), *Chloroceryle americana*, *Crotophaga major* (Figura 149), *Egretta thula*, *Eupetonema macroura* (Figura 146), *Glaucis hirsutus*, *Megaceryle torquata* (Figura 150), *Myiarchus ferox*, *Myrmoterula axilaris* (Figura 151), *Phaetusa simplex*, *Pitangus sulphuratus*, *Porzana albicollis*, *Pseudocolopteryx sclateri*, *Rallus longirostris* (Figura 152), *Sporophila collaris* (Figura 153), *Stelgidopteryx ruficollis* (Figura 154), *Tolmomyias flaviventer* e *Vanellus chilensis* (Figura 155). Estas espécies representaram oito guildas tróficas: filtradores (n=1), granívoro (n=2), insetívoro (terrestres e aquáticos, n=15), invertebrados aquáticos (adultos, ovos e larvas, n=3), nectarívoro e insetívoro (n=2), onívoro (n=4), piscívoro (n=4), piscívoro e invertebrados aquáticos (n=2).

Figura 143: Rede para captura de aves instaladas em ilha inundável próxima da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 144: Rede para captura de aves instalada em ilha próxima da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 145: Rede para captura de aves instalada com auxílio de caiaque, na margem do braço/canal do Rio Doce, próximo da foz do Rio Doce em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 146: Rede para captura de aves instalada sobre a água no braço/canal do Rio Doce, próximo da foz do Rio Doce em Regência/ES. Indivíduo de *Eupetონema macroura* capturado.



Fonte: Autoria própria.

Figura 147: Indivíduo de *Anthus lustescens*, capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 148: Indivíduo de *Certhiaxis cinnamomea*, capturado no ambiente de estuário próximo da Foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 149: Indivíduo de *Crotophaga major*, capturado no ambiente de estuário próximo da Foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 150: Indivíduo de *Megaceryle torquata*, capturado no ambiente de estuário próximo da Foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 151: Indivíduo de *Myrmotherula axillaris*, capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 152: Indivíduo de *Rallus longirostris*, espécie coletada no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 153: Indivíduo de *Sporophila collaris*, capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 154: Indivíduo de *Stelgitopterix ruficollis*, capturado no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 155: Indivíduo de *Vanellus chilensis*, capturado durante a noite no ambiente de estuário próximo da foz do Rio Doce, em Regência/ES.



Fonte: Autoria própria.

Quadro 32: Lista do esforço amostral para obtenção das amostras de aves através do método de captura com auxílio de redes de captura, em Regência/ES, durante a execução da primeira campanha do Anexo 1.

Data	Nº de redes	Horário de Abertura	Horário de Fechamento	Esforço diário (Horas)	Esforço Total
26/09/2018	5	14:00	18:00	4 horas	46 horas e 30 min
27/09/2018		6:00	20:30	14 horas e 30 min	
28/09/2018		10:00	19:00	9 horas	
01/10/2018	7	6:00	20:00	14 horas	
02/10/2018		6:00	11:00	5 horas	

Fonte: Autoria própria.

\* A variação da quantidade de redes utilizadas e tempo de utilização foi devido às condições ambientais do local.

### 8.2.3 Área 3 - São Mateus (litoral, estuário e mangue)

Na terceira área foram realizadas as capturas e coletas de aves preferencialmente na porção costeira, onde foram despendidos esforços na praia de Guriri (Quadro 30). Para obter acesso aos locais de amostragem foi utilizado um veículo 4x2 e realizado percursos a pé pela praia. As redes de capturas foram instaladas na costa da praia de Guriri (Figura 96 e Figura 157), entre o rio São Mateus e a APA Conceição da Barra (Quadro 30). As redes foram utilizadas durante cinco dias, sendo despendido um esforço de 33 h (Quadro 33). Através do método de captura foram obtidas amostras de seis indivíduos referentes a seis espécies de aves, que representaram quatro guildas tróficas. Por sua vez, a coletas realizadas através de disparos com armas de ar comprimido forneceram amostras de seis indivíduos referentes a seis espécies de aves, que representaram quatro guildas tróficas. Adicionalmente, foram encontradas duas aves mortas (*Charadrius semipalmatus*, na praia, e *Progne tapera*, provavelmente atropelada na estrada) e um item alimentar (Crustacea) que foi predado por uma ave (*Arenaria interpres*). No total, na terceira área, foram coletadas amostras de 15 indivíduos referentes a 13 espécies: *Arenaria interpres* (Figura 158), *Charadrius semipalmatus*, *Chordeiles pusillus*, *Egretta caerulea*, *Egretta thula*, *Guira guira*, *Mimus gilvus*, *Pluvialis squatarola*, *Progne tapera*, *Thalasseus acutiflavus* (Figura 159), *Thalasseus maximus* e *Tringa semipalmata*. Estas espécies representaram cinco guildas tróficas: insetívoro (n=3); invertebrados aquáticos, ovos e larvas, anfíbios, pequenos vertebrados e vegetais (n=4); onívoro (n=2); piscívoro (n=3); piscívoro e invertebrados aquáticos (n=2).

Quadro 33: Lista do esforço amostral para obtenção das amostras de aves através do método de captura com auxílio de redes de captura, em Guriri/ES, durante a execução da primeira campanha do Anexo 1.

Local	Data	Nº de redes	Horário de Abertura	Horário de Fechamento	Esforço diário (Horas)	Esforço Total
Praia entre o rio São Mateus e APA Conceição da Barra	04/10/2018	8	17:00	24:00	7 horas	33 horas
	05/10/2018		24:00	8:00	8 horas	
	06/10/2018	7	15:30	22:30	7 horas	
	07/10/2018		4:00	9:30	5 horas e 30 min	
	07/10/2018		16:00	21:30	5 horas e 30 min	

Fonte: Autoria própria.

\* A variação da quantidade de redes utilizadas e tempo de utilização foi devido às condições ambientais do local.

Figura 156: Instalação das redes na praia de Guriri, próximo da foz do rio São Mateus e APA Conceição da Barra, no município de São Mateus/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 157: Instalação de redes para capturas de aves na praia de Guriri, próximo da foz do rio São Mateus e APA Conceição da Barra, no município de São Mateus/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 158: Indivíduo de *Arenaria interpres*, coletado no ambiente litorâneo na praia de Guriri, em São Mateus/ES.



Fonte: Autoria própria.

Figura 159: Indivíduo de *Thalasseus acuffavidus*, capturado no ambiente litorâneo na praia de Guriri, em São Mateus/ES.



Fonte: Autoria própria.

Em síntese, apesar das condições adversas (presença de chuva forte, influência da maré e acesso limitado a certos locais ou condições limitadas para instalação das redes), as capturas com redes geraram 59 amostras de aves que representaram 31 espécies, referentes a oito guildas tróficas. As coletas foram efetuadas pontualmente para aquelas espécies de difícil captura e ou para aquelas espécies faltantes de amostras, mesmo com o esforço despendido com as redes de capturas. Através de coletas, foram obtidas 21 amostras de aves que representaram 20 espécies de aves, referentes a seis guildas tróficas. Além disso, foram encontradas duas aves mortas, que incrementaram as amostras na primeira campanha, bem como foi coletado um item alimentar que foi predado por uma ave. Apenas em uma única área amostral (Regência/ES, representando o ambiente de estuário), ficou faltando uma amostra de uma guilda (filtradores). Isto se deve ao fato das espécies desta guilda (pato e marrecas) se mostrarem arredias, como consequência da intensa pressão de caça nesta região, fato este confirmado por moradores e pelo comportamento dos animais silvestres em geral observados durante a realização da campanha em campo. De fato, foi observado um baixo número de indivíduos. Era esperada a obtenção de, pelo menos, duas amostras de cinco guildas com hábitos alimentares diferentes, relacionados aos ambientes dulcícola e estuarino nos ambientes de estuário, mangues e litoral, totalizando, portanto, 30 amostras de aves por campanha. Logo, faltando apenas uma amostra de uma guilda, conclui-se que a primeira campanha do Anexo 1 para monitoramento de aves dulcícolas e estuarinas atendeu em 96,7% das amostras definidas no Plano de Trabalho.

Além das amostras coletadas no presente monitoramento, também foram analisadas amostras de penas das seguintes aves marinhas coletadas antes do rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG): albatroz-de-bico-amarelo *Thalassarche chlororhynchos*, coletadas em alto mar na costa do RS em 2006 (n=27); atobá-pardo *Sula leucogaster*, coletadas em Abrolhos em 2011 (n=14); pardela de Trindade *Pterodroma arminjoniana*, coletadas em Trindade em 2006/2007 (n=18); e rabo-de-palha-de-bico-vermelho *Phaethon aethereus*, coletadas em Abrolhos em 2011 (n=20). Estas amostras foram coletadas e disponibilizadas pelo Dr. Leandro Bugoni, líder do Laboratório de Aves Aquáticas e Tartarugas Marinhas do Instituto de Ciências Biológicas (ICB) da Universidade Federal do Rio Grande (FURG). As análises destas amostras estão compreendidas no âmbito do Anexo 6 do PMBA conduzido pela RRDM. Infelizmente, amostras de sangue pretéritas ao rompimento da barragem não se encontram disponíveis. Nesse caso, os dados obtidos no presente monitoramento foram comparados com dados disponíveis na literatura pertinente.

No presente monitoramento, foram conduzidas análises das concentrações de chumbo (Pb), cromo (Cr), cobre (Cu), cádmio (Cd), arsênio (As), ferro (Fe), manganês (Mn) e mercúrio (Hg). Os procedimentos adotados para as análises estão descritos em detalhe no Plano de Trabalho do Anexo 1. As concentrações dos metais avaliados no presente estudo foram determinadas nas amostras de penas obtidas antes do rompimento da barragem de Fundão em Mariana (MG) (Quadro 34), bem como nas amostras de penas (Quadro 35) e de sangue (Quadro 36) das aves amostradas no presente monitoramento. Os dados das concentrações de cada metal nas penas obtidas das aves amostradas antes do rompimento da barragem foram agrupados para as quatro espécies de aves (Quadro 34),

visando o cálculo de uma média geral única, a qual foi comparada com o valor médio determinado para a concentração do respectivo metal nas penas das aves amostradas no presente monitoramento (Quadro 35).

Visando identificar uma possível influência do local de coleta nas concentrações dos metais nos tecidos das aves e, portanto, detectar possíveis áreas de maior nível de contaminação por estes elementos nas áreas monitoradas, os dados de concentração dos metais nas penas (Quadro 35) ou no sangue (Quadro 36) foram agrupados conforme os locais de captura das aves (mangue, estuário e praia). Por fim, foram realizadas análises de correlação entre as concentrações dos metais analisados nas penas e no sangue, utilizando-se o Índice de Correlação de Spearman ( $p < 0,05$ ). Nesse caso, foram verificadas as correlações entre as concentrações dos diferentes metais no mesmo tecido, bem como entre as concentrações do mesmo metal nos diferentes tecidos (penas ou sangue).

Quadro 34: Concentrações de metais ( $\mu\text{g/g}$  peso úmido) em penas de aves marinhas coletadas antes do rompimento da Barragem de Fundão em Mariana (MG) e analisadas no âmbito do presente estudo. Os dados são expressos como média e erro padrão (entre parênteses).

Tecido - Espécie Ano - Local	Pb	Cr	Cu	Cd	As	Fe	Mn	Hg	Zn
Pena - Albatroz-de-bico-amarelo <i>Thalassarche chlororhynchos</i> 2006 - Alto mar RS	0,227 (0,047)	0,771 (0,151)	2,687 (0,565)	0,062 (0,019)	0,731 (0,262)	103,4 (13,2)	23,3 (3,8)	0,016 (0,002)	61,4 (10,0)
Pena - Atobá-pardo <i>Sula leucogaster</i> 2011 - Abrolhos	0,587 (0,105)	5,158 (1,569)	29,216 (8,947)	0,228 (0,059)	10,051 (4,922)	302,2 (45,9)	70,8 (21,7)	0,129 (0,049)	70,6 (15,5)
Pena - Pardela de Trindade <i>Pterodroma arminjoniana</i> 2006/2007 - Trindade	0,443 (0,076)	3,107 (0,695)	3,377 (0,491)	0,098 (0,017)	0,848 (0,160)	363,1 (48,8)	75,3 (15,0)	0,041 (0,006)	146,2 (34,6)
Pena - Rabo-de-palha-de-bico- vermelho - <i>Phaethon aethereus</i> 2011 - Abrolhos	0,338 (0,063)	1,892 (0,485)	3,412 (0,602)	0,063 (0,020)	0,440 (0,071)	229,4 (26,8)	25,4 (4,3)	0,031 (0,004)	117,6 (32,1)
<b>Todas as espécies</b>	<b>0,370</b> <b>(0,036)</b>	<b>2,292</b> <b>(0,378)</b>	<b>7,497</b> <b>(1,870)</b>	<b>0,103</b> <b>(0,016)</b>	<b>2,316</b> <b>(0,932)</b>	<b>228,1</b> <b>(19,3)</b>	<b>43,8</b> <b>(5,9)</b>	<b>0,045</b> <b>(0,010)</b>	<b>95,2</b> <b>(12,3)</b>

Fonte: Autoria própria.

Quadro 35: Concentrações de metais ( $\mu\text{g/g}$  peso úmido) nas penas das aves amostradas nos diferentes ambientes (mangue, estuário e praia), bem como nas penas de aves marinhas coletadas antes do rompimento da barragem (Dados pretéritos: vide Tabela 5). Os dados estão expressos como média e erro padrão (entre parênteses). Letras diferentes indicam valores médios significativamente diferentes entre os diferentes ambientes de amostragem das aves, para cada metal analisado (ANOVA, seguida do teste de Tukey;  $p < 0,05$ ). \*Indica valores médios diferentes entre as penas das aves do presente estudo e aquelas amostradas antes do rompimento da barragem, para cada metal (teste t de Student;  $p < 0,05$ ).

Ambiente	Pb	Cr	Cu	Cd	As	Fe	Mn	Hg	Zn
Mangue	0,414 <sup>A</sup> (0,081)	0,533 <sup>A</sup> (0,068)	12,14 <sup>A</sup> (1,75)	0,098 <sup>A</sup> (0,012)	13,45 <sup>A</sup> (2,88)	226,0 <sup>A</sup> (28,5)	96,03 <sup>A</sup> (12,35)	0,116 <sup>A</sup> (0,019)	255,0 <sup>A</sup> (26,3)
Estuário	0,565 <sup>A</sup> (0,157)	0,540 <sup>A</sup> (0,112)	9,76 <sup>A</sup> (1,86)	0,089 <sup>A</sup> (0,017)	10,51 <sup>AB</sup> (3,95)	186,0 <sup>AB</sup> (39,5)	66,36 <sup>B</sup> (11,71)	0,029 <sup>B</sup> (0,005)	120,8 <sup>B</sup> (22,0)
Praia	0,416 <sup>A</sup> (0,123)	0,337 <sup>A</sup> (0,111)	10,75 <sup>A</sup> (4,65)	0,024 <sup>A</sup> (0,011)	1,65 <sup>B</sup> (0,40)	126,9 <sup>B</sup> (21,1)	36,71 <sup>B</sup> (7,47)	0,090 <sup>A</sup> (0,024)	220,5 <sup>A</sup> (30,0)
<b>Todas as espécies</b>	<b>0,475</b> <b>(0,075)</b>	<b>0,503*</b> <b>(0,57)</b>	<b>10,95*</b> <b>(1,29)</b>	<b>0,115</b> <b>(0,020)</b>	<b>9,80*</b> <b>(2,08)</b>	<b>193,8</b> <b>(20,7)</b>	<b>74,4*</b> <b>(7,6)</b>	<b>0,074*</b> <b>(0,010)</b>	<b>197,6*</b> <b>(16,6)</b>
<b>Dados pretéritos</b>	<b>0,370</b> <b>(0,036)</b>	<b>2,292</b> <b>(0,378)</b>	<b>7,50</b> <b>(1,87)</b>	<b>0,103</b> <b>(0,016)</b>	<b>2,32</b> <b>(0,93)</b>	<b>228,1</b> <b>(19,3)</b>	<b>43,84</b> <b>(5,88)</b>	<b>0,045</b> <b>(0,010)</b>	<b>95,2</b> <b>(12,3)</b>

Fonte: Autoria própria.

Quadro 36: Concentrações de metais (mg/L) no sangue das aves amostradas nos diferentes ambientes (mangue, estuário e praia), bem como em algumas espécies de aves reportadas na literatura pertinente. Os dados estão expressos como média  $\pm$  erro padrão (entre parênteses). Letras diferentes indicam valores médios significativamente diferentes entre os diferentes ambientes de amostragem das aves, para cada metal analisado (ANOVA, seguida do teste de Tukey;  $p < 0,05$ ).

Ambiente	Pb	Cr	Cu	Cd	As	Fe	Mn	Hg	Zn
Mangue ES - set-out/2018	0,078 <sup>A</sup> (0,014)	0,133 <sup>B</sup> (0,039)	2,12 <sup>AB</sup> (0,59)	0,025 <sup>B</sup> (0,006)	3,82 <sup>A</sup> (2,10)	283,0 <sup>A</sup> (39,5)	22,69 <sup>A</sup> (5,54)	0,148 <sup>A</sup> (0,032)	47,48 <sup>A</sup> (9,33)
Estuário ES - set-out/2018	0,109 <sup>A</sup> (0,047)	0,791 <sup>A</sup> (0,323)	4,62 <sup>A</sup> (2,71)	0,194 <sup>A</sup> (0,040)	2,36 <sup>A</sup> (0,66)	249,7 <sup>A</sup> (56,6)	21,89 <sup>A</sup> (6,60)	0,072 <sup>B</sup> (0,015)	26,53 <sup>AB</sup> (8,49)
Praia ES - set-out/2018	0,209 <sup>A</sup> (0,099)	0,039 <sup>B</sup> (0,011)	0,35 <sup>B</sup> (0,09)	0,012 <sup>B</sup> (0,005)	1,55 <sup>A</sup> (1,09)	171,1 <sup>A</sup> (24,5)	8,25 <sup>B</sup> (5,14)	0,093 <sup>AB</sup> (0,029)	20,69 <sup>B</sup> (7,76)
<b>Todos ambientes ES - set-out/2018</b>	<b>0,112 (0,026)</b>	<b>0,370 (0,130)</b>	<b>2,85 (1,09)</b>	<b>0,088 (0,018)</b>	<b>2,82 (0,95)</b>	<b>250,1 (28,2)</b>	<b>19,79 (3,64)</b>	<b>0,109 (0,016)</b>	<b>34,61 (5,50)</b>
Baía de Delaware <sup>1</sup> EUA - 2011/2012 <sup>A</sup>	0,090 (0,012)	0,484 (0,062)	-	0,003 (0,001)	1,036 (0,188)	-	-	0,016 (0,003)	-
Baía de Delaware <sup>2</sup> EUA - 2011/2012 <sup>A</sup>	0,087 (0,014)	0,122 (0,021)	-	0,002 (0,001)	1,288 (0,193)	-	-	0,025 (0,005)	-
Baía de Delaware <sup>3</sup> EUA - 2011/2012 <sup>A</sup>	0,060 (0,011)	0,268 (0,052)	-	0,002 (0,001)	0,381 (0,045)	-	-	0,013 (0,003)	-
Nunavut - Ártico <sup>1</sup> Canadá - 2009 <sup>B</sup>	0,024 (0,004)	-	0,416 (0,049)	-	0,002 (0,001)	496 (36,6)	0,100 (0,062)	0,343 (0,035)	5,30 (0,39)
Nunavut - Ártico <sup>2</sup> Canadá - 2009 <sup>B</sup>	0,011 (0,001)	-	0,333 (0,011)	-	0,027 (0,012)	474 (11,7)	0,046 (0,015)	0,519 (0,036)	5,32 (0,13)
Nunavut - Ártico <sup>3</sup> Canadá - 2009 <sup>B</sup>	0,021 (0,008)	-	0,379 (0,041)	-	-	482 (57,9)	0,029 (0,006)	0,258 (0,033)	6,07 (0,85)
Costa do RS <sup>1</sup> Brasil - 2006/2007 <sup>C</sup>	0,821 (0,353)	-	0,349 (0,182)	0,293 (0,098)	-	-	-	0,320 (0,367)	1,36 (0,28)
Costa do RS <sup>2</sup> Brasil - 2006/2007 <sup>C</sup>	0,930 (0,433)	-	0,477 (0,446)	0,331 (0,158)	-	-	-	0,341 (0,214)	1,44 (0,30)

Fonte: Autoria própria.

<sup>A</sup> Burger et al., 2017 (<sup>1</sup> Maçarico-de-papo-vermelho *Calidris canutus rufa*; <sup>2</sup> Maçarico-branco *Calidris alba*; <sup>3</sup> Maçarico-rasteirinho *Calidris pusilla*).

<sup>B</sup> Hargreaves et al., 2016 (<sup>1</sup> Tarambola-cinzenta *Pluvialis squatarola*; <sup>2</sup> Rola-do-mar *Arenaria interpres*; <sup>3</sup> Batuira-de-bando *Charadrius semipalmatus*).

<sup>C</sup> Carvalho et al., 2013 (<sup>1</sup> Pardela-de-óculos *Procellaria conspicillata*; <sup>2</sup> Pardela-preta *Procellaria aequinoctialis*).

Quando os valores médios das concentrações dos metais nas amostras de todas as espécies de aves amostradas no presente estudo são comparados com aqueles obtidos para as quatro espécies de aves amostradas antes do rompimento da barragem, denota-se que os valores médios das concentrações de As, Cu, Hg, Mn e Zn são maiores nas penas das aves amostradas no presente estudo. Por sua vez, a concentração de Mn é maior nas penas das aves amostradas antes do rompimento da barragem (Quadro 35).

No que se refere às concentrações de metais no sangue de aves marinhas e costeiras, denota-se que existe uma variabilidade entre os valores médios reportados na literatura. Essa variabilidade parece depender da espécie, local de coleta, ano de coleta e metal analisado. Apesar dessa variabilidade observada, quando os valores médios das concentrações de metais no sangue das aves amostradas no presente estudo são comparados com aqueles reportados na literatura (Quadro 36), verifica-se que

as concentrações de As, Cu, Mn e Zn são marcadamente maiores nas aves analisadas no presente estudo, especialmente quando se consideram as espécies de aves costeiras. Infelizmente, amostras de sangue de aves coletadas antes do rompimento da barragem não estão disponíveis para uma análise estatística comparativa, como foi descrito acima para as amostras de penas. Apesar disso, cabe ressaltar que, de forma consistente, os valores médios das concentrações dos metais As, Mn e Zn foram maiores nas penas e no sangue das aves amostradas no presente estudo do que nas penas e no sangue das aves amostradas antes do rompimento da barragem. Considerando-se que as concentrações dos metais no sangue refletem uma contaminação ambiental mais recente, enquanto aquelas presentes nas penas das aves refletem uma contaminação em longo prazo (Carvalho et al., 2013), os resultados descritos acima sugerem que as aves analisadas no presente estudo estão sujeitas a uma exposição contínua, e de longo prazo, ao As, Mn e Zn.

No que se refere a uma possível influência da área de coleta no nível de contaminação dos tecidos das aves, foi observado que esta depende do tipo de tecido analisado (penas ou sangue). Com base nos dados obtidos para as amostras de penas, pôde-se observar que as concentrações de Pb, Cr, Cu e Cd foram semelhantes entre os grupos de aves coletadas nos diferentes ambientes (mangue, estuário e praia). No entanto, aves amostradas na área de manguezais apresentaram maiores concentrações médias de As, Fe, Mn, Hg e Zn, do que aquelas amostradas na região do estuário do Rio Doce, em Regência (ES), bem como na área de praia, em Guriri (ES). Porém, cabe destacar que as concentrações médias de As e Fe foram semelhantes nas aves coletadas nos manguezais e na região estuarina.

Com base nos dados obtidos para as amostras de sangue das aves, pôde-se observar que as concentrações médias de As, Cd, Fe e Pb foram semelhantes entre os grupos de aves coletadas nos diferentes ambientes (mangue, estuário e praia). No entanto, aves amostradas no estuário do Rio Doce, em Regência (ES), apresentaram maiores concentrações médias de Cr, Cu e Mn do que aquelas coletadas na área de praia, em Guriri (ES). Porém, cabe destacar que as concentrações médias de Hg e Zn foram maiores nas aves coletadas nos manguezais da costa capixaba, quando comparado com aquelas coletadas na região estuarina do Rio Doce e na área de praia. Por fim, as concentrações médias de Cu e Mn foram semelhantes nas amostras de sangue das aves coletadas nos manguezais e na região estuarina do Rio Doce.

Portanto, com base no exposto acima, pode-se afirmar que a área de coleta influenciou de forma significativa os níveis de contaminação por metais observados nos tecidos (penas e sangue) das aves analisadas no presente estudo, com destaque para aquelas amostradas nos manguezais do Espírito Santo. De fato, os maiores níveis de As, Mn e Zn observados nas aves analisadas no presente estudo, em relação àquelas coletadas antes do rompimento da barragem de Fundão (Mariana/MG) parecem estar associados às maiores concentrações destes contaminantes nas aves coletadas nos manguezais. Uma análise futura dos níveis de contaminantes nas presas (itens alimentares) das aves que se alimentam nas áreas de manguezal se torna importante para avaliar o processo de transferência trófica dos metais para as aves que residem ou fazem uso temporária deste ambiente.

Por fim, cabe salientar que foram observadas correlações significativas e positivas entre as concentrações de todos os metais analisados no presente estudo, tanto nas penas quanto no sangue das aves analisadas. Esse fato foi observado tanto para o grupo das aves coletadas antes do rompimento da barragem quanto para aquele das aves amostradas no presente estudo. Estas correlações positivas entre as concentrações dos metais avaliados nas penas e no sangue também foram observadas quando a análise foi realizada com o conjunto de todos os indivíduos analisados no presente estudo, isto é, o conjunto das aves coletadas antes e após o rompimento da barragem. Este fato é um indicativo de que as aves avaliadas no presente estudo estão expostas a uma mistura de metais no ambiente, e seguramente não apenas a um elemento em particular.

Além dos metais, foram também determinadas as concentrações de diferentes grupos de contaminantes orgânicos [bifenilias policloradas (PCBs), pesticidas organoclorados (OPs) e os hidrocarbonetos aromáticos policíclicos (HPAs) no plasma obtido a partir do sangue das aves amostradas no presente monitoramento. As concentrações destes contaminantes nas penas, bem como de isótopos estáveis nas penas e no conteúdo estomacal das aves amostradas estão sendo analisadas no presente momento. Porém, nas amostras de plasma das aves (n=78) já foram analisados o PCB-28, PCB-52, PCB-101, PCB-138, PCB-153 e PCB-180, tendo sido detectados o PCB-28 (n=1; 0,813 ng/ml), PCB-52 (n=2; 0,138-0,368 ng/ml) e o PCB-153 (n=51; 0,148-7,572 ng/ml). O  $\Sigma$ PCBs atingiu um valor máximo de 7,572 ng/ml. Além dos PCBs, também foram analisados os seguintes pesticidas organoclorados: trifluralina, a-HCH, g-HCH, b-HCH, heptacloro, clorotalonil, d-HCH, diclofluanida, aldrim, b-heptacloro epóxido, a-endossulfam, o,p-DDE, dieldrin, p,p-DDE/o,p-DDD, o,p-DDD, endrim, p,p-DDD, b-endossulfam, p,p-DDT, o,p-DDT, endrim aldeído, endossulfam sulfato, metoxicloro e endrim cetona. Foram detectados os pesticidas clorados a-HCH (n=1; 0,37 ng/ml), clorotalonil (n=1; 2,74 ng/ml), diclofluanida (n=21; 8,20-10,94 ng/ml), b-heptacloro epóxido (n=24; 2,43-15,21 ng/ml), o,p-DDE (n=10; 3,08-5,24 ng/ml), dieldrin (n=7; 2,33-7,13 ng/ml), p,p-DDD (n=15; 6,59-9,70 ng/ml), b-endossulfam (n=1; 3,68 ng/ml), p,p-DDT (n=7; 4,54-5,75 ng/ml), o,p-DDT (n=4; 3,81-4,64 ng/ml), endrim aldeído (n=5; 1,24-4,66 ng/ml), endossulfam sulfato (n=3; 2,60-8,22 ng/ml) e metoxicloro (n=11; 1,26-6,94 ng/ml). Os  $\Sigma$ HCHs,  $\Sigma$ DDTs,  $\Sigma$ Endosulfans,  $\Sigma$ Drins e  $\Sigma$ OCPs atingiram valores máximos de 0,37 ng/ml, 17,79 ng/ml, 8,22 ng/ml, 7,13 ng/ml e 42,69 ng/ml, respectivamente.

No que se refere aos HPAs, foram analisados o naftaleno, acenaftleno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo[b]fluoranteno, benzo[k]fluoranteno, benzo[a]pireno, ieno[1,2,3-cd]pireno, dibenz[a,h]antraceno e benzo(ghi)perileno, tendo sido detectados o naftaleno (n=52; 4,74-409,73 ng/ml), acenaftleno (n=50; 3,06-51,98 ng/ml), acenafteno (n=23; 0,36-46,27 ng/ml), fluoreno (n=25; 2,94-45,18 ng/ml), fenantreno (n=19; 3,10-47,27 ng/ml), antraceno (n=39; 0,33-48,11 ng/ml), fluoranteno (n=19; 0,30-46,63 ng/ml), pireno (n=16; 1,87-42,14 ng/ml), benzo(a)antraceno (n=14; 1,75-43,33 ng/ml) e o criseno (n=12; 3,61-41,71 ng/ml). Os  $\Sigma$ HPAs de 2-3 anéis,  $\Sigma$ HPAs de 4-6 anéis e  $\Sigma$ HPAs dos 16 HPAs prioritários segundo a *Environmental Protection Agency* - EPA, atingiram valores máximos de 485,85 ng/ml, 80,47 ng/ml e 485,85 ng/ml, respectivamente.

### 8.3 CONCLUSÃO

Considerando os resultados obtidos a partir das análises realizadas até o momento nas amostras de penas e sangue das aves avaliadas no presente estudo, bem como nas amostras de penas de aves coletadas antes do rompimento da barragem de Fundão (Mariana/MG), pode-se concluir que as aves coletadas no presente estudo estão expostas de forma contínua e, em longo prazo, a uma mistura metais no ambiente. Como consequência, elas têm apresentado níveis elevados de As, Mn e Zn, tanto no sangue quanto nas penas. Os dados obtidos no presente estudo demonstram também que as aves coletadas nos manguezais e no estuário do Rio Doce estariam sendo expostas mais cronicamente ao As e Fe do que aquelas coletadas no ambiente praial. Além disso, as aves coletadas nos manguezais também se mostraram estar cronicamente expostas ao Mn, Hg e Zn. Por fim, os dados obtidos a partir das amostras de sangue sugerem que as aves coletadas na área estuarina estariam sendo expostas mais recentemente ao Cr, Cu e Mn. No que se referem aos microcontaminantes orgânicos, os dados obtidos no presente estudo indicam que, devido ao seu potencial toxicológico, alta frequência de ocorrência e concentração nas amostras de plasma, diversos compostos organoclorados (PCB-153, diclofluanida, b-heptacloro epóxido, o,p-DDE, dieldrin, p,p-DDD, p,p-DDT e metoxicloro) e HPAs (naftaleno, acenaftleno, acenafteno, fluoreno, fenantreno, antraceno, fluoranteno, pireno, benzo(a)antraceno e criseno) merecem atenção e devem ser avaliados quanto aos possíveis impactos negativos nas aves. Por fim, cabe destacar que possíveis variações sazonais nos parâmetros avaliados no presente estudo poderão ser verificadas através da análise das amostras coletadas na segunda campanha do Anexo 1, a qual foi realizada durante o período chuvoso (janeiro-fevereiro/2019) na área monitorada.

#### 8.4 REFERÊNCIAS

Burger, J., Tshipoura, N., Gochfeld, M. (2017). Metal levels in blood of three species of shorebirds during stopover on Delaware Bay reflect levels in their food, horseshoe crab eggs. *Toxics*, 5, 20.

Carvalho, P.C., Bugoni, L., Rona, A.R., McGill, R.A.R., & Bianchini, A. (2013). Metal and selenium concentrations in blood and feathers of petrels of the genus *procellaria*. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 32, 1641–1648.

Sick, H. (1997). *Ornitologia Brasileira*, 1<sup>a</sup> Edição, Nova Fronteira. Rio de Janeiro, RJ. 912 p.

Sigrist, T. (2006). *Aves do Brasil: uma visão artística*, 2<sup>a</sup> Edição, Editora Avis Brasilis. São Paulo, SP. 672p.