

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

**Material Suplementar Ambiente Marinho**

**Tema: Ecotoxicologia**

**RT- 46/ JUN 24**

**RA2023 PMBA/Fest**

Vitória,

Junho de 2024

## **EQUIPE TÉCNICA**

Adalto Bianchini

Camila De Martinez Gaspar Martins

Carlos Eduardo Delfino Vieira

Henrique Fragoso dos Santos

Iole Beatriz Marques Orselli

Juliana Castro Monteiro Pirovani

Laís Fernanda de Palma Lopes

Maysa do Vale Oliveira

Yuri Dornelles Zebral

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>5</b>
2.1	COLETA DE AMOSTRAS DE ÁGUA, SEDIMENTO E BIOTA .....	5
2.2	ANÁLISES DE LABORATÓRIO .....	18
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	29
<b>3</b>	<b>RESULTADOS DOS INDICADORES .....</b>	<b>30</b>
3.1	ÍNDICE DE BIOACUMULAÇÃO ( <i>IBR BIOACUMULAÇÃO</i> ) .....	31
3.2	ÍNDICE DE RESPOSTA BIOLÓGICA ( <i>IBR BIOMARCADOR</i> ) .....	71
3.3	DIVERSIDADE MICROBIANA .....	92
3.4	ÍNDICE DE TOXICIDADE .....	104
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO .....</b>	<b>106</b>
<b>5</b>	<b>ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>111</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>111</b>

## **1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL**

A malha e frequência amostral do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) passou por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atender aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) MS – Malha e Frequência amostral, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) MS – Mapas das malhas amostrais, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais monitoradas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações amostrais monitoradas entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais monitoradas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

## 2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia). Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest a fim de determinar os indicadores.

### 2.1 COLETA DE AMOSTRAS DE ÁGUA, SEDIMENTO E BIOTA

As coletas de amostras de água de fundo e de superfície seguiram a metodologia padrão empregada desde a Campanha 1 (set/out 2018). Resumidamente, as coletas de água, ao longo da coluna d'água, foram realizadas utilizando-se uma garrafa horizontal do tipo Van Dorn. Em todas as estações amostrais foram coletadas 6 amostras de água (3 amostras de superfície e 3 amostras de fundo) para a análise das concentrações de arsênio e metais totais e 6 amostras (3 amostras de superfície e 3 amostras de fundo) de água filtrada (filtro de 0,45 µm de malha) para a análise das concentrações de metais na fração dissolvida. Imediatamente após a coleta, alíquotas das amostras para a determinação das concentrações totais e dissolvidas de metais foram acidificadas com ácido nítrico Suprapur (HNO<sub>3</sub>, concentração final de 1%) e mantidas refrigeradas. Adicionalmente, foram coletadas amostras de água superficial, seguindo-se os mesmos procedimentos descritos acima, em quantidades adequadas para realização de ensaios de toxicidade. As amostras de água foram mantidas congeladas (<-10°C) até o momento dos ensaios. No momento da coleta das amostras de água foram realizadas as medidas da temperatura, condutividade elétrica, salinidade, pH e oxigênio dissolvido, utilizando-se uma sonda multiparâmetros (YSI Professional Plus).

As coletas de amostras de sedimento seguiram a metodologia padrão empregada desde a Campanha 1 (set/out 2018). Em todas as estações amostrais utilizadas para a coleta de água foram coletadas também amostras de sedimento superficial com auxílio de draga do tipo Van Veen. Em cada local de amostragem foram coletadas 4 amostras de sedimento. As amostras foram abertas em caixas plásticas, buscando-se gerar um mínimo de perturbação na superfície do sedimento e fotografadas imediatamente após a coleta, a fim de registrar as características visuais do sedimento. Para a análise de arsênio e metais, as amostras foram coletadas com o auxílio de espátula de plástico, raspando-se apenas os primeiros centímetros (0 - 5 cm) e obtendo-se apenas o sedimento superficial. As amostras de sedimento foram armazenadas em frascos plásticos descontaminados e mantidos congelados até o momento das análises. Adicionalmente, foram coletadas amostras de sedimento superficial, seguindo-se os mesmos procedimentos descritos acima, em quantidades adequadas para realização de ensaios de toxicidade. As amostras de sedimento foram mantidas refrigeradas (<10°C) até o momento dos ensaios.

Com o objetivo de avaliar possíveis efeitos biológicos decorrentes da contaminação da água e sedimento por As e metais e consequente acumulação nos organismos de diferentes níveis tróficos e diferentes habitats, foram realizadas coletas de organismos típicos das regiões monitoradas. No caso dos pontos amostrais localizados na foz do Rio Doce e região costeira adjacente, sempre que possível, foram coletados os seguintes organismos: fitoplâncton (coleta com rede de fitoplâncton); zooplâncton (coleta com redes de zooplâncton); macrocrustáceos (coleta com rede de arrasto ou armadilha); peixes (coleta com redes de arrasto, emalhe ou outra arte de pesca). As espécies de macrocrustáceos incluíram o camarão-rosa (*Farfantepenaeus paulensis* ou *F. brasiliensis*) e o camarão sete-barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*). Por sua vez, as espécies de peixes previstas incluíram o roncador *Conodon nobilis*, a pescadinha *Cynoscion sp.*, o peroá *Balistes capriscus* e o linguado sem mancha *Paralichthys sp.* Todavia, diante da impossibilidade de coleta destas espécies de peixes, previstas no TR4, em todos os pontos amostrais e/ou em número amostral mínimo, necessário para as análises de bioacumulação e respostas de biomarcadores, substituiu-se as mesmas por outras que já foram coletadas e analisadas nas 5 expedições de pesquisa e monitoramento ecotoxicológico promovidas pelo ICMBio (jan/2016 - fev/2018) na foz do Rio Doce e região costeira adjacente. As espécies de peixes coletadas durante as Campanhas 10 (jun/jul 2023 – período seco) e 11 (jan 2024 – período chuvoso) estão listadas na Tabela 1.

Tabela 1: Espécies de peixes (nome científico e/ou nome popular e número de indivíduos) coletadas no Ambiente Marinho durante a Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso), e respectivo hábito alimentar (carnívoro ou onívoro). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção ambiental - **APA** [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; **Foz** [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; e **Norte** [Barra Nova 1 (BN1), Barra Seca 1 (BS1), Barra Seca 2 (BS2), Conceição da Barra 1 (CB1), Conceição da Barra 2 (CB2), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)].

Campanha 10		Hábito		
Ponto amostral	Espécie	Carnívoro	Onívoro	Total
BN1		16	8	24
	Peixe 1 - Roncador	6	0	6
	Peixe 18 - Corvina	1	0	1
	Peixe 19 - Trilha	0	2	2
	Peixe 3 - Peroá	6	0	6
	Peixe 34 - Papa Terra	0	6	6
	Peixe 4 - Pescadinha - <i>Cynoscion sp.</i>	3	0	3
BS1		17	7	24
	Peixe 1 - Roncador	6	0	6
	Peixe 3 - Peroá	1	0	1
	Peixe 4 - Pescadinha - <i>Cynoscion sp.</i>	6	0	6
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	3	3
	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	4	4
	Peixe - <i>Larimus</i>	4	0	4
BS2		12	12	24
	Peixe 1 - Roncador	6	0	6
	Peixe 3 - Peroá	6	0	6
	Peixe 12 - Carapicu (carapeba)	0	6	6
	Peixe 19 - Trilha	0	6	6
CA1		14	10	24
	Peixe - <i>Larimus</i>	4	0	4
	Peixe - Pescada	1	0	1
	Peixe 1 - Roncador	3	0	3
	Peixe 2 - Linguado	2	0	2
	Peixe 4 - Pescadinha	3	0	3
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	4	4
	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	6	6
	Peixe 18 - Corvina	1	0	1
CA2		17	0	17
	Peixe - Baiacu	3	0	3
	Peixe - Peixe lagarto	2	0	2
	Peixe 1 - Roncador	1	0	1

	Peixe 2 - Linguado	1	0	1
	Peixe 3 - Peroá	2	0	2
	Peixe 8 - Pargo Rosa	1	0	1
	Peixe 36 - Xerête	3	0	3
	Peixe - Espada	1	0	1
	Peixe - Biquara	1	0	1
	Peixe - Guarajuba amarela	2	0	2
CA3		24	0	24
	Peixe - Dourado	2	0	2
	Peixe - Garacimbora	2	0	2
	Peixe - Guarajuba amarela	1	0	1
	Peixe 27 - Voador	5	0	5
	Peixe 3 - Peroá	3	0	3
	Peixe 7 - Michole	5	0	5
	Peixe 8 - Pargo Rosa	6	0	6
CA4		14	10	24
	Peixe - Agulha	1	0	1
	Peixe - Biquara	1	0	1
	Peixe - Espada	5	0	5
	Peixe - Mariquita	0	4	4
	Peixe 17 - Sardinha	0	6	6
	Peixe 3 - Peroá	4	0	4
	Peixe 8 - Pargo Rosa	3	0	3
CA5		24	0	24
	Peixe - Guarajuba amarela	1	0	1
	Peixe - Peixe lagarto	1	0	1
	Peixe - Peixe pena	1	0	1
	Peixe - Pirá ( <i>Malacanthus plumieri</i> )	1	0	1
	Peixe 2 - Linguado	1	0	1
	Peixe 36 - Xerête	1	0	1
	Peixe 7 - Michole	1	0	1
	Peixe 8 - Pargo Rosa	16	0	16
	Peixe 28 - Xaréu	1	0	1
CB1		12	12	24
	Peixe 1 - Roncador	6	0	6
	Peixe 34 - Papa Terra	0	6	6
	Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	6	6
CB2		24	0	24
	Peixe - Guarajuba amarela	11	0	11
	Peixe 1 - Roncador	10	0	10



	Peixe 3 - Peroá	3	0	3
DEG1		18	6	24
	Peixe 1 - Roncador	6	0	6
	Peixe 3 - Peroá	1	0	1
	Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
	Peixe 11 - Bagre	5	0	5
	Peixe 33 - Maria Luiza Rosa	0	6	6
DEG2		22	2	24
	Peixe 1 - Roncador	6	0	6
	Peixe 2 - Linguado	2	0	2
	Peixe 3 - Peroá	7	0	7
	Peixe 12 - Carapicu (carapeba)	0	2	2
	Peixe 18 - Corvina	6	0	6
	Peixe 27 - Voador	1	0	1
FRD1		11	13	24
	Peixe 3 - Peroá	2	0	2
	Peixe 4 - Pescadinha	2	0	2
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	1	1
	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	5	5
	Peixe 9 - Olho de Vidro	1	0	1
	Peixe 11 - Bagre	6	0	6
	Peixe 33 - Maria Luiza Rosa	0	6	6
	Peixe 34 - Papa Terra	0	1	1
FRD10		19	6	25
	Peixe - Larimus	4	0	4
	Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
	Peixe 5 - Maria Luíza	3	0	3
	Peixe 11 - Bagre	3	0	3
	Peixe 18 - Corvina	3	0	3
	Peixe 33 - Maria Luiza Rosa	0	6	6
FRD3		13	11	24
	Peixe 3 - Peroá	1	0	1
	Peixe 4 - Pescadinha	4	0	4
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	1	1
	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	6	6
	Peixe 11 - Bagre	6	0	6
	Peixe 18 - Corvina	2	0	2
	Peixe 33 - Maria Luiza Rosa	0	2	2
	Peixe 34 - Papa Terra	0	2	2
FRD6		15	9	24
	Peixe - Cavala	4	0	4

Peixe 1 - Roncador	2	0	2
Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	4	4
Peixe 18 - Corvina	3	0	3
Peixe 34 - Papa Terra	0	5	5
FRD8	20	5	25
Peixe - Cavala	6	0	6
Peixe - <i>Larimus</i>	3	0	3
Peixe 3 - Peroá	2	0	2
Peixe 4 - Pescadinha	3	0	3
Peixe 5 - Maria Luíza	0	2	2
Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	3	3
Peixe 18 - Corvina	6	0	6
FRD9	17	7	24
Peixe - <i>Trichiurus</i>	4	0	4
Peixe 1 - Roncador	3	0	3
Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	6	6
Peixe 11 - Bagre	2	0	2
Peixe 18 - Corvina	2	0	2
Peixe 33 - Maria Luiza Rosa	0	1	1
ITA1	24	0	24
Peixe 1 - Roncador	6	0	6
Peixe 3 - Peroá	6	0	6
Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
Peixe 13 - Cocoroca (Haemulidae)	6	0	6
ITA2	24	0	24
Peixe - Bagre branco	9	0	9
Peixe - Guarajuba amarela	11	0	11
Peixe 1 - Roncador	3	0	3
Peixe 3 - Peroá	1	0	1
Total	357	118	475

Campanha 11		Hábito		
Ponto amostral	Espécie	Carnívoro	Onívoro	Total
BN1		21	3	24
	Peixe - Guarajuba amarela	6	0	6
	Cangulo - <i>Aluterus monoceros</i>	0	3	3
	Peixe galo - <i>Selene vomer</i>	1	0	1
	Peixe 32 - <i>Lutjanus</i>	3	0	3
	Peixe 3 - Peroá	6	0	6
	Peixe - Cavala	5	0	5

BN2		11	0	11
	<i>Ocyurus chrysurus</i> (guaiúba)	1	0	1
	Peixe - Guarajuba amarela	3	0	3
	Peixe - Pirá	2	0	2
	Rêmora - <i>Echeneis naucrates</i>	2	0	2
	Peixe 3 - Peroá	2	0	2
	Peixe - Biquara	1	0	1
BS1		20	4	24
	Peixe 3 - Peroá	2	0	2
	Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
	Peixe 1 - Roncador	1	0	1
	Peixe - <i>Larimus</i>	1	0	1
	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	3	3
	Peixe 18 - Corvina	2	0	2
	Peixe - Peixe pena	1	0	1
	Peixe - Cavala	1	0	1
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	1	1
	Peixe 11 - Bagre	6	0	6
BS2		23	1	24
	Peixe 3 - Peroá	9	0	9
	Peixe - Guarajuba amarela	8	0	8
	Peixe 32 - <i>Lutjanus</i>	4	0	4
	Peixe 9 - Olho de Vidro	1	0	1
	Peixe - enxada	1	0	1
	Peixe 10 - Palombeta	0	1	1
CA1		17	7	24
	<i>Archosargus probatocephalus</i> (Sargo de dente)	1	0	1
	Peixe 27 - Voador	1	0	1
	Peixe 17 - Sardinha	0	1	1
	Peixe 18 - Corvina	11	0	11
	Peixe 34 - Papa Terra	0	2	2
	Peixe 2 - Linguado	4	0	4
	Peixe 19 - Trilha	0	4	4
CA2		24	0	24
	Peixe 2 - Linguado	1	0	1
	Peixe - Guarajuba amarela	3	0	3
	Rêmora - <i>Echeneis naucrates</i>	1	0	1
	Peixe 3 - Peroá	9	0	9
	Peixe 8 - Pargo Rosa	6	0	6
	<i>Cephalopholis fulva</i> (piraúna)	3	0	3
	Peixe - Biquara	1	0	1
CA3		24	0	24
	Peixe 7 - Michole	5	0	5
	Peixe 8 - Pargo Rosa	16	0	16
	Peixe 27 - Voador	1	0	1
	Peixe - Guarajuba amarela	1	0	1
	Peixe - Garacimbora	1	0	0

CA4		22	2	24
	Peixe 17 - Sardinha	0	2	2
	Peixe 8 - Pargo Rosa	20	0	20
	<i>Rhomboplites aurorubens</i> (pirapiranga)	2	0	2
CA5		24	0	24
	Peixe - Guarajuba amarela	1	0	1
	Peixe - Peixe lagarto	2	0	2
	Peixe 8 - Pargo Rosa	16	0	16
	Peixe 27 - Voador	3	0	3
	Peixe 28 - Xaréu	2	0	2
CB1		19	5	24
	Peixe 34 - Papa Terra	1	0	1
	Peixe - Cavala	4	0	4
	Cangulo - <i>Aluterus monoceros</i>	0	5	5
	Peixe 11 - Bagre	2	0	2
	Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
	Peixe - Pescada	1	0	1
	Bicuda - <i>Sphyræna guachancho</i>	2	0	2
	Peixe - <i>Larimus</i>	3	0	3
CB2		24	0	24
	Ubaraba - <i>Albula vulpes</i>	3	0	3
	<i>Rhomboplites aurorubens</i> (pirapiranga)	1	0	1
	Peixe 7 - Michole	2	0	2
	Peixe - Biquara	2	0	2
	Peixe - Guarajuba amarela	14	0	14
	Peixe 3 - Peroá	2	0	2
DEG1		24	0	24
	Peixe - Peixe pena	1	0	1
	Peixe - <i>Larimus</i>	5	0	5
	Peixe - Cavala	1	0	1
	Peixe 11 - Bagre	6	0	6
	Peixe 28 - Xaréu	1	0	1
	Peixe - Pescada	3	0	3
	Peixe 1 - Roncador	7	0	7
DEG2		18	6	24
	Peixe 3 - Peroá	4	0	4
	Peixe 19 - Trilha	0	6	6
	Peixe 27 - Voador	1	0	1
	Peixe 18 - Corvina	2	0	2
	Peixe 1 - Roncador	2	0	2
	Peixe - Guarajuba amarela	3	0	3
	Bicuda - <i>Sphyræna guachancho</i>	6	0	6
FRD1		16	8	24
	Peixe 1 - Roncador	5	0	5
	Peixe 4 - Pescadinha	3	0	3
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	1	1
	Peixe 34 - Papa Terra	0	1	1

	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	1	1
	Peixe 17 - Sardinha	0	5	5
	Peixe - Pescada	1	0	1
	Peixe 11 - Bagre	7	0	7
FRD10		18	6	24
	Peixe 7 - Michole	3	0	3
	Peixe 18 - Corvina	8	0	8
	Peixe 2 - Linguado	5	0	5
	Peixe 19 - Trilha	0	6	6
	Peixe 27 - Voador	2	0	2
FRD3		18	6	24
	Peixe 2 - Linguado	7	0	7
	Peixe 19 - Trilha	0	6	6
	Peixe 3 - Peroá	2	0	2
	Peixe 27 - Voador	3	0	3
	Peixe 18 - Corvina	6	0	6
FRD6		12	12	24
	Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	6	6
	Peixe 17 - Sardinha	0	6	6
	Peixe 18 - Corvina	6	0	6
FRD8		16	8	24
	Peixe 7 - Michole	6	0	6
	Peixe 27 - Voador	1	0	1
	Peixe - Guarajuba amarela	1	0	1
	Peixe 9 - Olho de Vidro	2	0	2
	Peixe 2 - Linguado	6	0	6
	Peixe 17 - Sardinha	0	2	2
	Peixe 19 - Trilha	0	6	6
FRD9		8	16	24
	Peixe 4 - Pescadinha	6	0	6
	Peixe - <i>Larimus</i>	2	0	2
	Peixe 6 - Cabeção / Cabeça dura	0	6	6
	Peixe 17 - Sardinha	0	4	4
	Peixe 5 - Maria Luíza	0	6	6
ITA1		20	4	24
	Peixe 32 - <i>Lutjanus</i>	1	0	1
	Peixe - Guarajuba amarela	2	0	2
	Peixe 34 - Papa Terra	0	4	4
	Peixe - Pescada	2	0	2
	Peixe 4 - Pescadinha	5	0	5
	Peixe 1 - Roncador	6	0	6
	Peixe - Cavala	4	0	4
ITA2		24	0	24
	Peixe - Guarajuba amarela	4	0	4
	Rêmora - <i>Echeneis naucratis</i>	5	0	5
	Peixe - Biquara	1	0	1
	Peixe 3 - Peroá	14	0	14
Total		403	88	491

Exemplares de poliquetas e moluscos não foram coletados, devido a dificuldades metodológicas enfrentadas já durante as primeiras Campanhas do monitoramento ecotoxicológico no âmbito do PMBA/Fest. Neste contexto, vale ressaltar que, nas localidades estudadas, os invertebrados bentônicos de fundo inconsolidado são pequenos e requerem, portanto, uma triagem minuciosa do sedimento com o uso de lupa, uma manobra bastante difícil de ser realizada a bordo, especialmente com a embarcação em movimento. Assim, as condições na embarcação, logística relacionada ao volume do sedimento a ser triado, a biomassa mínima necessária de cada grupo (poliqueta, moluscos, etc.) para análise de contaminantes (metais e As) e biomarcadores, além do fato de que essa triagem deve ser conduzida de forma muito rápida e controlada, com troca de água do local e controle de luz e temperatura para evitar alterações nos biomarcadores bioquímicos, foram fatores determinantes e que inviabilizaram a coleta e triagem de invertebrados bentônicos concomitantemente com as demais atividades diárias previstas e nas condições de logística disponíveis. Vale lembrar que, em virtude dos motivos descritos acima, a exclusão destes dois grupos de organismos do escopo do monitoramento realizado no âmbito do PMBA/Fest já foi solicitada logo ao final do primeiro ano do monitoramento, ou seja, no início do Período de Transição.

Para a região de Abrolhos, especificamente, foram coletados corais da espécie *Mussismilia harttii* e hidrocorais da espécie *Millepora alcicornis*, de forma manual por mergulho.

A coleta de amostras para as análises de metais e As nos organismos da foz do Rio Doce e região marinha adjacente, em cada ponto do monitoramento, foi realizada considerando-se: a decisão da Câmara Técnica de Biodiversidade (Nota Técnica nº 3/2017/CTBio/DIBIO/ICMBio) em adotar um número reduzido de exemplares de crustáceos e peixes dulcícolas e estuarinos para as análises das concentrações de metais/As e dos biomarcadores; a necessidade, para fins de análise e modelagem estatística, de balanceamento entre o número de amostras a serem analisadas nos diferentes ambientes (dulcícolas, estuarinos, marinhos, praias e manguezais); a viabilidade de aplicação de modelos estatísticos empregados em ecotoxicologia; bem como, os resultados positivos obtidos com o número amostral utilizado anteriormente nas 5 expedições de pesquisa e monitoramento ecotoxicológico promovidas pelo ICMBio (jan 2016 – fev 2018) na foz do Rio Doce e região costeira adjacente. Sendo assim, foram adotados os seguintes números amostrais: fitoplâncton (5 amostras por ponto de coleta, sendo cada amostra constituída por pools de, no mínimo, 3 arrastos diferentes com duração entre 10 e 15 min); zooplâncton (5 amostras por ponto de coleta, sendo cada amostra constituída por pools de, no mínimo, 3 arrastos diferentes com duração entre 10 e 15 min); hidrocorais (6 fragmentos de *M. alcicornis* por ponto de coleta); corais (6 fragmentos de *M. harttii* por ponto de coleta); macrocrustáceos (6 indivíduos por ponto de coleta e por espécie); peixes (6 indivíduos por ponto de coleta e por espécie, quando possível). Para cada amostra obtida para as análises das concentrações de metais e As nos organismos marinhos, conforme descrito acima, foi também coletada uma duplicata para as análises de biomarcadores nestes organismos. Após a biometria, os crustáceos foram adequadamente anestesiados e então dissecados para coleta de amostras de músculo, brânquias e hepatopâncreas. Por sua vez, os peixes foram adequadamente anestesiados e eutanasiados, e em seguida foram dissecados para coleta de amostras de músculo, brânquias e fígado.

As amostras foram acondicionadas em microtubos ou tubos tipo Falcon, previamente limpos com ácido nítrico Suprapur® e enxaguados em água MilliQ. As amostras coletadas para as análises de metais e As foram imediatamente congeladas em nitrogênio líquido e transportadas até o laboratório, onde foram devidamente armazenadas sob congelamento. A sequência dos procedimentos realizados nas Campanhas ao longo do monitoramento do PMBA/Fest encontra-se descrita abaixo em detalhe.

Para a coleta de tecidos de camarões, as brânquias foram cuidadosamente dissecadas com o auxílio de microtesoura. O tecido branquial de cada indivíduo foi destinado para a análise das concentrações de metais e As ( $n = 6$ ) e análise de biomarcadores ( $n = 6$ ). Os criotubos (2 mL) contendo as brânquias foram imediatamente armazenados em nitrogênio líquido. Após a retirada da carapaça do cefalotórax dos camarões, o hepatopâncreas de cada indivíduo foi dissecado, acondicionado em criotubo (2 mL) e destinado à análise das concentrações de metais e As ( $n = 6$ ). Uma porção do tecido hepatopancreático de outro indivíduo foi coletada, acondicionada em criotubo (2 mL) e destinada à análise de biomarcadores ( $n = 6$ ). Todo o material foi imediatamente congelado em nitrogênio líquido. Após a retirada da carapaça dos camarões, o músculo abdominal foi coletado, acondicionado em criotubo (2 mL) e destinado à análise de biomarcadores ( $n = 6$ ). Para análise das concentrações de metais e As no tecido muscular, as amostras foram coletadas conforme descrito anteriormente.

Após a captura, os peixes foram identificados e mantidos em caixas plásticas com água do próprio local com aeração constante. Para as análises das concentrações de metais e As, bem como dos biomarcadores, os espécimes foram retirados das caixas plásticas, anestesiados (hidrocloridrato de benzocaína a 250 mg/L), medidos (mm), pesados (g), eutanasiados com dose letal de hidrocloridrato de benzocaína (500 mg/L) e então dissecados para coleta de amostras dos tecidos/órgãos alvo, conforme descrito a seguir.

As brânquias foram cuidadosamente dissecadas da cavidade opercular, com auxílio de pinça e tesoura, evitando-se ao máximo tocar os filamentos branquiais. Os arcos branquiais foram separados em placas de Petri contendo solução fisiológica para peixes. O segundo arco branquial direito foi lavado delicadamente com pincel macio e solução fisiológica para a retirada do excesso de sangue e muco. Após isso, foi fixado em solução de Bouin (6-8 h) para posterior análise morfológica. Após o período de fixação, a solução fixadora foi substituída por álcool 70%, o qual foi trocado diariamente, até a completa remoção do fixador. Os arcos branquiais restantes foram acondicionados em criotubos e imediatamente congelados em nitrogênio líquido. Após a dissecação das brânquias, a cavidade abdominal dos peixes foi exposta, utilizando-se uma tesoura. A seguir, o fígado dos peixes foi dissecado com o auxílio de pinças curvas, tentando-se remover os lobos hepáticos da forma mais íntegra possível. O órgão foi dividido para as análises das concentrações de metais e As, bem como de biomarcadores. Para as análises histológicas, o órgão foi fixado em solução de Bouin (6-8 h) e posteriormente conservado em álcool 70%. Para a avaliação dos biomarcadores bioquímicos, as amostras foram acondicionadas em criotubos e imediatamente congeladas em nitrogênio líquido. Por fim, uma amostra de músculo da região dorsal (musculatura hipoaxial) foi dissecada removendo-se as escamas e a pele. As porções de músculo foram acondicionadas em criotubos e estes congelados em nitrogênio líquido. A coleta de amostras de músculo para análise das concentrações de metais e As seguiram as recomendações



descritas anteriormente. Após a dissecação dos animais em campo, a carcaça foi descartada no local de coleta (campo).

Todas as amostras biológicas destinadas às análises de metais e As foram acondicionadas em frascos plásticos previamente limpos com ácido nítrico Suprapur® e enxaguados em água MilliQ. Estas amostras foram imediatamente congeladas em nitrogênio líquido e seguiram para o transporte até o laboratório, onde foram mantidas congeladas em freezer comum (-20°C) até o momento das análises. Nestas amostras, foram analisados os seguintes elementos: Alumínio (Al), Arsênio (As), Cádmio (Cd), Chumbo (Pb), Cobre (Cu), Cromo (Cr), Ferro (Fe), Manganês (Mn), Mercúrio (Hg), Níquel (Ni) e Zinco (Zn). Da mesma forma, as amostras dos organismos coletados para as análises de biomarcadores foram acondicionadas em tubos criogênicos e congeladas (nitrogênio líquido) em campo. As amostras congeladas foram transportadas para o laboratório, onde foram mantidas congeladas em ultrafreezer (-80°C). Foram realizadas as análises dos biomarcadores em tecidos específicos dos organismos, considerando-se a natureza de cada biomarcador, conforme detalhado mais adiante.

A partir da Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), que corresponde ao início do Novo Ciclo do PMBA/Fest, ocorreram algumas modificações na destinação das amostras de tecidos biológicos para as análises de biomarcadores e no conjunto de biomarcadores analisados por grupo de organismo, seguindo a Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022 (Novo Ciclo). Estas modificações estão descritas na sessão abaixo “Análises de Laboratório”.

Para o monitoramento da comunidade microbiana total, foram coletadas, em triplicata, amostras de água (de superfície e de fundo), sedimento e fragmentos de corais, em cada ponto de coleta, seguindo-se as respectivas metodologias descritas acima. As coletas para a avaliação microbiológica foram realizadas nos 25 pontos de amostragem na foz do Rio Doce e região costeira adjacente. Por sua vez, as amostras de corais foram coletadas nos 4 pontos de monitoramento na região de Abrolhos, incluindo um recife-controle [Abrolhos Controle 1 (ABRC1)], fora de possíveis rotas de dispersão dos sedimentos. As amostras de água foram transferidas para garrafas plásticas de 1 L identificadas de acordo com o ponto de coleta, réplica e profundidade. As amostras coletadas foram acondicionadas em ambiente fresco ou refrigerado até o momento da filtragem. Após a filtragem da amostra através de duas membranas (1.2 µm e 0.22 µm), os filtros foram recolhidos e acondicionados em tubos de 5 mL, os quais foram estocados em caixas específicas e congelados (-20°C). Por sua vez, as amostras de sedimento foram acondicionadas em tubos tipo Falcon de 15 mL, os quais foram estocados em sacos plásticos e mantidos congelados (-20°C) até o momento da análise. Quanto às amostras de corais, estas foram coletadas manualmente através de mergulho autônomo. As amostras coletadas foram armazenadas em tubos de 5 mL ou tubos tipo Falcon de 50 L, dependendo da logística dos mergulhadores e do tamanho dos fragmentos de corais coletados. Uma vez no barco, o excesso de água nos tubos foi retirado e os tubos foram identificados e mantidos congelados (-20°C) até o momento da análise.

Portanto, conforme descrito acima, os protocolos de coleta das amostras ambientais e biológicas foram aqueles já descritos anteriormente no âmbito do PMBA/Fest (RRDM, RSE 2022). No entanto, a partir



da Campanha 8 (set/out 2022 – período seco) foram adotadas as recomendações contidas no *“Parecer técnico dos métodos adotados para quantificação de metais e arsênio em tecidos e vísceras da biota aquática - Avaliação da adequação e eficiência metodológica das análises de metais e arsênio no âmbito do PMBA”* emitido pela Fundação Renova em agosto de 2022. Neste caso, foram adotadas as seguintes alterações na coleta das amostras de água, sedimento e biota destinadas as análises de arsênio e metais:

- (1) os frascos destinados às coletas, mesmo que ainda não tenham sido utilizados, foram banhados em ácido nítrico 5%, por 24 horas, completados por lavagem em água deionizada em abundância, para se evitar qualquer fonte de contaminação.
- (2) As coletas de água, ao longo da coluna d'água, foram realizadas utilizando-se uma garrafa horizontal do tipo *Van Dorn*. Em todas as estações amostrais foram coletadas 6 amostras de água (3 amostras de superfície e 3 amostras de fundo) para a análise das concentrações de metais e As totais e 6 amostras (3 amostras de superfície e 3 amostras de fundo) de água filtrada (filtro de 0,45 µm de malha) para a análise das concentrações de metais e As na fração dissolvida. O volume de amostra de água coletado por réplica, que era de 100 mL, passou a ser de 250 mL. Sendo assim, foi adicionado em cada réplica acidificada um volume de 3,5 mL de ácido nítrico Suprapur 65%. As amostras de água acidificadas foram mantidas refrigeradas e as alíquotas com a especificação de congelamento, foram mantidas congeladas.
- (3) As coletas de amostras de sedimento destinadas às análises químicas seguiram a metodologia padrão empregada desde a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco). Em todas as estações amostrais utilizadas para a coleta de água foram coletadas também amostras de sedimento superficial com auxílio de draga do tipo *Van Veen*. Em cada local de amostragem foram coletadas 4 amostras de sedimento. As amostras foram abertas em caixas plásticas, buscando-se gerar um mínimo de perturbação na superfície do sedimento e fotografadas imediatamente após a coleta, a fim de registrar as características visuais do sedimento. Para a análise de metais e As, as amostras foram coletadas com o auxílio de espátula de plástico, raspando-se apenas os primeiros centímetros (0 - 5 cm) e obtendo-se apenas o sedimento superficial. A partir da Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), a massa de sedimento coletada por réplica que era de 50 g, passou a ser de, no mínimo, 200 g. Potes com capacidade total de 250 g foram preenchidos, deixando-se apenas o espaço de expansão do congelamento, para garantir a massa necessária de amostra para as determinações. As amostras de sedimentos foram mantidas congeladas.
- (4) A quantidade da massa de tecido muscular coletada por organismo foi aumentada, incrementando assim a representatividade da amostra e possibilitando, minimamente, a análise em duplicatas, para verificação de variações e precisão nos resultados e a robustez nas análises. Foi garantida massa úmida de 0,25 g em cada amostra de músculo de pescado. Organismos pequenos, como por exemplo camarões de água doce, foram amostrados em pools. As amostras de músculo de pescado destinadas à quantificação de elementos-traço foram acondicionadas em sacos zip e mantidas congeladas, com a identificação em papel vegetal, facilitando assim a secagem e posterior armazenamento dessas amostras.

## 2.2 ANÁLISES DE LABORATÓRIO

### *Avaliação da microbiota em água, sedimento e corais*

A análise da microbiota total em amostras de água, sedimento e fragmentos de corais foi realizada através da extração do DNA total, utilizando-se um kit comercial de reagentes (*PowerSoil DNA isolation kit*, Qiagen), seguindo orientações do fabricante. Posteriormente, foi realizado o sequenciamento de DNA, utilizando-se sequenciadores de nova geração (Illumina MiSeq). As leituras foram geradas e processadas utilizando-se o software Qiime2 v2023.5. Após a obtenção das sequências curadas, análises de ordenação, abundância relativa e diversidade foram geradas com a utilização do software R. A análise das sequências obtidas permitiu a avaliação do core microbiano e os microrganismos presentes nas diferentes amostras, pontos amostrais e períodos amostrais, correlacionando-se estatisticamente os resultados de diversidade microbiana obtidos com as demais análises realizadas no programa de monitoramento. Essa avaliação é importante não apenas para indicar possíveis alterações ambientais temporais e/ou pontuais, bem como para apontar bioindicadores microbianos tolerantes à presença de metais e As nas diferentes áreas amostradas, que podem ser rastreados em áreas adjacentes.

### *Análises das concentrações de metais e arsênio nas amostras ambientais e biológicas*

Para a extração dos metais e As totais e dissolvidos nas amostras de água foi utilizado o método EPA 3015A (U.S. EPA, 2007). As amostras de sedimento superficial coletadas foram liofilizadas, maceradas e homogeneizadas utilizando gral e pistilo de ágata. O processo de extração foi realizado de acordo com o método EPA 3051A (U.S. EPA, 2007) para determinação da fração disponível. As amostras de material biológico foram previamente secas em estufa (45-60°C) até peso constante e o teor de umidade foi obtido. A digestão foi realizada em um sistema de digestão por micro-ondas modelo Multiwave 3000 (Anton-Paar), equipado com um rotor para oito recipientes de quartzo do tipo 80 mL (operando na pressão de 80 bar), utilizando-se ácido nítrico ultrapuro (Suprapur, Merck). Todas as amostras foram diluídas a um fator de 10 vezes utilizando-se água ultrapura (18 MΩ cm), visando adequar as concentrações dos metais e As às daquelas das soluções dos padrões certificados, utilizadas para calibrar os equipamentos. As análises das concentrações de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn nas amostras ambientais (água e sedimento) e biológicas coletadas nas Campanhas 1 a 7, bem como nas amostras biológicas (exceto músculo de pescado: camarões e peixes) coletadas nas Campanhas de 8 a 11, foram realizadas de acordo com metodologia EPA 6020A (U.S. EPA, 1998), utilizando-se espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, Analytik Jena) em laboratórios especializados do PMBA. O controle de qualidade foi realizado através de brancos analíticos e ensaios de recuperação com materiais de referência certificados. Por sua vez, as amostras de água, sedimento e músculo de pescado (camarões e peixes) coletadas nas Campanhas 8 a 11 foram analisadas em laboratórios acreditados, por determinação da Fundação Renova.

Os valores das concentrações de metais e As nas amostras biológicas foram incorporados nos modelos matemáticos do Índice de Resposta de Bioacumulação (IBR Bioacumulação), o qual foi proposto por Beliaeff & Burgeot (2002) e otimizado por Devin et al. (2014). O valor do IBR Bioacumulação corresponde à soma da área definida pelo número de elementos dispostos em um diagrama de radar, seguindo uma etapa anterior de padronização das respostas dos elementos. Assim, o índice é calculado somando-se as áreas do gráfico estrela triangular (um método gráfico multivariado simples) para cada par de elementos vizinhos em um determinado conjunto de dados. Como o resultado do processo de cálculo depende fortemente da organização sequencial dos elementos, foi utilizado um procedimento que cria todas as permutações circulares possíveis relacionadas às concentrações de metais e As.

#### *Análises de biomarcadores*

Biomarcadores são alterações biológicas que expressam a exposição e os efeitos tóxicos dos poluentes presentes no ambiente e podem ser mensuradas em nível molecular, celular ou fisiológico (Walker et al., 1996). Portanto, os biomarcadores selecionados para um programa de monitoramento ambiental devem detectar a exposição do organismo aos contaminantes, através de qualquer alteração biológica mensurável (biomarcadores de exposição) e/ou a magnitude de resposta do organismo aos contaminantes (biomarcadores de efeito). Assim, os biomarcadores foram analisados de forma seletiva nas amostras de plâncton, invertebrados e peixes coletados no presente programa de monitoramento, considerando-se os potenciais efeitos biológicos dos metais (desequilíbrio iônico e osmótico, inibição enzimática, oxidação de biomoléculas e danos morfológicos) nos respectivos tecidos e organismos coletados. Os biomarcadores analisados ao longo do monitoramento do PMBA/Fest encontram-se listados no Quadro 1. Para fins de praticidade e rapidez na realização das análises, bem como de precisão e reprodutibilidade dos resultados, sempre que possível, foram utilizados kits comerciais de reagentes específicos que utilizam metodologia semelhante àquelas descritas abaixo, para a determinação dos respectivos biomarcadores.

Quadro 1: Lista dos biomarcadores analisados em amostras de organismos coletados pelo Tema Ecotoxicologia na foz do Rio Doce e região marinha adjacente realizados no Ano 1 (Campanha 1, set/out 2018 - período chuvoso e Campanha 2, jan/fev 2019 - período chuvoso), Ano 2 até Ano 4 (Campanha 3, set/out 2019 - período chuvoso e Campanha 4, jan/fev 2020 - período chuvoso, Campanha 5, jan/fev 2021 - período chuvoso, Campanha 6, jul/ago 2021 - período seco, Campanha 7, mar 2022 - período chuvoso e Campanha 8, set/out 2022 - período seco) e Anos 5 e 6 (Campanha 9, jan/fev 2023 - período chuvoso, Campanha 10, jun/jul 2023 - período seco e Campanha 11, jan 2024 – período chuvoso). “-” indica que a análise não faz mais parte do Plano de Trabalho.

BIOMARCADOR (classificação: efeito/exposição)			
AMOSTRA	ANO 1	ANO 2 ATÉ ANO 4	ANOS 5 E 6
Fitoplâncton	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)
Zooplâncton	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito) ❖ Composição iônica corporal (Ca, K, Mg e Na - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito) ❖ Composição iônica corporal (Ca, K, Mg e Na - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)
Hemolinfa de camarões	❖ Danos ao DNA (MN e Sítios AP - efeito)	❖ Danos ao DNA (Sítios AP - efeito)	-
Brânquias de camarões	❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)	❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MTO - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)
Hepatopâncreas de camarões	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito) ❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito)
Músculo de camarões	❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito)	❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito)	❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito) ❖ Danos ao DNA (Sítios AP - efeito)
Sangue de peixes	❖ Danos ao DNA (MN e Sítios AP - efeito) ❖ Composição iônica plasmática (Ca, K, Mg e Na - efeito) ❖ Desreguladores endócrinos (Vtg e Zrp - efeito)	❖ Danos ao DNA (MN e Sítios AP - efeito) ❖ Desreguladores endócrinos (Vtg e Zrp - efeito)	-
Brânquias de peixes	❖ Atividade de enzimas antioxidantes (SOD e CAT - efeito) ❖ Atividade de enzimas do metabolismo energético (MDH e LDH - efeito) ❖ Danos morfológicos (IL - efeito)	❖ Atividade de enzimas antioxidantes (SOD e CAT - efeito) ❖ Atividade de enzimas do metabolismo energético (MDH e LDH - efeito) ❖ Danos morfológicos (IL - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito) ❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito) ❖ Atividade de enzimas antioxidantes

BIOMARCADOR (classificação: efeito/exposição)			
AMOSTRA	ANO 1	ANO 2 ATÉ ANO 4	ANOS 5 E 6
			(SOD e CAT - efeito) ❖ Atividade de enzimas do metabolismo energético (LDH - efeito) ❖ Danos morfológicos (IL - efeito) ❖ Danos ao DNA (Sítios AP - efeito)
Fígado de peixes	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito) ❖ Atividade de enzimas antioxidantes (SOD e CAT - efeito) ❖ Atividade de enzimas do metabolismo energético (MDH e LDH - efeito) ❖ Danos morfológicos (IL - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito) ❖ Atividade de enzimas antioxidantes (SOD e CAT - efeito) ❖ Atividade de enzimas do metabolismo energético (MDH e LDH - efeito) ❖ Danos morfológicos (IL - efeito)	❖ Concentração de metalotioneína (MT - exposição) ❖ Peroxidação lipídica (LPO - efeito) ❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito) ❖ Atividade de enzimas antioxidantes (SOD e CAT - efeito) ❖ Atividade de enzimas do metabolismo energético (LDH - efeito) ❖ Danos morfológicos (IL - efeito)
Músculo de peixes	❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito)	❖ Oxidação de proteínas (PCO - efeito)	-
Corais e hidrocorais	❖ Peroxidação lipídica (efeito) ❖ Atividade de enzimas envolvidas na calcificação: (Ca-ATP, Mg-ATP e AC - efeito)	❖ Peroxidação lipídica (efeito) ❖ Atividade de enzimas envolvidas na calcificação: (Ca-ATP, Mg-ATP e AC - efeito)	❖ Peroxidação lipídica (efeito) ❖ Atividade de enzimas envolvidas na calcificação: (Ca-ATP, Mg-ATP e AC - efeito) ❖ Danos ao DNA (Sítios AP - efeito)

AC = anidrase carbônica; Ca-ATP =  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase; CAT = atividade da enzima catalase; IL = índices médios de lesões histopatológicas; LDH = atividade da enzima lactato desidrogenase; LPO = lipoperoxidação; Mg-ATP =  $\text{Mg}^{2+}$ -ATPase; MN = teste de micronúcleo; MT = concentração de metalotioneína; PCO = proteínas carboniladas; sítios AP = níveis de Sítios AP (apurínicos/apirimídicos); SOD = atividade de superóxido dismutase; Vtg = vitelogenina; e Zrp = proteínas da zona radiata.

A determinação da concentração de metalotioneínas (MT) foi realizada usando-se um kit comercial de reagentes (*Fish Metallothionein ELISA Kit*, MyBiosource), cujo princípio de análise utiliza um método espectrofotométrico em microplaca. Os procedimentos analíticos para determinação da concentração das MT seguiram aqueles descritos pelo fabricante do kit. Os resultados foram expressos em  $\mu\text{g}$  MT/mg proteína.

O preparo de amostras de fragmentos de coral para análise dos parâmetros de calcificação foi realizado macerando-se as amostras em nitrogênio líquido. Para cada análise, as amostras foram homogeneizadas em tampão específico (1:1; peso/volume) com o auxílio de um sonificador. As amostras foram homogeneizadas e centrifugadas (10.000 g, 20 min, 4°C) e o sobrenadante coletado para as

análises das atividades das enzimas  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase,  $\text{Mg}^{2+}$ -ATPase e anidrase carbônica. A quantificação de proteínas totais nas amostras homogeneizadas foi realizada utilizando-se o método de Bradford (1976).

A determinação da atividade da anidrase carbônica (AC) foi realizada medindo-se a redução de pH associada à catálise da hidratação do  $\text{CO}_2$ , com a correspondente liberação de  $\text{H}^+$  (Henry, 1991). O tampão utilizado para homogeneização das amostras foi constituído de Tris-Base (10 mM, pH 8,5), sacarose (75 mM), inibidor de proteases (fluoreto de fenilmetanosulfonil – PMSF 1 mM) e ditritiotreitol (DTT 1 mM). Para isso, 15  $\mu\text{L}$  do homogeneizado foram adicionados a 3 mL de uma solução de reação composta por Tris-Base (10 mM, pH 8,5), sacarose (75 mM), manitol (225 mM) e fosfato (10 mM). Em seguida, foram adicionados 280  $\mu\text{L}$  de substrato (água destilada saturada com  $\text{CO}_2$ ) e o decréscimo de pH registrado a cada 5 s, durante 30 s, com o auxílio de um pHmetro de bancada. Paralelamente, foram realizadas determinações do “branco de reação”, onde 15  $\mu\text{L}$  do tampão de homogeneização foram adicionados à solução de reação e ao substrato. Utilizou-se o modelo de regressão linear (variável dependente: pH; variável independente: tempo) para determinar a declividade das retas de reação e os resultados foram normalizados considerando-se a quantidade de proteínas nas amostras e expressos em Unidades de anidrase carbônica/mg proteína.

A determinação das atividades da  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase e da  $\text{Mg}^{2+}$ -ATPase foi realizada utilizando-se o método descrito por Vajreswari et al. (1983), com modificações. O homogeneizado da amostra foi preparado utilizando-se tampão composto por Tris-HCl (100 mM, pH 7,6), sacarose (500 mM), DTT (1 mM) e PMSF (1 mM). O homogeneizado foi centrifugado (20 min, 10.000 g, 4°C) e 20  $\mu\text{L}$  do sobrenadante foi utilizado para as análises. O meio de reação utilizado na análise da atividade da  $\text{Ca}^{2+}$ -ATPase foi composto por NaCl (189 mM),  $\text{MgCl}_2$  (5 mM),  $\text{CaCl}_2$  (5 mM) e Tris-HCl (20 mM, pH 7,6). A incubação ocorreu a 30°C por 30 min. Por sua vez, o meio de reação utilizado na análise da atividade da  $\text{Mg}^{2+}$ -ATPase foi composto por NaCl (189 mM),  $\text{MgCl}_2$  (5 mM), EGTA (0.2 mM) e Tris-HCl (20 mM, pH 7,6). A incubação da reação foi realizada a 30°C por 30 min. No início da incubação, ATP (3 mM) e ouabaína (1mM) foram adicionados aos meios de reação. A concentração de fosfato inorgânico ( $\text{Pi}$ ) liberada pela atividade das enzimas no meio de reação foi determinada por colorimetria (630 nm). Os resultados foram normalizados considerando a quantidade de proteínas nas amostras e expressos em mM  $\text{Pi}$ /mg proteína/minuto.

A atividade da lactato desidrogenase (LDH) foi analisada em homogeneizados das amostras de brânquias e fígado dos peixes coletados durante o monitoramento. Os homogeneizados foram realizados por maceração mecânica em mistura de tampão fosfato de potássio (pH 7,46) e inibidor de protease. Após centrifugação, o sobrenadante obtido foi utilizado para a análise da atividade da LDH. A avaliação da atividade de LDH foi realizada utilizando-se o kit comercial Desidrogenase Láctica LDH UV® (Bioclin). Os procedimentos para a análise enzimática da LDH foram aqueles descritos pelo fabricante Bioclin, e conforme a metodologia descrita por Childress & Somero (1979) e adaptada por Ribeiro et al. (2015). A taxa de oxidação de NADH na reação catalisada pela enzima foi determinada por espectrofotometria UV (340 nm). A dosagem de proteínas totais dos homogeneizados foi realizada



através do método de Bradford (1976). A atividade enzimática foi expressa em Unidades Enzimáticas/mg de proteína.

As atividades da catalase (CAT) e da superóxido dismutase (SOD) foram determinadas nos homogeneizados de tecidos preparados conforme descrito no parágrafo acima. A atividade da CAT foi determinada através da análise do decréscimo da concentração de peróxido de hidrogênio ( $H_2O_2$ ), conforme descrito por Aebi (1984). Por sua vez, a atividade da SOD foi medida através da taxa de inibição da auto-oxidação do pirogalol, de acordo com o protocolo de Marklund & Marklund (1974). A dosagem de proteínas totais dos homogeneizados foi realizada através do método de Bradford (1976). As atividades enzimáticas foram expressas em Unidades Enzimáticas/mg de proteína.

A lipoperoxidação (LPO) foi determinada no material biológico utilizando-se um método espectrofotométrico em microplaca, seguindo as recomendações do fabricante do kit comercial *TBARS Assay Kit* (Chayman Chemical). O método utilizado quantifica os danos em lipídios por meio da reação do malondialdeído (MDA), produto da peroxidação lipídica, com o ácido tiobarbitúrico. Esta reação ocorre em condições de acidez e alta temperatura (95°C), gerando um cromógeno fluorescente. A fluorescência gerada foi medida utilizando-se um espectrofluorímetro (excitação: 520 nm; emissão: 580 nm). Os dados foram calculados com base em uma curva construída com soluções padrão de MDA, sendo os resultados normalizados em relação ao conteúdo de proteínas nas amostras, o qual foi determinado utilizando-se o método de Bradford (1976). Assim, os resultados foram expressos em nmol MDA/mg proteína.

Os danos oxidativos em proteínas (PCO) foram determinados utilizando-se um kit comercial de reagentes (*Protein Carbonyl Fluorometric Assay*, Chayman Chemical, ou outro kit similar). Durante o ensaio, as proteínas carboniladas (PCO) (oxidadas) foram inicialmente derivatizadas com um fluoróforo específico que se liga ao grupo carbonila da proteína na proporção de 1:1. Após isso, as proteínas foram precipitadas com ácido tricloroacético (TCA) e o fluoróforo livre removido por meio da lavagem do precipitado proteico com acetona. Após a solubilização do precipitado proteico em hidrócloro de guanidina, a absorbância do produto proteína-fluoróforo foi determinada fluorimetricamente (emissão: 485; excitação: 538 nm) e o conteúdo de proteínas carboniladas calculado. Os resultados foram expressos em nmol PC/mg proteína.

Para a análise de danos ao DNA, foi utilizada a quantificação de sítios AP no material genético. Para isto, o DNA genômico foi previamente isolado utilizando-se um kit de reagentes para isolamento de DNA (*Wizard® Genomic DNA Purification Kit*, Promega Corporation, ou outro kit similar). A análise de sítios AP propriamente dita foi realizada utilizando-se uma sonda capaz de reagir com o grupo aldeído destes sítios, a qual foi detectada por colorimetria (450 nm) em uma leitora de microplacas. Para tal, foi utilizado um kit de reagentes de detecção de dano ao DNA, seguindo-se as instruções do fabricante (*DNA Damage Detection Kit*, ou outro kit similar). Os resultados foram expressos em sítios AP/ $10^5$  pares de bases (bp).

Efeitos histopatológicos foram avaliados nas amostras de brânquias e fígado dos peixes. Fragmentos de fígado e brânquias foram imersos em solução de Bouin por 6-8 h, desidratados em concentrações

crescentes de álcool, diafanizados em xilol e incluídos em paraplast. O material foi seccionado em micrótomo rotativo. As secções obtidas foram coradas com hematoxilina/eosina e tricômio de Mallory. Algumas lâminas foram submetidas à técnica de coloração PAS. Para tal, foram banhadas em ácido periódico 1% por 10 min, lavadas em água destilada e mergulhadas em Reativo de Schiff, por 20 min. Em seguida, foi realizada uma nova lavagem em água corrente por 10 min, seguida de coloração com hematoxilina de Harris por 3 min, lavagens em água destilada, desidratação e montagem. As alterações nos fígados e brânquias foram determinadas de acordo com o método proposto por Bernet et al. (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, onde cada lesão possui um grau de importância. O Índice do Órgão (Iorg) 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 (Irp) 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 dados dos biomarcadores foram incorporados nos modelos matemáticos do Índice de Resposta de Biomarcador (IBR Biomarcador), o qual foi proposto por Beliaeff & Burgeot (2002) e otimizado por Devin et al. (2014). O valor do IBR Biomarcador corresponde à soma da área definida pelo número de elementos dispostos em um diagrama de radar, seguindo uma etapa anterior de padronização das respostas dos elementos. Assim, o índice é calculado somando-se as áreas do gráfico estrela triangular (um método gráfico multivariado simples) para cada par de elementos vizinhos em um determinado conjunto de dados. Como o resultado do processo de cálculo depende fortemente da organização sequencial dos elementos, foi utilizado um procedimento que cria todas as permutações circulares possíveis relacionadas às respostas dos biomarcadores.

### *Ensaio ecotoxicológicos*

Ensaio ecotoxicológicos foram realizados para classificar amostras de água e sedimento coletadas na região marinha adjacente ao Rio Doce, quanto às suas toxicidades. Os pontos de amostragem estão apresentados no Quadro 2. Cabe ressaltar que, a partir do Período de Transição, um ponto de coleta em Degredo (DEG1) foi incluído no monitoramento. As amostras de água e sedimento total foram coletadas, armazenadas e preparadas segundo a norma da ABNT NBR 15469, visando a realização dos testes de toxicidade descritos na Tabela 2. O elutriado de sedimento também foi preparado seguindo a norma supramencionada. Cabe destacar que a partir da Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), os testes com amostras de água e elutriado utilizando o ouriço-do-mar *Echinometra lucunter* (crônico - ABNT NBR 15350), bem como os ensaios com amostras de sedimento total utilizando o copépode *Nitokra* sp (Lotufo & Abessa, 2002) foram realizados por laboratório acreditado por determinação da Fundação Renova. Os demais ensaios foram realizados por laboratórios especializados do PMBA, são eles: teste com as microalgas da espécie *Thalassiosira pseudonana*

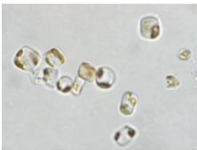





(ABNT NBR 16181), teste com o peixe *Poecilia vivipara* (OECD 203), teste agudo com água e elutriato utilizando o ouriço-do-mar *Echinometra lucunter* (agudo - Lotufo & Abessa, 2002). Para o cálculo do índice de toxicidade, levou-se em consideração a severidade da resposta observada (Quadro 3) e a sensibilidade do organismo testado (Quadro 4). As respostas subletais foram classificadas como menos severas e a letalidade como mais severa; enquanto os organismos mais sensíveis foram valorizados, recebendo maior número na escala de sensibilidade. A valorização das espécies mais sensíveis é importante para que o impacto não seja subestimado. Os valores de toxicidade foram usados para classificar as amostras desde não-tóxicas até altamente tóxicas (Tabela 3). Vale lembrar que, para cada ponto amostral, esta classificação foi feita separadamente para água e sedimento, e levou em consideração a média dos valores de toxicidade resultantes dos diferentes ensaios realizados com as matrizes ambientais.

Quadro 2: Pontos amostrais na foz do Rio Doce e região marinha adjacente onde foram coletadas amostras de água e sedimento usados para os testes de toxicidade realizados no Ano 1 (Campanha 1 – set/out 2018 e Campanha 2 – jan/fev 2019), Ano 2 (Campanha 3 – set/out 2019 e Campanha 4 – jan/fev 2020), Ano 3 (Campanha 5 – jan/fev 2021 e Campanha 6 – jul/ago), Ano 4 (Campanha 7 – mar/ 2022 e Campanha 8 – set/out 2022) e Anos 5 e 6 (Campanha 9 – jan/fev 2023, Campanha 10 -jun/jul 2023 - período seco e Campanha 11, jan 2024 – período chuvoso). O ponto CA2 não foi amostrado na Campanha 3 (set/out 2019). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - **APA** [Costa das Algas 1 (CA1); Costa das Algas 2 (CA2)]; **Foz** [Foz do Rio Doce 1 (FRD1); e Foz do Rio Doce 6 (FRD6)]; e **Norte** [Degredo 1 (DEG1)].

AMBIENTE	ANO 1	ANOS 2, 3, 4 e 5
Marinho	FRD1	FRD1
	FRD6	FRD6
	CA1	CA1
	CA2	CA2
		DEG1

Tabela 2: Resumo dos ensaios de toxicidade realizados com amostras coletadas na malha amostral marinha do Tema Ecotoxicologia do PMBA/Fest.

Informação	Microalga	Crustáceo	Ouriço-do-mar	Peixe
Espécie	 <i>Thalassiosira pseudonana</i> <sup>1</sup>	 <i>Nitokra sp</i> (copépode) <sup>2</sup>	 <i>Echinometra lucunter</i> <sup>3</sup>	 <i>Poecilia vivipara</i> <sup>4</sup>
Procedência do organismo	Banco de Microrganismos Aidar & Kutner – BMAK 172 – IO/USP	Cultivo da Empresa Aplysia	Ambiente Natural – Coqueiral/ES (Ensaio agudo) Ambiente Natural – Jacaraípe/ES (Ensaio crônico)	Biotério Aquático do ICB/FURG
Matriz	Água Superficial/Elutriato de Sedimento	Sedimento Bruto	Água Superficial/Elutriato de Sedimento	Água Superficial/Elutriato de Sedimento
Tipo do teste	Crônico	Crônico	Agudo/Crônico	Agudo
Método	ABNT NBR 16181	Lotufo & Abessa (2002)	Lotufo & Abessa (2002)/ ABNT NBR 15350	OECD 203
Duração	72 h	10 dias	2 h/48 h	96 h
Indicador de toxicidade	Inibição da multiplicação das algáceas	Número de fêmeas/prole	Óvulos fecundados/Larvas desenvolvidas	Mortalidade

Legenda: <sup>1</sup> <https://ncma.bigelow.org/ccmp1014#.XW5t-yMrK1t>; <sup>2</sup> [http://v3.boldsystems.org/index.php/Taxbrowser\\_Taxonpage?taxid=683171](http://v3.boldsystems.org/index.php/Taxbrowser_Taxonpage?taxid=683171); <sup>3</sup> Acervo do projeto; <sup>4</sup> <http://museunacional.ufrj.br/hortobotanico/Peixes/Poeciliavivipara.html>

Quadro 3: O valor de severidade foi atribuído de acordo com severidade da resposta observada nos ensaios de toxicidade. O parâmetro mais tóxico é classificado com maior valor.

Resposta Observada	Valor atribuído
Letal	2
Subletal (desenvolvimento, crescimento, fecundação e reprodução)	1

Quadro 4: O valor de sensibilidade foi atribuído aos organismos de acordo com os modelos biológicos usados nos ensaios de toxicidade. Os valores são diretamente relacionados à sensibilidade dos organismos, sendo, portanto, o maior valor atribuído aos organismos mais sensíveis, e o menor valor aos menos sensíveis (mais tolerantes).

Organismo-teste	Valor atribuído
Plâncton (microalgas, microcrustáceos, ovos e larvas de ouriços e larvas de peixes)	3
Peixe juvenil	2
Peixe adulto	1

Tabela 3: Classificação da amostra com relação ao valor de toxicidade. “NE” refere-se a valor não estimável; e “NA” refere-se a valor não disponível, pela ausência de coleta.

Valor de Toxicidade	Classificação da amostra
>100	Altamente tóxica
51 – 100	Tóxica
26 – 50	Moderadamente tóxica
2 – 25	Levemente tóxica
≤1 ou NE	Não tóxica
NA	Ausência de dados

Fonte: Adaptado de BULICH (1982).

## 2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

As principais modificações metodológicas envolveram a otimização no volume das amostras de água, sedimento e biota destinadas as determinações de metais e As, a partir da Campanha 8 (set/out 2022), aumentando assim a representatividade da amostra e possibilitando, minimamente, a análise em duplicatas, para verificação de variações e precisão nos resultados. Estas modificações encontram-se descritas na seção anterior. A partir da Campanha 6 (jul/ago 2021), as análises das concentrações de Al, As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Ni, Pb e Zn nas amostras ambientais (água e sedimento) e biológicas passaram a ser realizadas de acordo com metodologia EPA 6020A (U.S. EPA, 1998), utilizando-se espectrômetro de massa com plasma indutivamente acoplado (ICP-MS, Analytik Jena). Além disso, a partir da Campanha 8 (set/out 2022), as análises de metais e As nas amostras de água, sedimento e músculo de pescado (camarões e peixes) passaram a ser realizadas por laboratórios acreditados, por determinação da Fundação Renova.

Tendo em vista que o conjunto de biomarcadores analisado na biota marinha sofreu modificações importantes a partir do Novo Ciclo do PMBA/Fest (conforme descrito no Quadro 1), fizeram-se necessárias adequações na composição dos parâmetros do IBR Biomarcador para camarões e peixes. Sendo assim, para o cálculo dos valores deste índice apresentados no RSE2023, bem como neste RA2023, foram mantidos apenas os biomarcadores comuns a todas as Campanhas (Campanhas 1 a 11), visando uma comparação temporal adequada da evolução da resposta biológica nos organismos marinhos.

Também houve modificações metodológicas nos ensaios de toxicidade. Como mencionado anteriormente, a partir do Período de Transição, o ponto em Degredo (DEG1) foi incluído no monitoramento. Cabe destacar também que, a partir da Campanha 7 (março 2022), parte dos ensaios foram realizados por laboratório acreditado, sendo os seguintes ensaios toxicológicos: testes com água e elutriado, utilizando o ouriço-do-mar *Echinometra lucunter* (crônico - ABNT NBR 15350) e teste com sedimento total utilizando o copépode *Nitokra* sp (Lotufo & Abessa, 2002). Tais testes de toxicidade, realizados anteriormente por laboratórios especializados do PMBA/Fest e atualmente por laboratório acreditado, seguem os mesmos padrões de calibração e qualidade, devidamente informados e checados por pesquisadores do PMBA/Fest. Os tratamentos estatísticos, devidamente explicitados nas referências citadas na Tabela 2, são aplicados pelos pesquisadores do PMBA/Fest a partir dos dados brutos fornecidos pelo laboratório acreditado, de forma a padronizar a expressão dos resultados e permitir comparações seguras no âmbito de todo período monitorado.

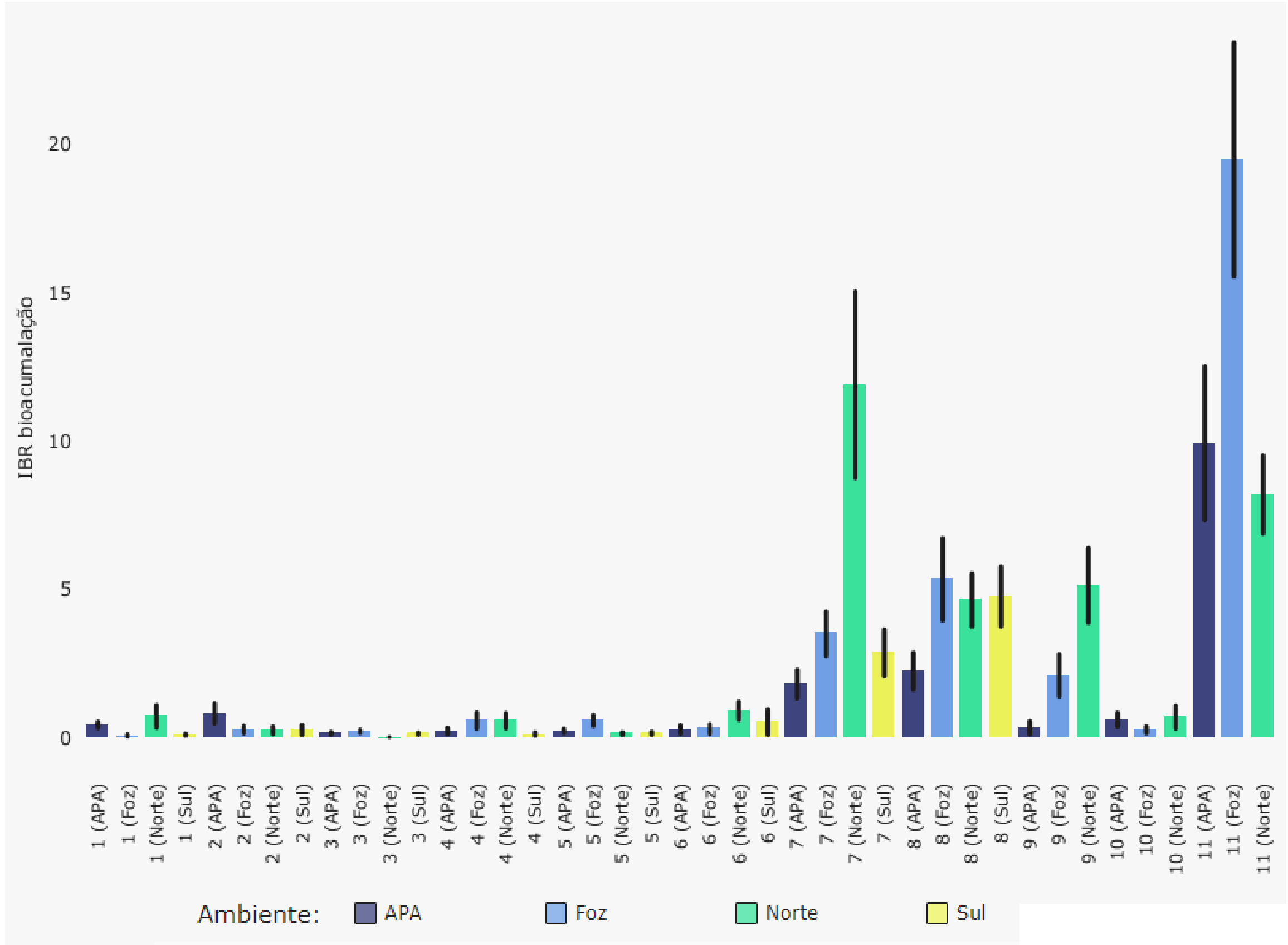
### **3 RESULTADOS DOS INDICADORES**

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo de todo monitoramento na área ambiental I. Vale ressaltar que os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

3.1 ÍNDICE DE BIOACUMULAÇÃO (*IBR Bioacumulação*)

Figura 1: Valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção ambiental - **APA** [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; **Foz** [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; **Norte** [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e **Sul** [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.

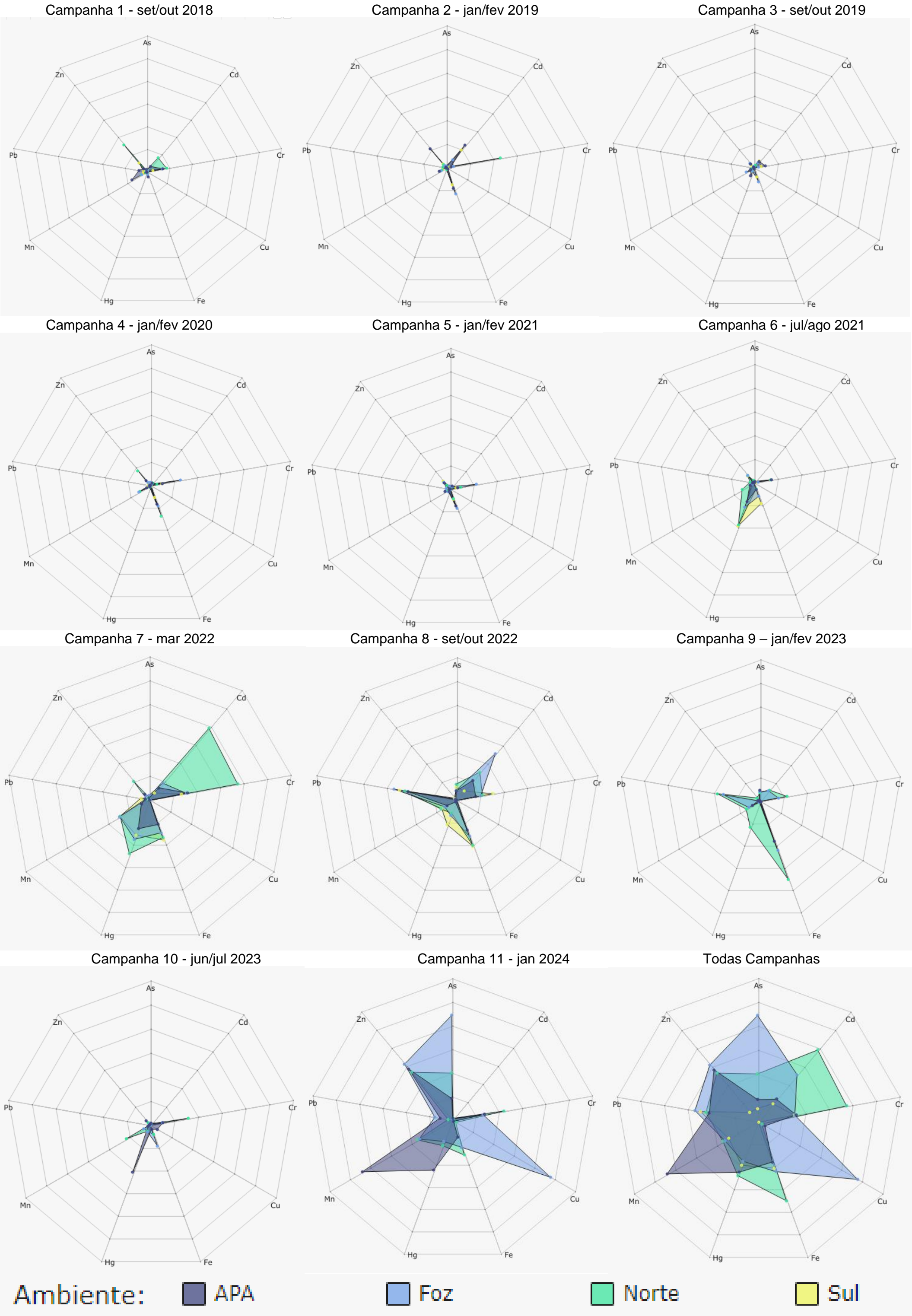


O gráfico de barras dos valores do Índice de bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, está representado na Figura 1. Este gráfico permite realizar comparações das tendências espaço-temporais de bioacumulação dos metais e As no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. O IBR Bioacumulação integra diferentes respostas biológicas e origina um indicativo/valor sintético e holístico do estado de “saúde” dos organismos analisados.

De maneira geral, os valores do IBR Bioacumulação se mantiveram, em todos os Setores analisados, com valores menores e de maneira mais estável da Campanha 1 até a Campanha 6. Contudo, na Campanha 7 houve um aumento significativo nos resultados deste índice em todos os Setores analisados, o qual se manteve elevado também na Campanha 8. Nas Campanhas 9 e 10, apesar do IBR Bioacumulação no Setor Norte na Campanha 9 se mostrar ainda elevado, notou-se uma tendência de diminuição dos valores do índice. Em contrapartida, na Campanha 11, houve um aumento geral no índice para todos os Setores avaliados, atingindo os maiores valores de IBR Bioacumulação até então registrados ao longo do monitoramento, exceto para o setor Norte. Cabe ressaltar que, como base da cadeia alimentar, o plâncton representa uma fonte de contaminação de metais e As para outros organismos da cadeia trófica, indicando assim uma preocupação quanto aos períodos onde observou-se um maior nível de contaminação ambiental por metais e As neste grupo de organismos (Campanhas 7, 8, 9 e 11). Os organismos fitoplanctônicos absorvem os contaminantes dissolvidos na água e o transferem para o zooplâncton, os quais são os consumidores primários. Desta forma, o zooplâncton irá, por sua vez, fazer a integração entre os produtores primários e os níveis superiores da cadeia trófica. Ressalta-se que o zooplâncton faz parte da dieta de diversas espécies aquáticas, como por exemplo, larvas de espécies de peixes de importância econômica (Chevrollier et al., 2022; Lomartire et al., 2021). Ainda, a exposição crônica e a bioacumulação por metais pode diminuir a reprodução do zooplâncton marinho, bem como a biodiversidade da comunidade zooplanctônica (Hussain et al., 2020; Ju et al., 2019). Considerando-se que tanto o fitoplâncton como o zooplâncton absorvem os contaminantes, incluindo os metais e As, diretamente a partir da água e que o zooplâncton também pode se contaminar de forma indireta, via dieta, através do consumo de organismos fitoplanctônicos, as variações temporais observadas nos valores de IBR Bioacumulação descritos acima estão refletindo, portanto, as variações temporais nas concentrações dos elementos (metais e As) analisados na água dos ambientes monitorados. Por sua vez, sabe-se as concentrações dos metais e As, bem como a disponibilidade destes elementos no meio aquático, dependem de diversos fatores, especialmente do incremento da carga de contaminantes despejadas no ambiente a partir de fontes de origem antrópica (por exemplo, dos rejeitos de mineração), bem como das condições físicas, químicas e hidrológicas do ambiente vigentes no momento da coleta do material biológico,.



Figura 2: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de plâncton do Oceano (fitoplâncton e zooplâncton) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Metais analisados: Arsênio (As); Cádmio (Cd); Chumbo (Pb); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Ferro (Fe); Manganês (Mn); Mercúrio (Hg); e Zinco (Zn). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



Os gráficos de radar apresentados na Figura 2 foram obtidos a partir do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) de cada Setor avaliado e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal da bioacumulação de cada metal e do As no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) do Ambiente Marinho, bem como a contribuição destes para a composição do referido índice.

As Campanhas 7, 8, 9 e 11 foram as que apresentaram os maiores valores de IBR Bioacumulação e a maior diversidade de metais compondo esse índice.

Na Campanha 7, o Setor Norte se destacou com os maiores valores do IBR Bioacumulação, no qual os metais Cd, Cr, Hg, Mn, Zn e Fe participaram da composição do índice. Neste Setor, os maiores valores do índice se concentraram no Cd e Cr. Por sua vez, no Setor Foz, o IBR Bioacumulação foi composto com a contribuição do Cd, Cr, Fe, Hg, Mn e Zn, sendo que os maiores valores de contribuição foram fornecidos pelos metais Cd, Cr, Fe, Hg e Mn. Em relação ao Setor APA, os metais Cd, Cr, Fe, Hg, Mn e Zn foram relevantes na composição do índice, porém os picos de valores estiveram presentes para o Cr, Fe e Hg. Por fim, os metais Mn, Hg, Fe, Cr, Pb e Cd foram aqueles que compuseram o IBR Bioacumulação no Setor Sul, com destaque para os valores mais elevados de Fe, Hg, Mn e Cr.

Em relação à Campanha 8, a diversidade de elementos compondo o IBR Bioacumulação nos quatro Setores analisados mostrou-se bem similar, sendo que os elementos As, Cd, Cr, Fe, Hg, Mn e Pb foram comuns a todos os Setores avaliados. Além disso, vale ressaltar que, em todos os Setores avaliados, os metais Cd, Fe e Pb se destacaram pelos picos de seus valores. No Setor Norte, foi observada também a presença do Cd e o alto valor de Mn contribuindo para a composição do IBR Bioacumulação. No Setor Foz, o Hg e o Cd (com destaque para alto valor no Cd) também se mostram como importantes contribuidores para a formação do índice. No Setor Sul, foi observada a ocorrência do Hg, juntamente com os demais elementos supracitados.

Na Campanha 9, o IBR Bioacumulação foi maior no Setor Norte, sendo que os elementos com os valores mais altos foram Fe, Hg, Pb, Mn, Cr e As, com destaque para o Fe. Por sua vez, o Pb, Mn, Fe, Cr, Cd e As participaram da formação do resultado do IBR Bioacumulação no Setor Foz, sendo que os maiores valores estiveram associados ao Pb e Fe. Por fim, no Setor APA, os elementos que mais contribuíram para a formação do IBR Bioacumulação foram o Cd, Cu, Fe, As, Hg e Zn, sendo que os valores mais evidentes foram para o As e Fe. Dentre estes elementos citados, os que estavam presentes em todos os Setores avaliados foram o As, Fe e Mn.

Na Campanha 10, a distribuição do As, Cu, Fe, Hg e Zn foi similar em todos os Setores, contribuindo uniformemente para a composição do IBR Bioacumulação. Dentre esses, o Hg foi o elemento que apresentou o maior valor.

Na Campanha 11, no Setor Foz, foi observado o maior valor do IBR Bioacumulação observado em todo o período do monitoramento para todos os Setores. Neste Setor, o Zn, As e Cu foram os elementos que mais contribuíram para a composição do índice. Além desses elementos, o IBR Bioacumulação também foi composto por Cr, Fe, Hg, Mn, Zn e Pb. O valor do índice para o Setor APA teve grande

contribuição do Mn, porém Zn, As, Cr, Cu, Fe e Hg também foram elementos que apresentaram importantes contribuições. Já no Setor Norte, a maior contribuição para a composição do IBR Bioacumulação foi do Zn, porém o As, Hg, Mn, Fe e Cr também estiveram presentes nesta composição.

De uma forma geral, os elementos que mais ocorreram ao longo do monitoramento foram o Cd, Cr, Cu, Fe, Mn e Zn, além do As. Entretanto, em diversas Campanhas foram observados valores relevantes de IBR Bioacumulação com elementos considerados altamente tóxicos, como As, Pb, Cd e Hg. Além disso, é interessante observar que os valores altos observados para esses elementos altamente tóxicos começaram a ser observados a partir da Campanha 6, sendo que na Campanha 11 houve um aumento geral e expressivo no valor do IBR Bioacumulação para todos os Setores avaliados. Cabe destacar que os valores observados foram os maiores até então já registrados no âmbito do PMBA/Fest, exceto para o setor Norte. Neste contexto, cabe ainda ressaltar que diversos destes elementos tóxicos estão presentes nos rejeitos oriundos do rompimento da Barragem de Fundão (de Oliveira Gomes et al., 2017) ou podem ser mobilizados a partir da lixiviação destes rejeitos (Segura et al., 2016). Por fim, vale lembrar que os metais Cr, Fe, Zn e Mn são micronutrientes, ou seja, em pequenas quantidades são essenciais para o funcionamento dos organismos vivos. Entretanto, em concentrações excessivas, estes metais podem também causar efeitos tóxicos à biota e ao ser humano (Lokeshappa et al., 2012).

Tabela 4: Concentração média de metais (mg.Kg<sup>-1</sup>) em amostras de zooplâncton coletadas nos diferentes setores do ambiente marinho durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso) e Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco), comparadas com a concentração média de metais em amostras de zooplâncton coletadas na foz do Rio Doce antes da chegada dos rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão (Bianchini, 2019). Concentrações dos metais abaixo dos dados pretéritos estão destacadas em verde enquanto concentrações acima dos valores pretéritos estão destacadas em vermelho. A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]; APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1 – a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. Fonte: 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.

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos à chegada dos rejeitos	Expedição ICMBio (nov/2015)	Foz do Rio Doce	Zooplâncton	0,121	0,001	0,150	0,069	15,550	6,684	0,005
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 1 (set/out 2018)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,029	0,300	0,141	0,284	24,060	0,846	0,035
		Barra Nova (BN)		0,271	3,181	1,761	6,326	16,732	10,371	0,168
		Costa das Algas (CA)		0,278	0,183	0,921	2,325	68,656	17,179	2,365
		Degredo (DEG)		0,224	0,100	0,163	1,256	7,925	1,311	0,041
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,041	0,066	0,665	2,094	44,070	2,837	0,081
		Guarapari (GUA)		0,061	0,080	0,415	0,550	3,051	2,241	0,616
		Itaúnas (ITA)		0,139	0,317	0,810	1,296	5,127	2,334	0,172
		Vitória (VIX)		0,095	0,121	0,493	0,874	94,526	4,156	0,741
	Campanha 2 (jan/fev 2019)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,028	0,026	0,138	0,283	20,366	1,968	0,171
		Barra Nova (BN)		0,201	0,014	4,749	0,155	46,362	9,556	0,806
		Costa das Algas (CA)		0,086	1,340	0,209	1,661	176,630	2,848	0,005
		Degredo (DEG)		0,142	0,014	1,678	1,452	11,819	1,658	0,444
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,245	0,548	0,316	0,637	220,278	2,934	0,026
		Guarapari (GUA)		0,009	1,092	0,051	0,216	56,573	1,249	0,012
		Itaúnas (ITA)		0,024	0,078	0,088	0,144	8,651	1,106	0,016
		Vitória (VIX)		0,005	1,285	0,100	0,579	49,525	0,938	0,005

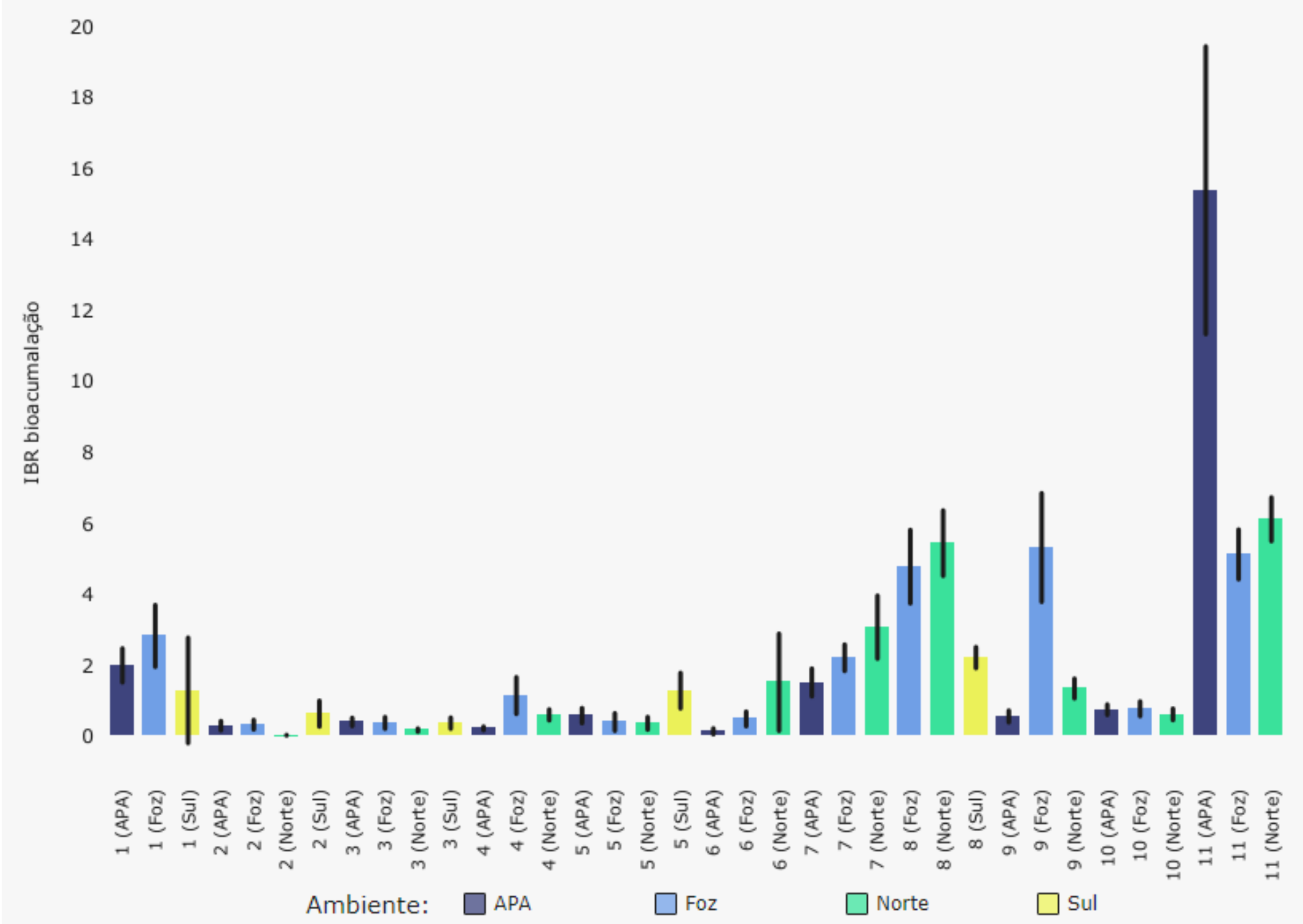


Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos à chegada dos rejeitos	Expedição ICMBio (nov/2015)	Foz do Rio Doce	Zooplâncton	0,121	0,001	0,150	0,069	15,550	6,684	0,005
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 3 (set/out 2019)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,167	0,176	0,115	0,054	26,612	0,837	0,095
		Barra Nova (BN)		0,090	0,118	0,085	0,068	20,426	1,173	0,026
		Costa das Algas (CA)		0,098	0,409	0,374	0,051	13,086	1,462	0,008
		Degredo (DEG)		0,246	0,359	0,197	0,050	12,103	3,013	0,022
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,122	0,323	0,296	0,173	220,738	5,090	0,013
		Guarapari (GUA)		0,036	0,455	0,066	0,214	39,189	0,580	0,016
		Itaúnas (ITA)		0,083	0,039	0,034	0,051	6,574	0,490	0,018
		Vitória (VIX)		0,155	0,402	0,185	0,069	37,827	1,244	0,012
	Campanha 4 (jan/fev 2020)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,535	0,106	0,447	2,650	3,203	4,167	0,231
		Barra Nova (BN)		0,043	0,117	0,184	0,235	288,067	10,765	0,089
		Costa das Algas (CA)		0,017	0,137	0,429	0,404	153,356	1,762	0,103
		Degredo (DEG)		0,075	0,134	0,095	2,164	243,702	4,501	0,018
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,180	0,058	1,179	1,216	182,275	2,911	0,097
		Guarapari (GUA)		0,504	0,080	0,830	1,087	90,627	1,034	0,158
		Itaúnas (ITA)		0,013	0,293	0,864	1,008	326,764	4,460	0,245
		Vitória (VIX)		0,042	0,013	0,093	0,378	137,760	1,729	0,063
	Campanha 5 (jan/fev 2021)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,044	0,069	0,077	0,721	69,851	4,019	0,075
		Barra Nova (BN)		0,018	0,224	0,043	0,552	185,540	3,425	0,302
		Costa das Algas (CA)		0,051	0,231	0,316	1,174	204,394	3,838	0,210
		Degredo (DEG)		0,296	0,260	0,989	8,064	293,725	6,705	0,255
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,586	0,119	1,231	2,164	134,536	1,673	0,527
		Guarapari (GUA)		0,054	0,060	0,047	0,168	140,564	1,907	0,071
		Itaúnas (ITA)		0,024	0,066	0,352	0,289	36,588	1,345	0,017
		Vitória (VIX)		0,014	0,198	0,671	0,237	42,346	3,304	0,047
	Campanha 6 (jul/ago 2021)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,613	0,052	0,144	0,569	86,866	0,913	0,247
		Barra Nova (BN)		0,092	0,047	0,290	0,331	17,388	0,315	0,326
		Costa das Algas (CA)		0,090	0,077	0,634	0,458	69,929	2,194	0,193
		Degredo (DEG)		0,293	0,013	0,794	0,706	2,226	12,602	0,724
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,040	0,006	0,161	0,375	119,676	0,926	0,159
		Guarapari (GUA)		0,161	0,025	0,011	0,061	182,007	0,053	0,022
		Itaúnas (ITA)		0,131	0,114	0,299	0,331	51,971	0,327	0,324
		Vitória (VIX)		0,117	0,047	0,308	0,364	248,565	0,339	0,338

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos à chegada dos rejeitos	Expedição ICMBio (nov/2015)	Foz do Rio Doce	Zooplâncton	0,121	0,001	0,150	0,069	15,550	6,684	0,005
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 7 (mar 2022)	Barra Nova (BN)	Zooplâncton	0,653	4,728	3,595	1,855	476,295	34,313	0,050
		Costa das Algas (CA)		0,201	0,919	1,281	1,705	221,412	3,838	0,965
		Degredo (DEG)		0,186	2,623	2,380	4,123	277,956	14,872	0,621
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,482	1,115	1,609	2,144	422,015	7,550	0,553
		Guarapari (GUA)		0,216	0,158	2,347	0,829	258,444	38,694	1,991
		Itaúnas (ITA)		0,108	2,233	4,095	1,899	545,633	7,524	0,032
		Vitória (VIX)		0,193	0,734	1,545	2,470	784,076	21,698	2,639
	Campanha 8 (set/out 2022)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	8,021	0,425	0,444	2,874	239,173	4,220	4,073
		Barra Nova (BN)		2,574	4,125	0,520	1,194	211,628	3,181	4,217
		Costa das Algas (CA)		0,933	1,484	1,019	1,326	274,843	5,741	11,616
		Degredo (DEG)		1,485	1,249	1,558	0,969	869,820	19,069	10,549
		Foz do Rio Doce (FRD)		1,199	3,227	1,038	1,826	371,680	7,565	13,874
		Guarapari (GUA)		1,102	0,338	0,862	0,562	412,538	7,887	5,359
		Itaúnas (ITA)		1,276	1,360	0,642	0,770	160,472	2,849	6,310
		Vitória (VIX)		2,047	0,833	2,706	0,989	452,366	8,497	19,007
	Campanha 9 (jan/fev 2023)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	1,155	0,507	0,788	1,851	678,338	7,786	6,314
		Barra Nova (BN)		0,928	0,878	0,728	0,955	578,033	3,724	6,558
		Barra Seca (BS)		0,005	0,004	0,004	0,050	1108,824	0,050	0,005
		Conceição da Barra (CB)		0,968	1,020	0,908	1,257	325,385	3,697	10,130
		Costa das Algas (CA)		1,406	0,011	0,021	3,418	439,259	5,301	0,097
		Degredo (DEG)		1,867	1,299	2,434	2,002	1048,254	23,020	19,289
		Foz do Rio Doce (FRD)		1,309	0,777	0,947	1,057	534,122	8,766	8,645
		Itaúnas (ITA)		1,350	0,569	1,316	0,656	618,849	10,254	10,224

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos à chegada dos rejeitos	Expedição ICMBio (nov/2015)	Foz do Rio Doce	Zooplâncton	0,121	0,001	0,150	0,069	15,550	6,684	0,005
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 10 (jun/jul 2023)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,332	0,074	1,429	0,625	69,936	6,418	0,045
		Barra Nova (BN)		0,393	0,214	1,775	1,879	152,563	13,829	0,062
		Barra Seca (BS)		0,264	0,060	0,872	0,483	80,596	14,932	0,089
		Conceição da Barra (CB)		0,113	0,228	2,632	0,960	119,597	26,486	0,105
		Costa das Algas (CA)		0,110	0,143	0,513	14,810	66,027	1,223	0,112
		Degredo (DEG)		0,171	0,027	0,028	0,817	12,765	0,314	0,049
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,178	0,126	0,428	0,921	141,099	2,969	0,078
		Itaúnas (ITA)		0,165	0,121	1,489	0,724	125,673	14,535	0,098
	Campanha 11 (jan 2024)	Abrolhos (ABR)	Zooplâncton	0,863	0,076	1,636	3,766	320,729	7,030	1,020
		Barra Nova (BN)		5,726	0,111	3,774	6,712	279,874	10,127	0,760
		Barra Seca (BS)		4,766	0,055	3,917	14,259	734,902	40,071	0,177
		Conceição da Barra (CB)		2,340	0,143	0,828	17,269	395,766	5,770	0,857
		Costa das Algas (CA)		2,424	0,152	1,548	8,005	219,169	103,218	1,263
		Degredo (DEG)		7,152	0,160	1,194	8,058	443,364	10,788	0,684
		Foz do Rio Doce (FRD)		14,022	0,087	1,597	191,314	303,071	19,356	4,736
		Itaúnas (ITA)		4,068	0,162	0,346	2,746	33,261	32,311	1,114

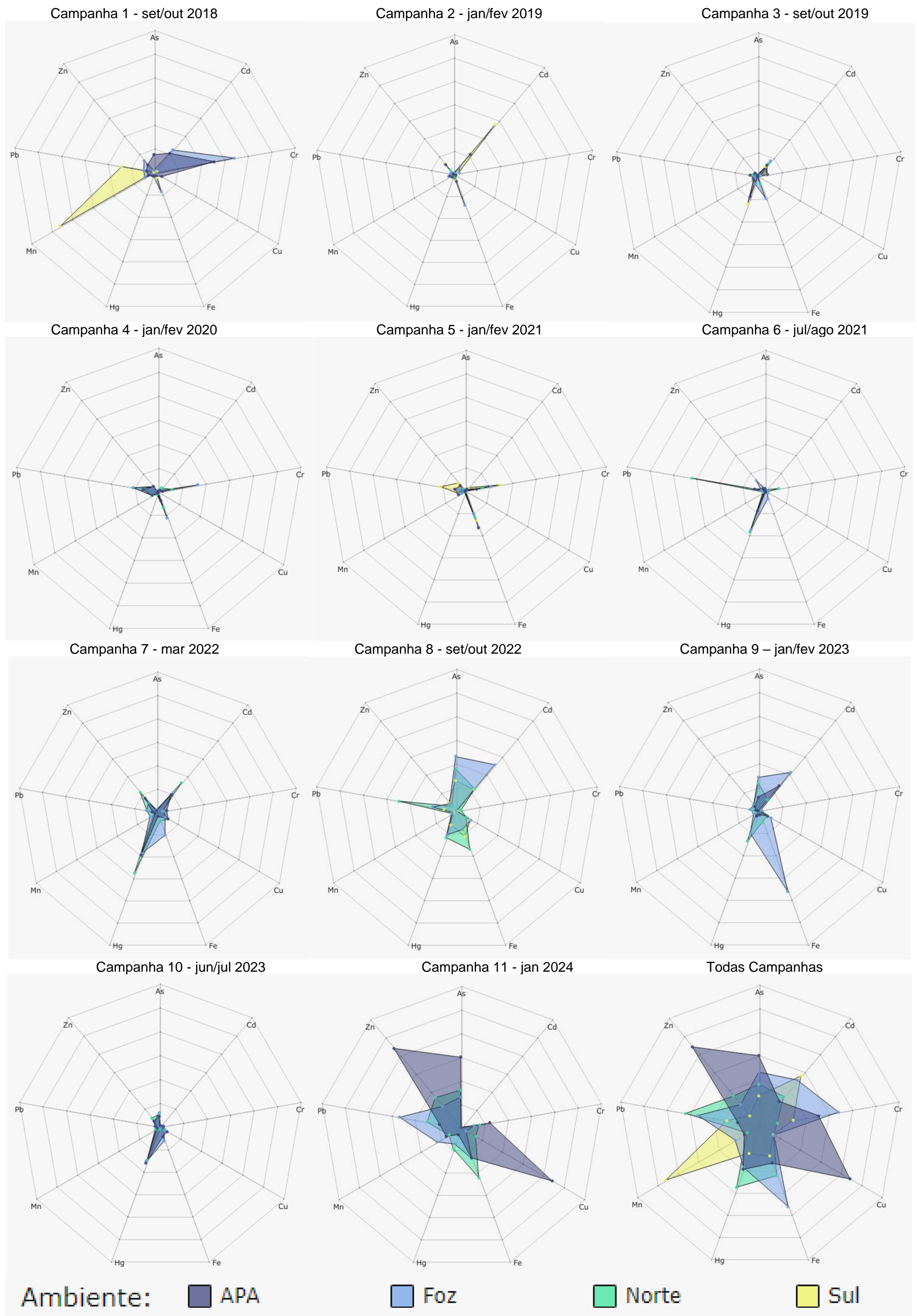
Figura 3: Valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de tecidos (brânquias, hepatopâncreas e músculo) de camarões coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.





O gráfico de barras dos valores do Índice de bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais da bioacumulação dos metais e As nos camarões do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. A partir da comparação temporal feita através da avaliação do IBR Bioacumulação apresentada na Figura 3, observa-se um padrão crescente nos valores deste índice nas Campanhas 2 a 8, o qual foi interrompido por uma redução geral no valor do IBR Bioacumulação até a Campanha 10, exceto no Setor Foz na Campanha 9. Porém, na Campanha 11 foi observado novamente um aumento geral e expressivo do índice para todos os Setores avaliados, atingindo os maiores valores de IBR Bioacumulação até então registrados no âmbito do PMBA/Fest, como foi também observado e descrito acima para o plâncton marinho. Cabe destacar também que o padrão de variação do IBR Bioacumulação de camarões marinhos demonstrou ser similar àquele descrito para o plâncton do Ambiente Marinho, evidenciando assim o potencial de transferência trófica dos metais e As entre os produtores primários e os consumidores primários e secundários, conforme salientado anteriormente.

Figura 4: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de tecidos (brânquias, hepatopâncreas e músculo) de camarões coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Metais analisados: Arsênio (As); Cádmiio (Cd); Chumbo (Pb); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Ferro (Fe); Manganês (Mn); Mercúrio (Hg); e Zinco (Zn). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



Os gráficos de radar apresentados na Figura 4 foram obtidos a partir do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) de cada Setor avaliado e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal da bioacumulação de cada metal e do As nos camarões do Ambiente Marinho e a contribuição destes para a composição do índice. Neste caso, as Campanhas que apresentaram os maiores valores do IBR Bioacumulação e a maior diversidade de elementos contribuindo para a composição deste índice foram as Campanhas 1, 7, 8, 9 e 11.

Com relação à Campanha 7, os padrões de contribuição dos elementos analisados para a composição do IBR Bioacumulação foram bem parecidos para todos os Setores avaliados, com picos observados para os metais Hg, Cd e Zn.

Na Campanha 8, os elementos que se associaram à composição do IBR Bioacumulação no Setor Norte foram o As, Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Pb e Zn. Ainda neste Setor, foram observados picos de valores do índice para os metais Pb e Fe. No Setor Foz, o As e os metais Cd, Cu, Fe, Hg e Pb contribuíram para o IBR Bioacumulação, com destaque para As e Cd. No que se refere ao Setor APA, os elementos mais importantes para a composição do valor do IBR Bioacumulação foram o As, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb e Zn.

Já na Campanha 9, o Setor Foz foi o que apresentou os maiores valores do IBR Bioacumulação, sendo que os elementos mais contribuíram para a composição do índice foram o Fe, Cu, Cd, As e Hg. Por sua vez, no Setor Norte, os elementos que mais contribuíram para a composição do índice foram o As, Cd, Cu, Fe e Hg. Por fim, o As, Cd e Cu foram os elementos com maior importância na formação do IBR Bioacumulação no Setor APA.

Com relação à Campanha 10, os padrões de contribuição dos elementos analisados para a composição do IBR Bioacumulação foram bem parecidos para todos os Setores avaliados, tendo sido observados picos de valores para o Hg.

Na campanha 11, foi observado um aumento geral e expressivo nos valores do IBR Bioacumulação para todos os Setores avaliados, atingindo os maiores valores já registrados para este índice desde o início do monitoramento no âmbito do PMBA/Fest, especialmente no Setor APA. Neste Setor foram observados picos de valores de Zn, Cu e As, com contribuição também do Cr, Fe, Hg, Mn e Pb para a composição do índice. No setor Foz, as maiores contribuições para a composição do IBR Bioacumulação foram do Pb, As, Zn, Fe e Mn. Já no setor Norte, o pico de valor observado na composição do índice foi observado para o Fe, com contribuições similares do As, Zn, Pb, Hg e Cu.

Cabe destacar que os metais Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn foram bastante frequentes na composição do IBR Bioacumulação nas Campanhas realizadas ao longo do monitoramento. Neste caso, vale ressaltar que os metais Cd, Hg e Pb são considerados altamente tóxicos e que, além de terem ocorrido com frequência ao longo do monitoramento, estes elementos apresentaram valores altos em algumas Campanhas.

Embora o As não tenha sido frequente na composição do IBR Bioacumulação, este metalóide apresentou picos em seu valor de contribuição para a composição do IBR Bioacumulação nas Campanhas 8, 9 e 10 em todos os Setores avaliados, contribuindo também principalmente com o

aumento observado no valor do índice na Campanha 11. Portanto, estes achados devem ser observados com atenção, já que o As é também um elemento altamente tóxico, sendo que a sua presença em pequenas concentrações pode causar impactos significativos à biota aquática. Os metais Cr, Cu, Fe, Mn e Zn são considerados micronutrientes, os quais, em pequenas quantidades, são considerados essenciais para o bom funcionamento dos organismos vivos. Entretanto, em concentrações excessivas, estes elementos podem também causar efeitos tóxicos à biota aquática e ao ser humano (Lokeshappa et al., 2012). Cabe destacar que alguns desses metais apresentaram picos de contribuição para a composição do IBR Bioacumulação ao longo de todo o período de monitoramento.



Tabela 5: Concentração média de metais (mg.Kg<sup>-1</sup>) no músculo de camarões coletados nos diferentes setores do ambiente marinho durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso), comparadas com a concentração média de metais no músculo de camarões coletados na região costeira capixaba entre dez 2015 a fev 2016 (Relatório Técnico - RT EcoConservation 065/16). Concentrações dos metais abaixo dos dados pretéritos estão destacadas em verde enquanto concentrações acima dos valores pretéritos estão destacadas em vermelho. "NA" significa que não há informação sobre a concentração do metal. A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1 – a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. Fonte: EcoConservation. Relatório Técnico - RT ECV 065/16. Monitoramento de bioacumulação (ictiofauna, carcinofauna e malacofauna) por metais, na região marinha adjacente à foz do Rio Doce e sob possível influência da lama de rejeitos oriunda do rompimento da barragem de Fundão.

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	<i>Xiphopenaeus kroyeri</i> (camarão-sete-barbas)	4,630	0,007	0,029	2,680	15,510	0,590	0,019
		Barra do Riacho (Aracruz)		7,710	0,005	0,059	3,810	31,940	0,650	0,059
		Regência (águas costeiras)		8,860	0,006	0,060	4,450	36,370	0,740	0,020
		Barra Seca (São Mateus)		8,900	0,004	0,065	4,630	28,750	0,790	0,018
		Barra Nova (São Mateus)		8,690	0,004	0,055	3,880	28,080	0,970	0,019
		Média		7,758	0,005	0,054	3,890	28,130	0,748	0,027
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 1 (set/out 2018)	Barra Nova (BN)	Camarões	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		1,169	0,053	1,854	6,044	6,710	0,571	0,028
		Degredo (DEG)		0,136	0,610	0,104	2,667	4,276	0,754	0,128
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,373	0,071	1,450	4,250	7,275	0,743	0,015
		Guarapari (GUA)		0,147	0,097	0,085	1,774	6,041	0,449	0,040
		Itaúnas (ITA)		0,006	0,969	0,482	1,101	3,461	2,064	0,014
		Vitória (VIX)		0,390	0,046	2,648	1,704	7,188	5,461	0,312

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	<i>Xiphopenaeus kroyeri</i> (camarão-sete-barbas)	4,630	0,007	0,029	2,680	15,510	0,590	0,019
		Barra do Riacho (Aracruz)		7,710	0,005	0,059	3,810	31,940	0,650	0,059
		Regência (águas costeiras)		8,860	0,006	0,060	4,450	36,370	0,740	0,020
		Barra Seca (São Mateus)		8,900	0,004	0,065	4,630	28,750	0,790	0,018
		Barra Nova (São Mateus)		8,690	0,004	0,055	3,880	28,080	0,970	0,019
		Média		7,758	0,005	0,054	3,890	28,130	0,748	0,027
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 2 (jan/fev 2019)	Barra Nova (BN)	Camarões	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,026	0,786	0,053	8,008	4,459	0,746	0,005
		Degredo (DEG)		0,054	0,034	0,526	5,926	2,932	0,866	0,011
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,182	0,189	0,104	0,829	75,777	0,964	0,022
		Guarapari (GUA)		0,005	1,787	0,046	1,346	9,985	1,313	0,005
		Itaúnas (ITA)		0,016	0,030	0,125	2,198	16,281	0,910	0,006
		Vitória (VIX)		0,006	1,232	0,146	0,684	5,882	0,743	0,005
	Campanha 3 (set/out 2019)	Barra Nova (BN)	Camarões	0,125	0,015	0,086	0,064	6,072	0,051	0,017
		Costa das Algas (CA)		0,198	0,190	0,275	0,106	1,199	0,715	0,041
		Degredo (DEG)		0,080	0,288	0,167	0,050	12,698	0,719	0,022
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,177	0,234	0,323	0,076	52,819	1,112	0,014
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,194	0,122	0,052	0,138	1,139	0,936	0,171
		Vitória (VIX)		0,072	0,086	0,029	0,051	0,618	0,584	0,018
	Campanha 4 (jan/fev 2020)	Barra Nova (BN)	Camarões	0,015	0,460	0,067	2,298	14,749	1,191	0,325
		Costa das Algas (CA)		0,014	0,149	0,232	0,175	5,461	0,696	0,038
		Degredo (DEG)		0,174	0,211	0,596	0,741	52,970	1,943	0,130
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,330	0,109	0,742	1,193	23,985	0,900	0,078
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,011	0,062	0,689	0,215	27,410	0,638	0,024
		Vitória (VIX)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

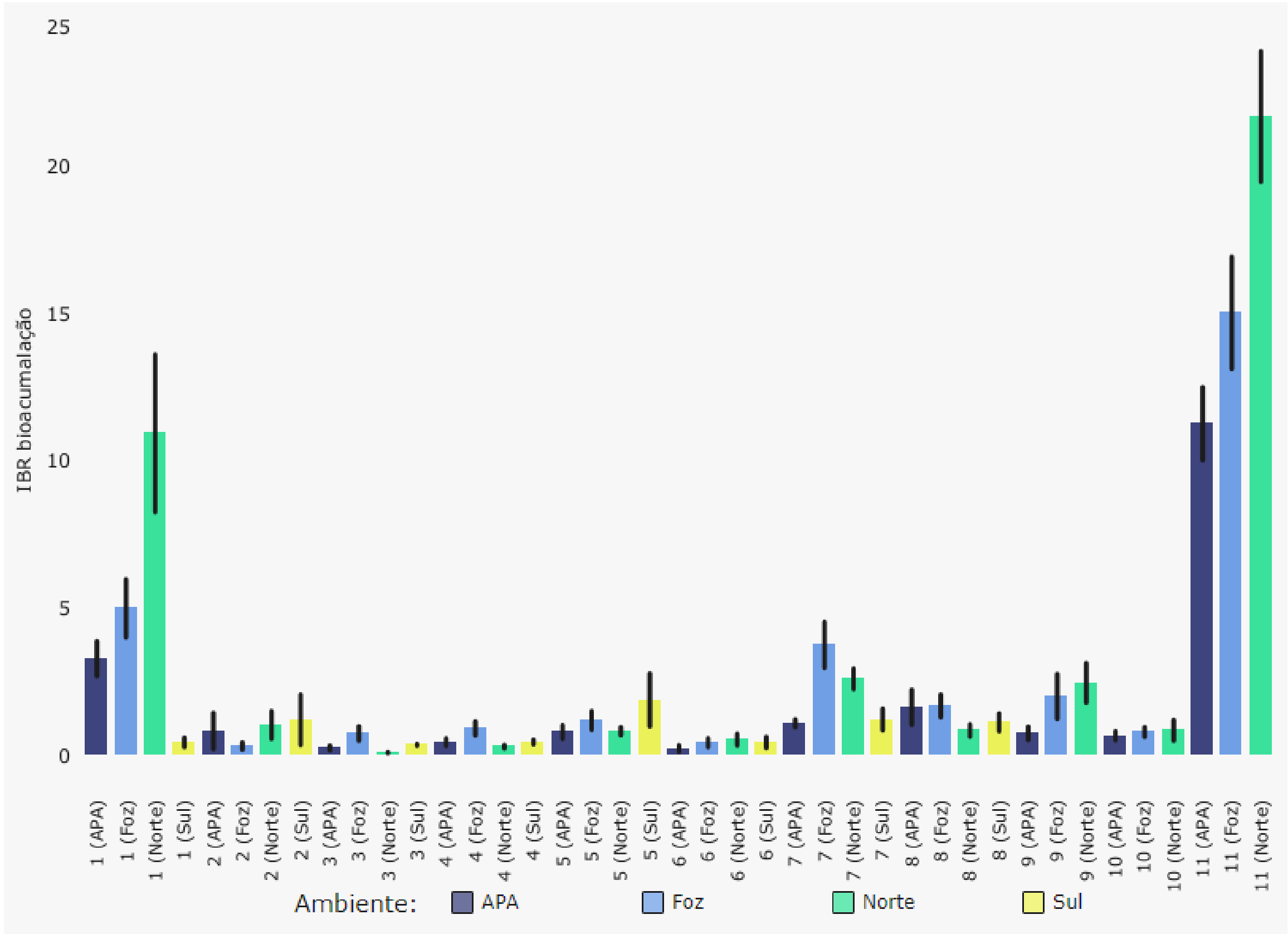
Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	<i>Xiphopenaeus kroyeri</i> (camarão-sete-barbas)	4,630	0,007	0,029	2,680	15,510	0,590	0,019
		Barra do Riacho (Aracruz)		7,710	0,005	0,059	3,810	31,940	0,650	0,059
		Regência (águas costeiras)		8,860	0,006	0,060	4,450	36,370	0,740	0,020
		Barra Seca (São Mateus)		8,900	0,004	0,065	4,630	28,750	0,790	0,018
		Barra Nova (São Mateus)		8,690	0,004	0,055	3,880	28,080	0,970	0,019
		Média		7,758	0,005	0,054	3,890	28,130	0,748	0,027
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 5 (jan/fev 2021)	Barra Nova (BN)	Camarões	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,009	0,063	0,459	0,175	8,399	0,668	0,069
		Degredo (DEG)		1,265	0,123	1,895	4,398	186,177	4,962	0,103
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,117	0,058	0,920	1,137	168,728	5,299	0,048
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,031	0,111	0,073	0,576	48,156	3,850	0,020
		Vitória (VIX)		0,007	0,140	0,677	0,504	90,585	1,428	0,122
	Campanha 6 (jul/ago 2021)	Barra Nova (BN)	Camarões	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,923	0,010	0,101	1,513	2,854	0,134	0,053
		Degredo (DEG)		0,200	0,179	0,843	20,816	2,990	1,089	0,845
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,959	0,160	0,179	26,356	31,845	1,285	0,055
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,051	0,056	0,734	1,861	4,380	0,821	0,474
		Vitória (VIX)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
	Campanha 7 (mar 2022)	Barra Nova (BN)	Camarões	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,410	0,737	0,182	5,822	5,251	0,168	0,049
		Degredo (DEG)		0,693	6,782	0,306	159,847	28,622	1,209	0,083
		Foz do Rio Doce (FRD)		1,097	1,620	0,814	111,278	122,076	3,758	0,136
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,448	0,069	0,173	4,152	7,222	0,238	0,036
		Vitória (VIX)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	<i>Xiphopenaeus kroyeri</i> (camarão-sete-barbas)	4,630	0,007	0,029	2,680	15,510	0,590	0,019
		Barra do Riacho (Aracruz)		7,710	0,005	0,059	3,810	31,940	0,650	0,059
		Regência (águas costeiras)		8,860	0,006	0,060	4,450	36,370	0,740	0,020
		Barra Seca (São Mateus)		8,900	0,004	0,065	4,630	28,750	0,790	0,018
		Barra Nova (São Mateus)		8,690	0,004	0,055	3,880	28,080	0,970	0,019
		Média		7,758	0,005	0,054	3,890	28,130	0,748	0,027
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 8 (set/out 2022)	Barra Nova (BN)	Camarões	8,165	0,024	0,154	1,820	0,279	0,124	0,024
		Costa das Algas (CA)		5,303	0,020	0,176	1,247	1,253	0,143	0,022
		Degredo (DEG)		12,481	3,336	0,147	61,889	126,093	0,869	0,100
		Foz do Rio Doce (FRD)		19,182	3,011	0,240	101,403	144,957	2,564	0,418
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		8,317	0,025	0,168	1,265	0,141	0,104	0,025
		Vitória (VIX)		10,010	1,886	0,146	96,758	86,096	0,970	0,121
	Campanha 9 (jan/fev 2023)	Barra Nova (BN)	Camarões	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Barra Seca (BS)		7,349	0,024	0,195	1,662	6,309	0,106	0,024
		Conceição da Barra (CB)		9,980	0,024	0,391	2,240	6,607	0,132	0,024
		Costa das Algas (CA)		4,852	0,029	0,227	1,898	5,010	0,113	0,036
		Degredo (DEG)		6,646	2,259	0,134	82,984	36,300	0,616	0,086
		Foz do Rio Doce (FRD)		10,695	3,378	0,263	91,320	293,215	2,435	0,108
		Itaúnas (ITA)		8,150	0,024	0,125	0,963	4,427	0,057	0,024
	Campanha 10 (jun/jul 2023)	Barra Nova (BN)	Camarões	16,850	0,048	0,417	2,720	13,250	0,162	0,033
		Barra Seca (BS)		14,852	0,024	0,183	2,619	3,210	0,165	0,024
		Conceição da Barra (CB)		9,875	0,024	0,254	2,612	12,392	0,136	0,052
		Costa das Algas (CA)		6,211	0,024	0,155	2,001	2,733	0,209	0,049
		Degredo (DEG)		10,129	0,024	0,168	2,156	5,648	0,235	0,026
		Foz do Rio Doce (FRD)		13,962	0,027	0,267	2,980	10,902	0,177	0,027
		Itaúnas (ITA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA



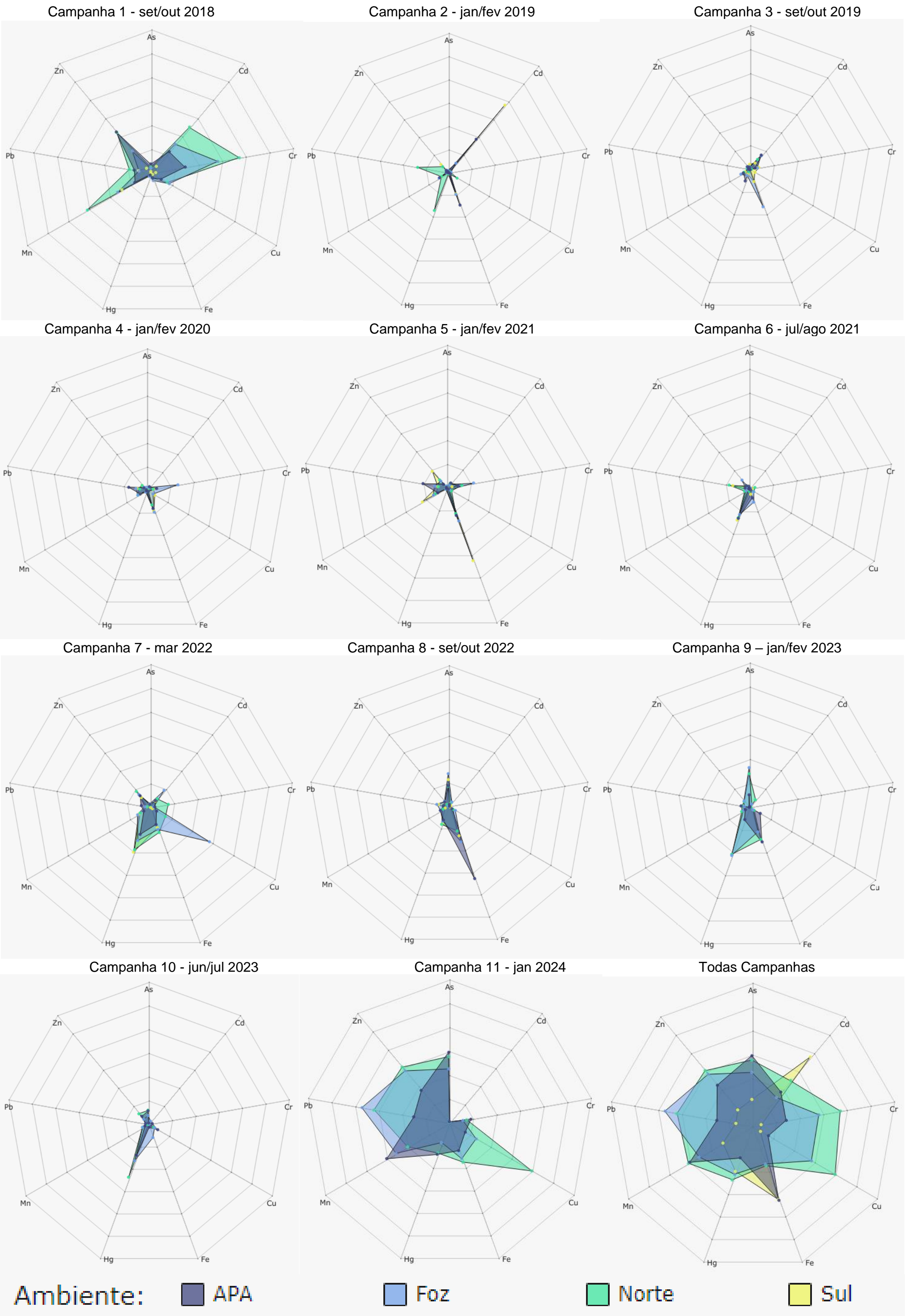
Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Organismo	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	<i>Xiphopenaeus kroyeri</i> (camarão-sete-barbas)	4,630	0,007	0,029	2,680	15,510	0,590	0,019
		Barra do Riacho (Aracruz)		7,710	0,005	0,059	3,810	31,940	0,650	0,059
		Regência (águas costeiras)		8,860	0,006	0,060	4,450	36,370	0,740	0,020
		Barra Seca (São Mateus)		8,900	0,004	0,065	4,630	28,750	0,790	0,018
		Barra Nova (São Mateus)		8,690	0,004	0,055	3,880	28,080	0,970	0,019
		Média		7,758	0,005	0,054	3,890	28,130	0,748	0,027
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 11 (jan 2024)	Barra Nova (BN)	Camarões	18,630	0,080	0,230	5,113	5,087	0,211	0,038
		Barra Seca (BS)		15,695	0,060	0,277	6,702	5,101	0,534	0,040
		Conceição da Barra (CB)		22,717	0,061	0,658	5,268	17,468	0,580	0,058
		Costa das Algas (CA)		18,133	0,042	1,737	5,467	8,577	0,391	0,056
		Degredo (DEG)		8,115	0,124	5,147	5,426	13,947	0,652	0,070
		Foz do Rio Doce (FRD)		12,469	0,070	1,865	4,491	13,004	0,422	0,046
		Itaúnas (ITA)		17,800	0,042	0,368	5,717	6,785	0,216	<0,024

Figura 5: Valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de tecidos (brânquias, fígado e músculo) de peixes (onívoros e carnívoros) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.



O gráfico de barras dos valores do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) em tecidos (brânquias, fígado e músculo) de peixes (onívoros e carnívoros), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, está apresentado na Na Figura 5. Este gráfico permite realizar comparações das tendências espaço-temporais de bioacumulação dos metais e As nos peixes (onívoros e carnívoros) do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. De maneira geral, os valores mais altos do IBR Bioacumulação haviam sido observados na Campanha 1, com exceção para o Setor Sul. Porém, na Campanha 11 (jan 2024 - período chuvoso) foram observados valores de IBR Bioacumulação superiores a todos aqueles apresentados anteriormente. Assim, da Campanha 2 até a Campanha 6, o índice apresenta uma redução no seu valor e tende a se manter mais baixo em todos os Setores avaliados. No entanto, a partir da Campanha 7, foi observado novamente um discreto aumento no valor do IBR Bioacumulação em todos os Setores avaliados, os quais tenderam a manterem valores semelhantes até a Campanha 10. Porém, como mencionado acima, os valores de IBR Bioacumulação na Campanha 11, para todos os Setores avaliados, atingiram os máximos valores até então já registrados. Por fim, cabe destacar também a existência de uma discreta diferença sazonal dos valores de IBR Bioacumulação nos Setores Norte e Foz, uma vez que foram observados valores menores do índice durante os períodos secos, enquanto que nos períodos chuvosos ocorreu um aumento nos valores deste índice, à exceção da primeira Campanha (período seco).

Figura 6: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de tecidos (brânquias, fígado e músculo) de peixes (onívoros e carnívoros) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Metais analisados: Arsênio (As); Cádmiio (Cd); Chumbo (Pb); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Ferro (Fe); Manganês (Mn); Mercúrio (Hg); e Zinco (Zn). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



Os gráficos de radar apresentados na Figura 6 foram obtidos a partir do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal da bioacumulação dos metais e As nos peixes (onívoros e carnívoros) do Ambiente Marinho, bem como a contribuição destes para a composição do índice.

As Campanhas que mais se destacaram em relação aos maiores valores do IBR Bioacumulação foram as Campanhas 1, 7 e 11. Já em relação à maior diversidade de elementos que compuseram o valor deste índice, destacam-se as Campanhas 1, 2, 7 e 11.

Quanto à Campanha 7, o Setor Foz foi aquele que apresentou o maior valor do IBR Bioacumulação, sendo que os metais mais relevantes para a composição deste índice foram o Hg, Cd, Cu, Fe, Zn e Mn, com destaque para o Cu, que apresentou um pico de valor. Os elementos que mais contribuíram para a composição do IBR Bioacumulação no Setor Norte foram os metais Hg, Fe, Cu, Mn, Cd e Cr. Com relação ao Setor APA, os metais que apresentaram os maiores valores na composição do índice foram o Zn, Pb, Hg e Fe. Por fim, o Setor Sul teve seu índice composto majoritariamente pelos metais Zn, Mn, Hg e Fe, com destaque para um pico de valor para o Hg.

Para a Campanha 8, todos os setores apresentaram contribuição similar na composição do valor do IBR Bioacumulação para os peixes marinhos, com maior contribuição do metaloide As e do metal Fe, sendo que este metal apresentou um pico no Setor APA.

Para a Campanha 9, os setores Foz e Norte apresentaram composições do IBR Bioacumulação bastante semelhantes, as quais estiveram relacionadas principalmente às contribuições dos elementos As, Hg e Fe. Já no setor APA, a composição do índice esteve mais associada às contribuições do As, Cu, Hg e, sobretudo, do Fe.

Na Campanha 10, novamente foi observada uma composição similar do IBR Bioacumulação em todos os Setores avaliados, com destaque para o Hg, metal este que apresentou um pico de concentração em todos os Setores avaliados. Porém, o As, Fe, Cu e Zn também contribuíram para a composição dos valores do índice.

Já na Campanha 11, o maior valor de IBR Bioacumulação foi observado no Setor Norte, tendo este sido composto pelas contribuições do Cu, As, Zn, Pb, Mn, Hg, Fe e Cr. Nos Setores Foz e APA, a composição do índice foi bastante similar, sendo os valores do índice compostos pelas contribuições do Pb, Zn, As, Cr, Mn, Hg, Fe e Cu.

De uma forma geral, os elementos mais frequentes na composição do IBR Bioacumulação durante todo o monitoramento foram o Pb, Fe, Zn, Hg e Mn. Cabe lembrar que Pb e Hg são metais altamente tóxicos e que, em algumas Campanhas, foram observados picos de valores de As e Cd, os quais também são elementos tóxicos para a biota aquática. Assim, concentrações excessivas desses elementos nos tecidos dos peixes devem ser consideradas como uma alerta em relação a contaminação da biota aquática. Por sua vez, Fe, Zn e Mn são considerados como micronutrientes, sendo assim essenciais para a manutenção dos organismos vivos. Porém, vale lembrar que, concentrações excessivas, estes metais também requerem atenção, pois podem causar toxicidade à biota aquática, incluindo os peixes.



Tabela 6: Concentração média de metais (mg.Kg<sup>-1</sup>) no músculo de peixes (onívoros e carnívoros) coletados nos diferentes setores do ambiente marinho durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso), comparadas com a concentração média de metais no músculo de peixes (onívoros e carnívoros) coletados na região costeira capixaba entre dez 2015 a fev 2016 (Relatório Técnico - RT EcoConservation 065/16). "NA" significa que não há informação sobre a concentração do metal. A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Concentrações dos metais abaixo dos dados pretéritos estão destacadas em verde enquanto concentrações acima dos valores pretéritos estão destacadas em vermelho. Classificação por Setores e por Estações de coleta: APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1 – a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. Fonte: EcoConservation. Relatório Técnico - RT ECV 065/16. Monitoramento de bioacumulação (ictiofauna, carcinofauna e malacofauna) por metais, na região marinha adjacente à foz do Rio Doce e sob possível influência da lama de rejeitos oriunda do rompimento da barragem de Fundão.

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 1 (set/out 2018)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	0,013	0,887	0,533	0,292	3,605	1,251	0,016
		Costa das Algas (CA)		1,003	0,191	1,992	0,390	5,016	2,395	0,176
		Degredo (DEG)		0,435	0,926	0,444	0,155	8,386	1,630	0,026
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,343	0,336	1,710	0,701	4,492	1,211	0,036
		Guarapari (GUA)		0,098	0,035	0,010	0,050	7,320	0,545	0,029
		Itaúnas (ITA)		0,057	1,818	2,830	0,312	6,520	1,756	0,110
		Vitória (VIX)		0,187	1,510	0,202	0,516	5,845	4,737	0,207

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 2 (jan/fev 2019)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	0,014	0,047	0,118	0,130	2,439	1,003	0,008
		Costa das Algas (CA)		0,049	0,856	0,095	0,106	12,602	1,017	0,020
		Degredo (DEG)		0,019	0,039	0,189	0,083	3,332	0,881	0,013
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,056	0,181	0,107	0,108	13,028	0,792	0,013
		Guarapari (GUA)		0,015	2,468	0,034	0,082	28,155	1,197	0,005
		Itaúnas (ITA)		0,007	0,035	0,065	0,075	5,470	0,676	0,006
		Vitória (VIX)		0,006	1,107	0,130	1,422	6,924	0,721	0,005
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 3 (set/out 2019)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	0,102	0,060	0,048	0,057	14,882	0,587	0,025
		Costa das Algas (CA)		0,112	0,220	0,352	0,053	0,385	0,734	0,038
		Degredo (DEG)		0,167	0,282	0,224	0,055	15,224	0,815	0,028
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,219	0,257	0,347	0,106	121,432	1,019	0,034
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,082	0,127	0,047	0,102	4,834	0,545	0,055
		Vitória (VIX)		0,187	0,225	0,232	0,060	0,440	0,936	0,014
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 4 (jan/fev 2020)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	0,080	0,145	0,458	2,116	13,623	2,090	0,439
		Costa das Algas (CA)		0,094	0,186	0,304	0,885	29,162	0,823	0,222
		Degredo (DEG)		0,060	0,131	0,354	1,103	6,973	0,910	0,102
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,142	0,143	1,327	2,311	43,780	1,131	0,103
		Guarapari (GUA)		0,931	0,108	1,838	1,126	11,459	0,781	0,010
		Itaúnas (ITA)		0,014	0,222	0,352	0,481	12,898	0,828	0,171
		Vitória (VIX)		0,205	0,113	0,691	0,427	41,649	1,063	0,534

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 5 (jan/fev 2021)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	0,014	0,187	0,652	0,994	65,330	1,534	0,313
		Costa das Algas (CA)		0,072	0,209	0,699	0,368	106,591	3,034	0,210
		Degredo (DEG)		0,237	0,146	0,627	1,375	69,932	1,535	0,079
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,142	0,161	1,501	1,230	69,229	1,732	0,149
		Guarapari (GUA)		0,050	0,128	0,093	0,103	901,572	3,522	0,098
		Itaúnas (ITA)		0,040	0,183	0,803	1,551	95,836	2,376	0,107
		Vitória (VIX)		0,079	0,208	0,515	0,855	162,931	4,777	0,194
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 6 (jul/ago 2021)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	0,050	0,058	0,609	0,638	2,478	0,590	0,596
		Costa das Algas (CA)		0,321	0,082	0,070	0,484	73,665	0,549	0,100
		Degredo (DEG)		0,173	0,040	0,268	3,710	32,540	2,266	0,124
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,148	0,026	0,251	2,723	66,500	1,335	0,067
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,049	0,066	0,976	1,001	12,142	0,986	0,584
		Vitória (VIX)		0,154	0,026	0,232	0,206	2,842	0,349	0,185
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 7 (mar 2022)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	0,093	0,064	0,296	0,223	57,010	0,461	0,029
		Costa das Algas (CA)		0,341	0,465	0,563	1,322	93,559	1,797	0,268
		Degredo (DEG)		0,147	0,216	0,899	1,600	125,164	2,199	0,030
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,450	0,979	0,463	22,832	131,604	5,797	0,099
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,134	0,032	0,261	0,159	18,628	0,314	0,032
		Vitória (VIX)		0,059	0,053	0,135	0,658	41,545	0,583	0,038



Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 8 (set/out 2022)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	1,157	0,025	0,104	0,083	3,949	0,129	0,025
		Costa das Algas (CA)		1,792	0,023	0,211	0,103	7,894	0,789	0,030
		Degredo (DEG)		2,239	0,606	0,238	2,032	70,447	1,228	0,095
		Foz do Rio Doce (FRD)		4,479	0,223	0,119	3,237	227,401	2,724	0,152
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		2,224	0,025	0,145	0,101	0,272	0,190	0,025
		Vitória (VIX)		3,327	0,285	0,179	0,967	231,929	1,057	0,310
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 9 (jan/fev 2023)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	3,344	0,025	0,183	0,061	5,485	0,099	0,035
		Barra Seca (BS)		6,302	0,155	0,128	1,627	90,486	2,632	0,090
		Conceição da Barra (CB)		3,367	0,025	0,333	0,152	6,723	0,161	0,024
		Costa das Algas (CA)		1,986	0,025	0,183	0,046	5,263	0,078	0,040
		Degredo (DEG)		2,463	0,292	0,226	1,464	107,259	1,427	0,042
		Foz do Rio Doce (FRD)		2,910	0,157	0,125	1,621	110,484	1,519	0,073
		Itaúnas (ITA)		1,665	0,025	0,107	0,058	4,420	0,095	0,029
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 10 (jun/jul 2023)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	3,785	0,025	0,241	0,163	8,409	0,102	0,027
		Barra Seca (BS)		2,802	0,025	0,148	0,034	3,904	0,087	0,025
		Conceição da Barra (CB)		1,153	0,024	0,169	0,097	3,191	0,103	0,027
		Costa das Algas (CA)		3,630	0,079	0,206	0,126	5,702	0,103	0,035
		Degredo (DEG)		3,767	0,025	0,169	0,059	7,649	0,102	0,031
		Foz do Rio Doce (FRD)		2,595	0,028	0,169	0,235	5,534	0,114	0,169
		Itaúnas (ITA)		8,637	0,060	0,139	0,053	4,454	0,083	0,052

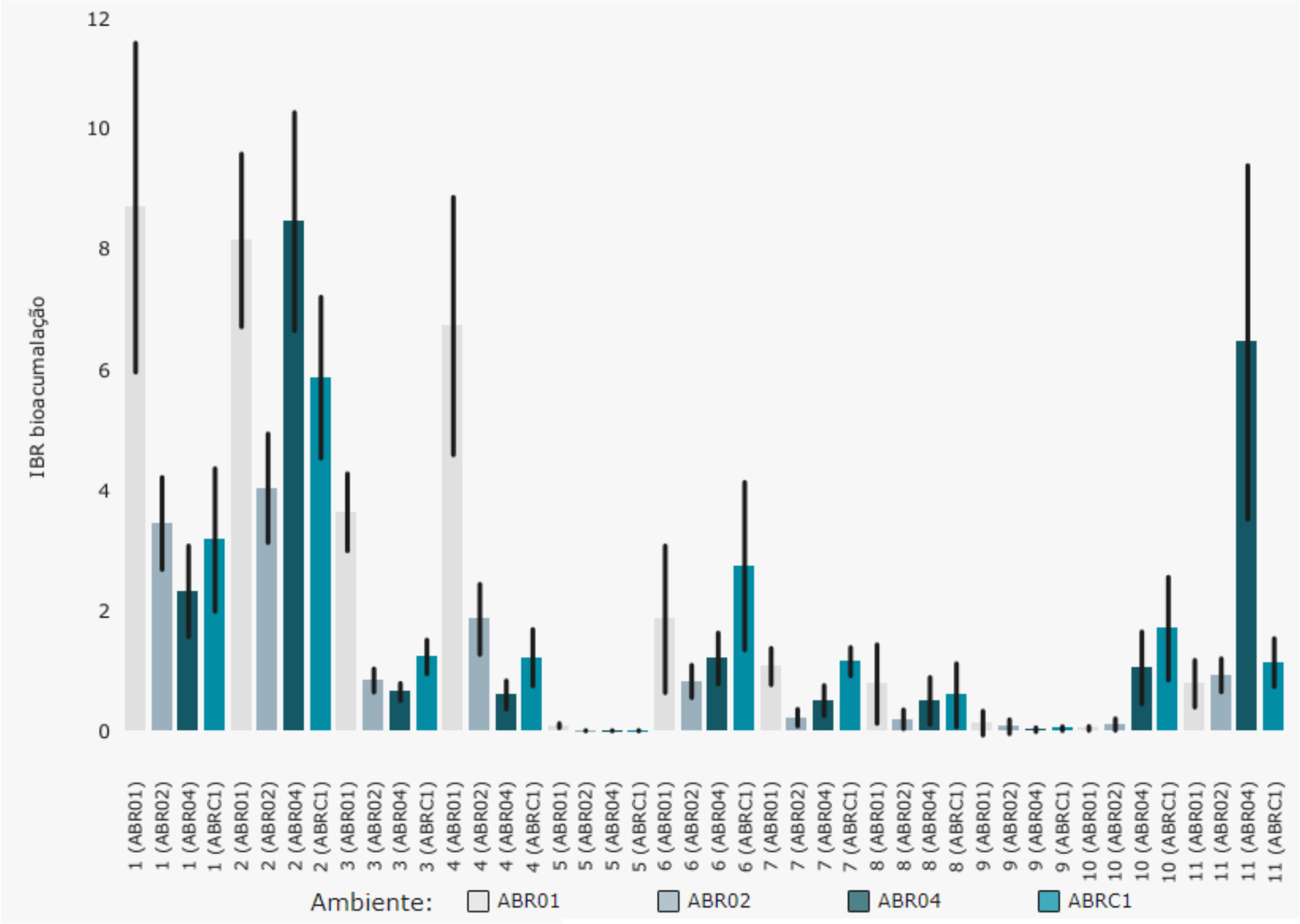
Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 11 (jan 2024)	Barra Nova (BN)	Peixes carnívoros	3,516	0,056	0,707	0,138	4,791	0,202	0,051
		Barra Seca (BS)		2,756	0,048	0,059	0,195	1,478	0,156	0,043
		Conceição da Barra (CB)		2,031	0,100	5,019	0,248	13,324	0,572	0,059
		Costa das Algas (CA)		9,891	0,079	3,737	0,291	9,925	0,574	0,069
		Degredo (DEG)		3,830	0,098	3,496	0,151	9,308	0,452	0,054
		Foz do Rio Doce (FRD)		3,882	0,059	1,075	0,162	3,178	0,258	0,052
		Itaúnas (ITA)		2,316	0,033	0,388	0,141	2,723	0,162	0,037
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 1 (set/out 2018)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	0,024	1,050	0,154	0,967	7,808	2,216	0,026
		Costa das Algas (CA)		0,743	0,072	2,944	0,667	3,104	0,701	0,020
		Degredo (DEG)		1,997	1,075	0,516	0,184	4,831	6,168	0,023
		Foz do Rio Doce (FRD)		1,169	0,185	2,799	1,153	5,571	2,987	0,069
		Guarapari (GUA)		0,207	0,053	0,118	0,094	0,434	0,721	0,058
		Itaúnas (ITA)		0,033	0,923	0,763	0,074	2,675	1,235	0,046
		Vitória (VIX)		0,143	0,062	0,509	0,343	9,922	23,766	0,241
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 2 (jan/fev 2019)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,051	0,650	0,170	0,202	30,982	0,933	0,007
		Degredo (DEG)		0,098	0,045	0,457	0,122	2,824	0,979	0,015
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,043	0,103	0,066	0,120	20,988	1,446	0,120
		Guarapari (GUA)		0,005	1,571	0,005	0,069	67,072	0,732	0,005
		Itaúnas (ITA)		0,010	0,033	0,133	0,079	18,983	0,642	0,008
		Vitória (VIX)		0,060	1,994	0,259	0,211	9,104	1,118	0,005

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 3 (set/out 2019)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	0,119	0,072	0,054	0,050	12,659	0,713	0,028
		Costa das Algas (CA)		0,162	0,232	0,429	0,185	0,519	0,881	0,020
		Degredo (DEG)		0,258	0,282	0,249	0,059	9,711	0,841	0,027
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,083	0,229	0,301	0,131	69,646	1,005	0,013
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,070	0,039	0,021	0,073	0,830	0,526	0,018
		Vitória (VIX)		0,294	0,351	0,329	0,061	3,632	0,988	0,024
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 4 (jan/fev 2020)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	0,090	0,056	0,057	0,084	26,120	1,035	0,051
		Costa das Algas (CA)		0,014	0,154	0,850	0,251	15,203	0,762	0,230
		Degredo (DEG)		0,056	0,205	0,779	1,192	13,527	1,040	0,020
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,272	0,111	1,280	2,531	42,256	1,145	0,082
		Guarapari (GUA)		1,062	0,101	1,477	0,978	43,570	1,134	0,076
		Itaúnas (ITA)		0,014	0,219	1,067	0,809	10,810	0,819	0,388
		Vitória (VIX)		0,061	0,149	0,576	1,616	26,060	1,112	0,053
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 5 (jan/fev 2021)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,043	0,330	4,006	3,615	151,349	3,723	2,016
		Degredo (DEG)		0,655	0,279	4,272	9,907	272,281	5,616	0,148
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,100	0,128	0,586	1,206	69,013	2,129	0,076
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,067	0,321	1,088	0,579	28,784	1,727	0,129
		Vitória (VIX)		0,006	0,102	0,649	1,453	47,440	2,919	0,026

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 6 (jul/ago/fev 2021)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,134	0,014	0,171	0,092	3,773	0,204	0,095
		Degredo (DEG)		0,187	0,057	0,344	1,606	57,176	1,690	0,149
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,219	0,029	0,257	2,459	86,343	1,722	0,085
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,057	0,076	0,765	0,777	9,118	0,758	0,738
		Vitória (VIX)		0,385	0,026	0,265	0,389	1,775	0,290	0,257
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 7 (mar 2022)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	0,063	0,030	0,195	0,372	38,013	0,389	0,024
		Costa das Algas (CA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Degredo (DEG)		0,155	0,710	0,690	3,274	156,232	2,261	0,104
		Foz do Rio Doce (FRD)		0,534	1,288	0,364	43,589	99,774	4,394	0,179
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		0,068	0,020	0,289	0,208	6,715	0,209	0,030
		Vitória (VIX)		0,042	0,020	0,135	0,146	4,045	0,095	0,040
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 8 (set/out 2022)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	0,726	0,024	0,098	0,038	3,590	0,225	0,024
		Costa das Algas (CA)		1,583	0,026	0,226	0,063	7,026	0,320	0,024
		Degredo (DEG)		2,016	0,230	0,104	1,716	66,169	2,247	0,215
		Foz do Rio Doce (FRD)		3,611	0,426	0,121	3,194	121,192	2,997	0,318
		Guarapari (GUA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Itaúnas (ITA)		2,797	0,024	0,164	0,081	0,112	0,203	0,024
		Vitória (VIX)		3,227	0,187	0,156	0,923	95,941	1,534	0,175

Fonte de Dados	Período de coleta	Localidades	Espécies	As (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cd (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cr (mg Kg <sup>-1</sup> )	Cu (mg Kg <sup>-1</sup> )	Fe (mg Kg <sup>-1</sup> )	Mn (mg Kg <sup>-1</sup> )	Pb (mg Kg <sup>-1</sup> )
Dados pretéritos (Relatório Técnico - RT ECV 065/16)	dez/2015 a fev/2016	Santa Cruz (Aracruz)	Peixes carnívoros/onívoros	1,990	0,008	0,019	0,230	9,580	0,480	0,015
		Barra do Riacho		2,330	0,004	0,031	0,130	1,950	0,160	0,016
		Regência (águas costeiras)		2,490	0,003	0,023	0,140	2,470	0,200	0,019
		Regência (interior da foz)		1,220	0,003	0,021	0,140	3,030	0,120	0,015
		Barra Seca (São Mateus)		4,450	0,003	0,014	0,110	1,600	0,140	0,011
		Barra Nova (São Mateus)		6,640	0,003	0,016	0,090	1,290	0,070	0,018
		Média		3,187	0,004	0,021	0,140	3,320	0,195	0,016
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 9 (jan/fev 2023)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Barra Seca (BS)		0,994	1,175	0,130	1,213	197,079	1,359	0,099
		Conceição da Barra (CB)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
		Costa das Algas (CA)		0,762	0,024	0,194	0,271	6,041	0,107	0,053
		Degredo (DEG)		2,252	0,807	0,377	1,752	240,865	2,599	0,181
		Foz do Rio Doce (FRD)		5,500	0,270	0,235	2,088	115,884	3,201	0,175
		Itaúnas (ITA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 10 (jun/jul 2023)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	2,096	0,024	0,366	0,367	16,213	0,175	0,024
		Barra Seca (BS)		2,237	0,090	0,156	0,074	3,679	0,093	0,088
		Conceição da Barra (CB)		0,912	0,025	0,117	0,027	1,495	0,049	0,024
		Costa das Algas (CA)		2,764	0,025	0,323	0,320	10,495	0,262	0,024
		Degredo (DEG)		2,803	0,027	0,164	0,087	4,466	0,078	0,036
		Foz do Rio Doce (FRD)		2,461	0,046	0,161	0,067	5,522	0,096	0,044
		Itaúnas (ITA)		NA	NA	NA	NA	NA	NA	NA
Dados PMBA/Fest - Ecotoxicologia	Campanha 11 (jan 2024)	Barra Nova (BN)	Peixes onívoros	2.520	0.052	0.709	<0,012	2.250	0.135	<0,024
		Barra Seca (BS)		1.678	0.048	0.035	0.226	1.797	0.256	<0,024
		Conceição da Barra (CB)		2.983	0.096	0.757	<0,012	2.585	0.162	0.038
		Costa das Algas (CA)		2.721	0.070	4.080	0.608	13.367	0.715	0.063
		Degredo (DEG)		1.107	0.103	3.455	<0,012	8.090	0.628	0.073
		Foz do Rio Doce (FRD)		2.421	0.074	1.632	0.323	5.425	0.447	0.043
		Itaúnas (ITA)		1.015	0.074	1.059	0.079	3.332	0.393	0.033

Figura 7: Valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de coral da espécie *Mussismilia harttii* e do hidrocoral da espécie *Millepora alcicornis* coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.





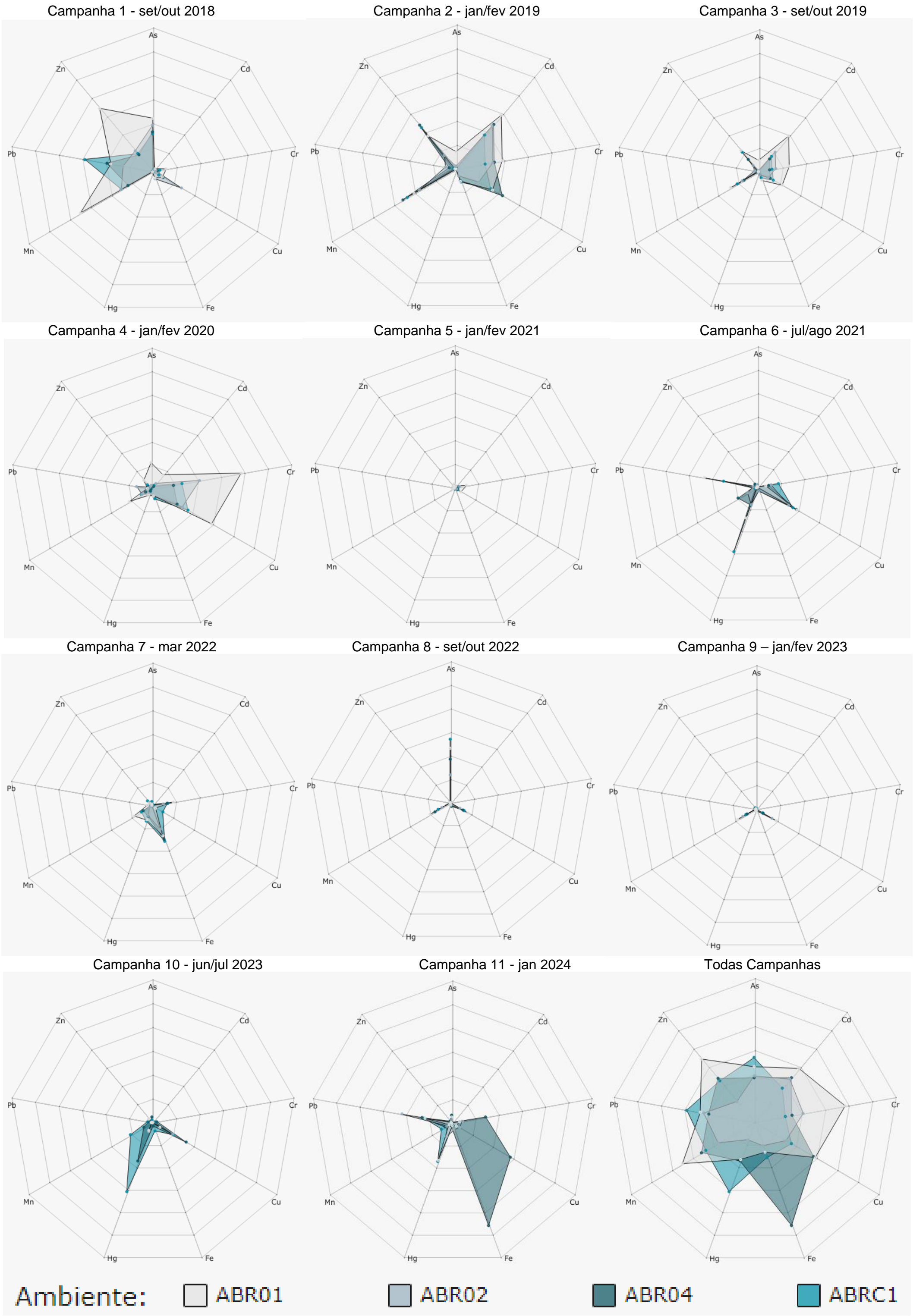
O gráfico de barras dos valores do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação), gerado para cada estação de coleta avaliada e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais da bioacumulação dos metais e As no coral *Mussimilia harttii* e no hidrocoral *Millepora alcicornis* coletados no Setor Abrolhos do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. De maneira geral, a Figura 7 demonstra que os maiores valores do IBR Bioacumulação foram observados entre as Campanha 1 e 4. Neste caso, os valores mais proeminentes do índice foram observados na estação de coleta ABR01, em todas as Campanhas realizadas. Além disso, a estação de coleta ABR04 também se destacou apresentando um alto valor do IBR Bioacumulação na Campanha 2.

Na Campanha 5, foi observada uma importante redução nos valores do IBR Bioacumulação, os quais se aproximaram de zero em todas as estações de coleta analisadas, indicando assim baixos níveis de bioacumulação de metais e As. Entretanto, da Campanha 6 até a Campanha 8 foi observada um aumento no valor do IBR Bioacumulação, indicando um novo aumento na contaminação dos corais e hidrocorais por metais e As, com destaque para os maiores valores do índice não só na estação de coleta ABR01, mas também na estação de coleta ABRC1.

Na Campanha 9, os valores do IBR Bioacumulação apresentaram novamente uma redução em todas as estações amostrais, com seus valores tendendo à zero. Por fim, na Campanha 10, os valores do IBR Bioacumulação aumentaram novamente nas estações amostrais ABRC1 e ABR04. Esse padrão de aumento foi mantido na Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso), além de ter sido observado um expressivo aumento no valor do IBR Bioacumulação na estação amostral ABR04. Assim, embora o impacto causado pelos metais e As nos corais e hidrocorais tenha, de forma geral, diminuído ao longo do monitoramento, observa-se ainda a ocorrência de uma tendência de alternância nos valores do IBR Bioacumulação, indicando flutuações temporais importantes no nível de contaminação dos corais e hidrocorais por metais e As.

A observação de períodos de reincidência da bioacumulação de metais e As nos corais e hidrocorais da região dos Abrolhos ao longo do período de monitoramento, indica que esses organismos estão sendo expostos a esses contaminantes de forma crônica, tornando-os assim vulneráveis aos efeitos tóxicos desses contaminantes aquáticos. Os impactos por metais e As em organismos coralíneos podem incluir o branqueamento, redução nas taxas de crescimento e calcificação, bem como diminuição da diversidade e abundância (van Dam et al., 2011).

Figura 8: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de coral da espécie *Mussismilia hartii* e do hidrocoral da espécie *Millepora alcicornis* coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Metais analisados: Arsênio (As); Cádmio (Cd); Chumbo (Pb); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Ferro (Fe); Manganês (Mn); Mercúrio (Hg); e Zinco (Zn). Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)].

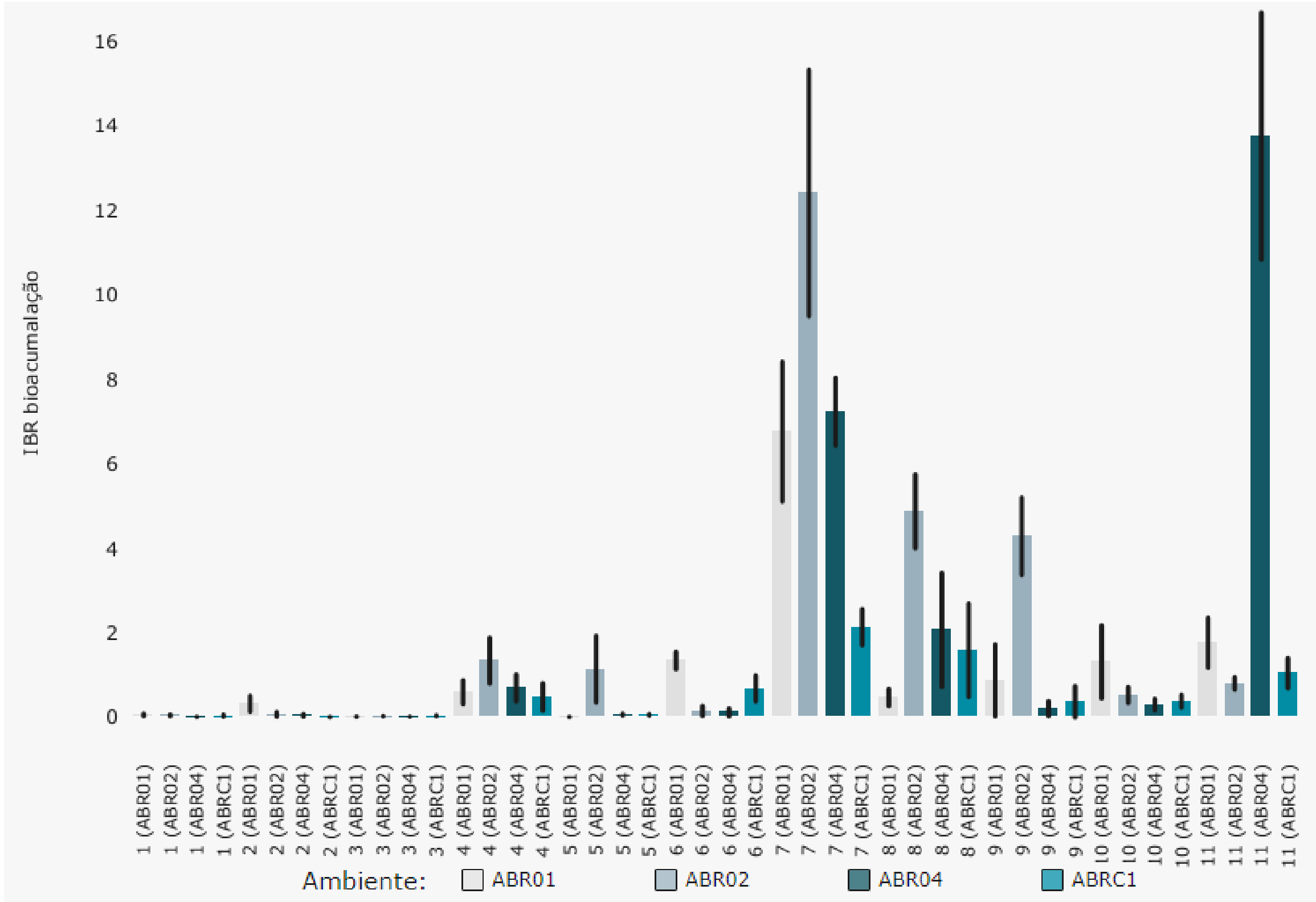




Os gráficos de radar apresentados na Figura 8 foram obtidos a partir do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) de cada estação amostral avaliada e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal da bioacumulação de cada metal e do As no coral *Mussimilia harttii* e no hidrocoral *Millepora alcicornis* coletados no Setor Abrolhos do Ambiente Marinho, bem como a contribuição de cada um destes contaminantes para a composição do IBR Bioacumulação. As Campanhas 1, 2, 3, 4 e 11 foram aquelas que apresentaram os maiores valores do IBR Bioacumulação, bem como também a maior diversidade de elementos contaminantes compondo o valor deste índice.

Foi possível notar que todos os elementos analisados apresentaram valores altos de contribuição para a composição do IBR Bioacumulação, sendo que a participação de cada um destes elementos foi dependente da Campanha de amostragem. Neste contexto, vale lembrar que As, Cd, Hg e Pb são contaminantes altamente tóxicos para a biota aquática, e que os demais metais analisados podem também ser tóxicos em concentrações excessivas. Por exemplo, no caso do Cu, este pode causar efeitos negativos na reprodução de organismos coralíneos e, conseqüentemente, danos ecológicos aos ambientes recifais (van Dam et al., 2011)

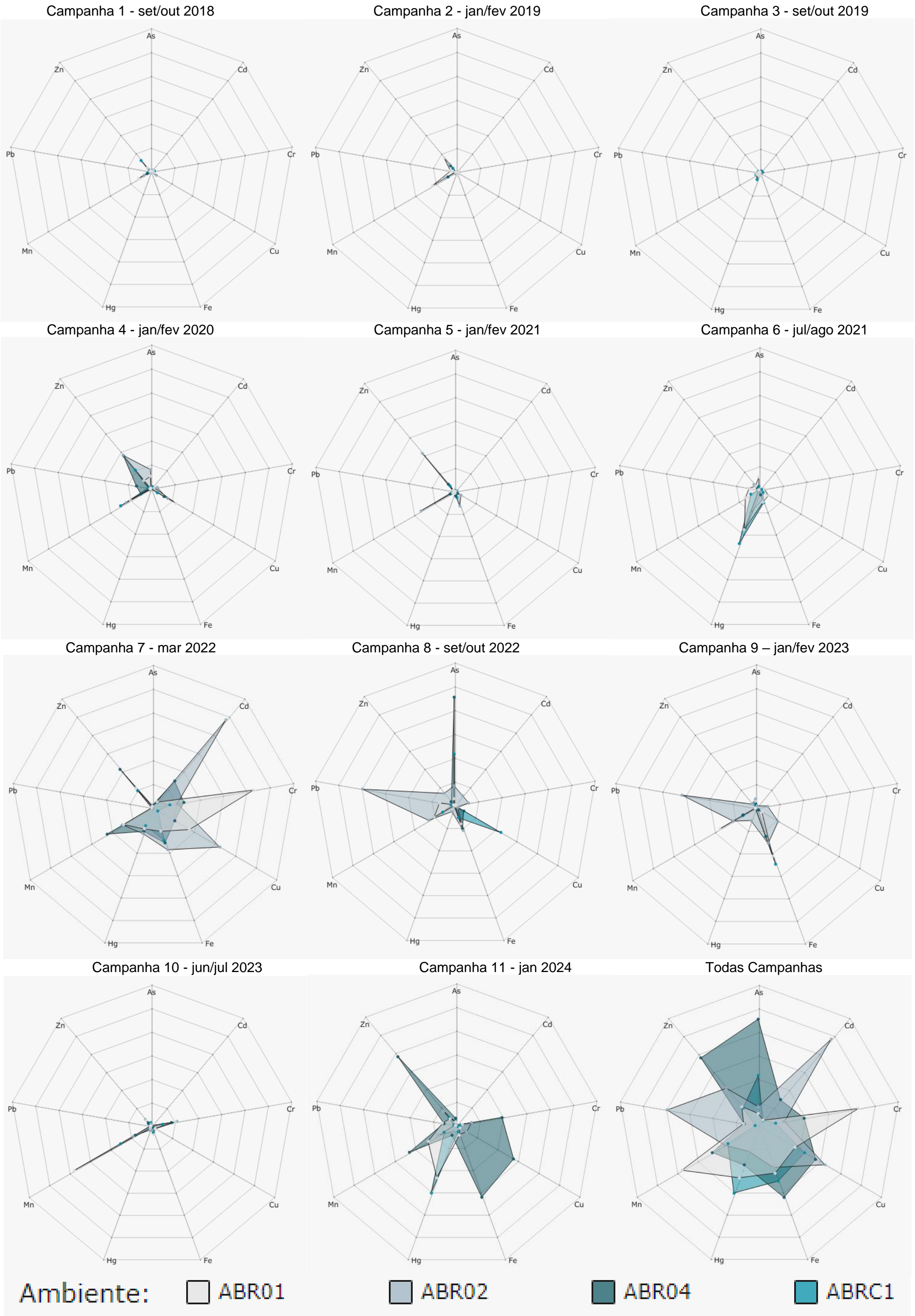
Figura 9: Valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de plâncton de Abrolhos (fitoplâncton e zooplâncton) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.



O gráfico de barras dos valores do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais na bioacumulação dos metais e As no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) do Setor Abrolhos do Ambiente Marinho, ao longo de todo o período do monitoramento.

De maneira geral, a Figura 9 demonstra que a bioacumulação de metais e As nos organismos do plâncton do Setor Abrolhos, ao longo de todo o período monitorado, tem seus valores mais relevantes a partir da Campanha 4, com o seu maior impacto sendo observado na Campanha 7, para as estações de coleta ABR01, ABR02 e ABRC1. Na Campanha 11, o destaque foi para a estação de coleta ABR04. Após a Campanha 7, os valores do IBR Bioacumulação diminuíram até a Campanha 10, tendo sido observado um novo aumento expressivo no valor do IBR Bioacumulação na Campanha 11. Cabe destacar ainda que, de forma geral, o padrão observado para este índice no plâncton coletado em Abrolhos segue o mesmo padrão observado no IBR Bioacumulação ao longo de todo o monitoramento realizado nas demais áreas de atuação do PMBA.

Figura 10: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação) determinados para amostras de plâncton de Abrolhos (fitoplâncton e zooplâncton) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Metais analisados: Arsênio (As); Cádmiio (Cd); Chumbo (Pb); Cobre (Cu); Cromo (Cr); Ferro (Fe); Manganês (Mn); Mercúrio (Hg); e Zinco (Zn). Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)].



Na Figura 10, que apresenta os gráficos de radar derivados do IBR Bioacumulação do plâncton coletado em Abrolhos, observa-se que as Campanhas 7, 8, 9 e 11 foram aquelas que mais se destacaram por apresentarem os maiores valores do índice e a maior diversidade de elementos bioacumulados no plâncton.

A Campanha 7 foi aquela que apresentou os maiores valores de IBR Bioacumulação para praticamente todas as estações de coleta neste Setor (ABR01, ABR02 e ABRC1). Nesta Campanha, foi observado um maior destaque para o valor do IBR Bioacumulação na estação amostral ABR02, onde os metais Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn e Zn foram aqueles que mais contribuíram para a composição deste índice, com destaque para os metais Cd e Cu, os quais apresentaram os maiores valores de contribuição para a composição do IBR Bioacumulação nesta estação de coleta. Por sua vez, os metais Cr, Mn, Cu, Fe, Hg e Zn foram os mais relevantes para a composição do índice na estação amostral ABR01. Já na estação amostral ABRC1, o IBR Bioacumulação foi composto principalmente pelos metais Mn, Hg, Fe, Cr e Zn.

Na Campanha 8, os elementos As, Cu, Fe, Mn e Zn foram os que mais contribuíram para o valor do IBR Bioacumulação na estação amostral ABR04. Com relação a estação amostral ABRC1, os elementos que apresentaram as maiores contribuições para a composição do valor do índice foram o As e Cu. Porém, foram também observadas as contribuições do Fe, Mn e Pb. Por fim, o valor do IBR Bioacumulação da estação amostral ABR01 esteve associado aos elementos As, Cr, Fe, Mn e Pb.

Com relação a Campanha 9, a estação amostral que apresentou o valor do IBR Bioacumulação mais proeminente foi a ABR02, tendo o seu índice sido composto pela contribuição dos elementos As, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Pb e Zn, com destaque para a ocorrência de um pico de valor do Pb. As estações amostrais ABR01, ABRC1 e ABR04 apresentaram o Fe como sendo o elemento mais relevante na composição dos valores do IBR Bioacumulação nestas estações de coleta. Entretanto, estes valores também contaram com a contribuição do As, Cu e Mn.

Na Campanha 11, o maior valor do IBR Bioacumulação observado na estação de coleta ABR04 foi destaque, sendo que o seu valor de IBR Bioacumulação foi majoritariamente composto pelos metais Zn, Mn, Hg, Fe, Cu e Cr.

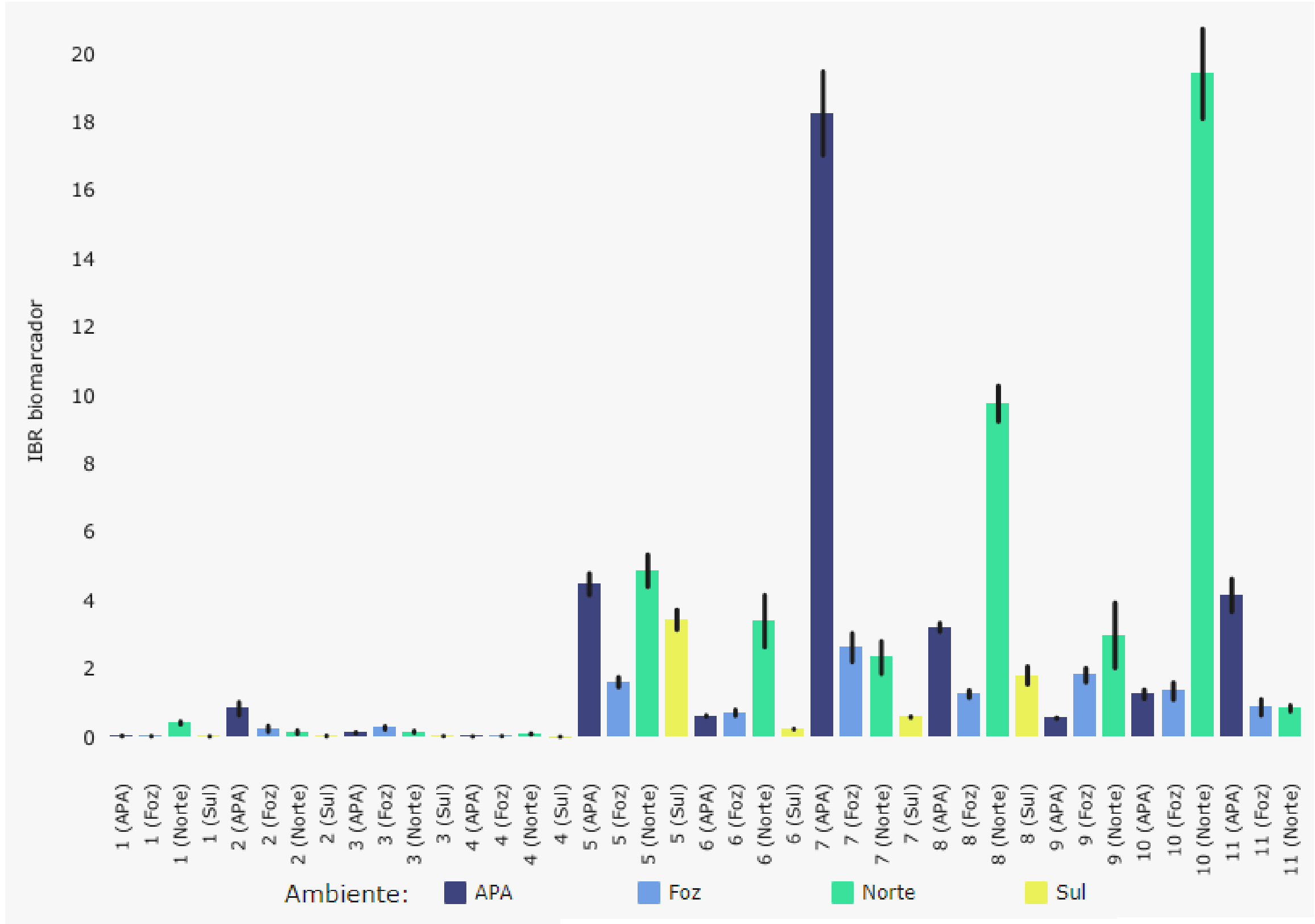
Ressalta-se que a bioacumulação dos metais Cd, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn e Zn contribuiu na composição do IBR Bioacumulação de todas as estações amostrais avaliadas no Setor Abrolhos. De uma forma geral, os metais essenciais Cu e Mn foram os elementos com maior frequência na formação do IBR Bioacumulação ao longo de todo o monitoramento realizado em Abrolhos. Todavia, cabe ressaltar que, em algumas Campanhas, a composição do IBR Bioacumulação contou também com valores relevantes de contribuição de metais altamente tóxicos, como Cd, Hg, Pb e As. Da mesma forma, também foram identificadas Campanhas onde foram observados valores consideráveis do IBR Bioacumulação onde as contribuições do Zn, Mn, Cu e Cr foram relevantes. Vale lembrar que, apesar de serem metais essenciais à vida aquática, estes podem ser tóxicos à biota quando presentes em concentrações excessivas. Além disso, cabe destacar que a presença de metais e As no ambiente aquático pode

causar efeitos na estrutura da comunidade planctônica, em que táxons mais resistentes se tornam os dominantes, reduzindo assim a biodiversidade. Deve-se considerar ainda que os metais não estão ocorrendo de forma isolada no ambiente aquático, mas sim em misturas. Vale lembrar que a interação da mistura de metais e As pode desencadear efeitos aditivos e/ou sinérgicos, causando assim um incremento no impacto sobre a biota aquática, mesmo em concentrações consideradas baixas (Albarico et al., 2022; Arreguin-Rebolledo et al., 2024; Cedergreen, 2014; Isibor et al., 2020; Rauf et al., 2019).



3.2 ÍNDICE DE RESPOSTA BIOLÓGICA (IBR Biomarcador)

Figura 11: Valores médios do Índice da Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1 – a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.



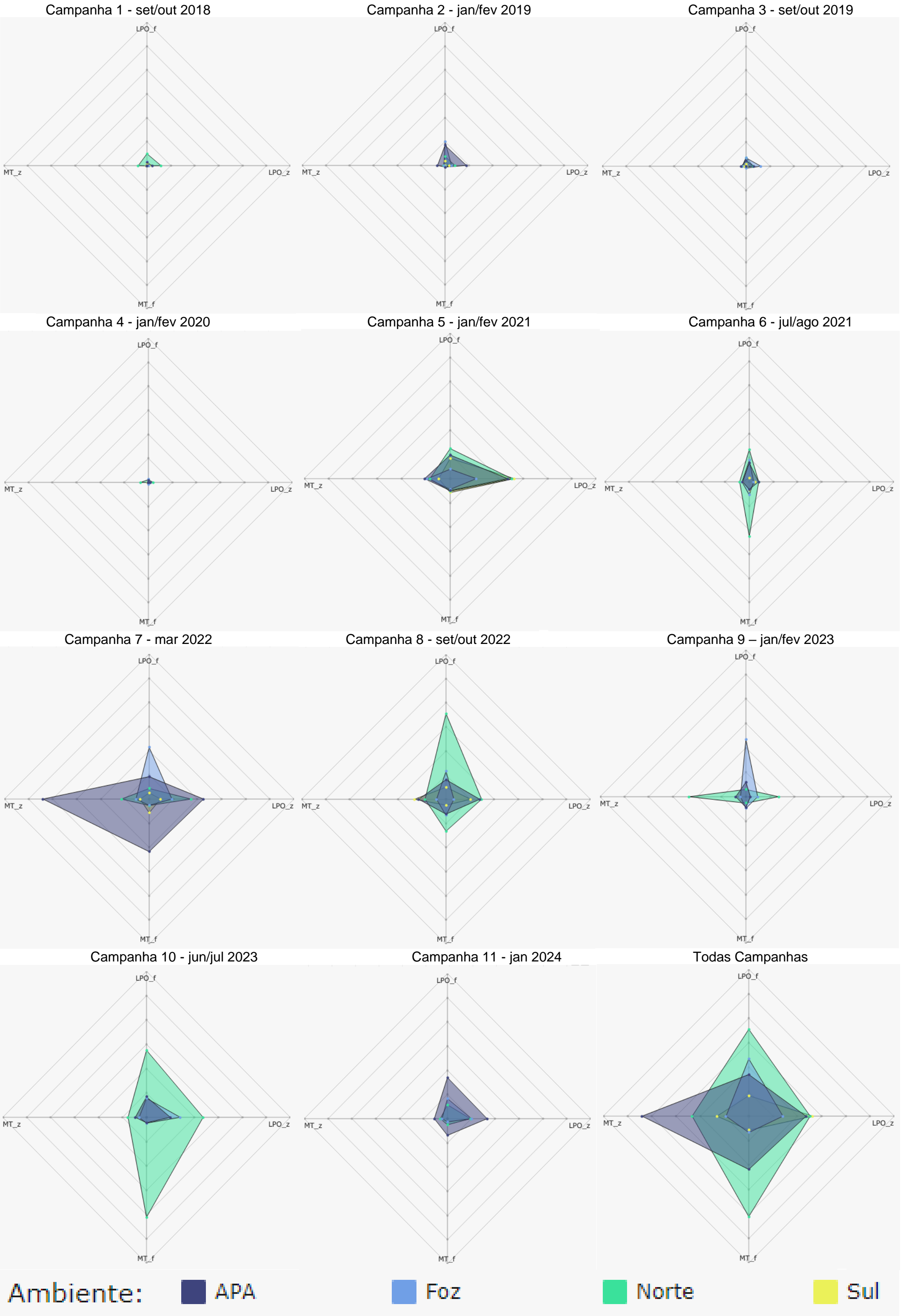


O gráfico de barras dos valores do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais das respostas dos biomarcadores no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. As respostas dos biomarcadores avaliados indicam impactos fisiológicos oriundos de estressores ambientais, como é o caso dos contaminantes. Sendo assim, aumentos nos valores do IBR Biomarcador indicam um maior nível de estresse nos organismos.

Em relação à comparação temporal feita a partir da avaliação do IBR Biomarcador para o plâncton do Ambiente Marinho, pode ser observado na Figura 11 que as respostas dos biomarcadores no índice começam a ser relevantes a partir da Campanha 5. Pode se observar ainda uma tendência sazonal, em que nos períodos chuvosos (Campanha 5 - jan/fev 2021; Campanha 7 - mar 2022; Campanha 9 - jan/fev 2023 e Campanha 11 – jan 2024), os valores do IBR Biomarcador nos Setores APA e Foz tendem a um aumento, com destaque para o Setor APA, o qual tende a apresentar os valores mais altos do IBR Biomarcador. Já nos períodos secos (Campanha 6 - jul/ago; Campanha 8 - set/out 2022; e Campanha 10 - jun/jul 2023), os valores do IBR Biomarcador tendem a aumentar no Setor Norte, o qual, em geral, se destaca com os valores mais altos deste índice, em relação aos demais Setores avaliados.

Os efeitos fisiológicos negativos parecem ter influência da bioacumulação dos metais e As, já que tanto o IBR Bioacumulação como o IBR Biomarcador tem seus valores mais expressivos no mesmo período do monitoramento, ou seja, aproximadamente entre as Campanhas 5 a 10 (Figura 1). Entretanto, possivelmente há também influência de outros estressores ambientais, bem como a interação entre esses estressores e os contaminantes aqui analisados. Por exemplo, um estudo já demonstrou que o aumento nas respostas dos biomarcadores lipoperoxidação (LPO) e concentração de metalotioneínas (MT) no zooplâncton está relacionado com misturas de metais com contaminantes orgânicos, como por exemplo os agrotóxicos (Zebral et al., 2021). Além disso, essas interações podem desencadear efeitos aditivos, antagônicos (menos severos) ou sinérgicos (mais severos) (Cedergreen, 2014; Rocha et al., 2023). Assim, a presença dos metais e As no Ambiente Marinho, mesmo em concentrações ambientalmente relevantes, traz uma grande preocupação, devido à complexidade dos sistemas e os efeitos sinérgicos com outros contaminantes presentes no ambiente aquático.

Figura 12: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de plâncton [fitoplâncton (\_f) e zooplâncton (\_z)] coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Os biomarcadores considerados foram: lipoperoxidação (LPO); e concentração de metalotioneínas (MT). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1 – a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



Os gráficos de radar apresentados na Figura 12 foram obtidos a partir do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) de cada Setor avaliado e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal das respostas dos biomarcadores no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) do Ambiente Marinho, bem como a contribuição de cada um destes para a composição do índice.

Durante o período de monitoramento, observou-se que as respostas dos biomarcadores à contaminação por metais e As começaram a aparecer a partir da Campanha 5. Cabe destacar que as Campanhas 7, 8 e 10 foram aquelas que apresentaram os maiores valores do IBR Biomarcador, bem como a contribuição de todos os biomarcadores analisados na composição do índice.

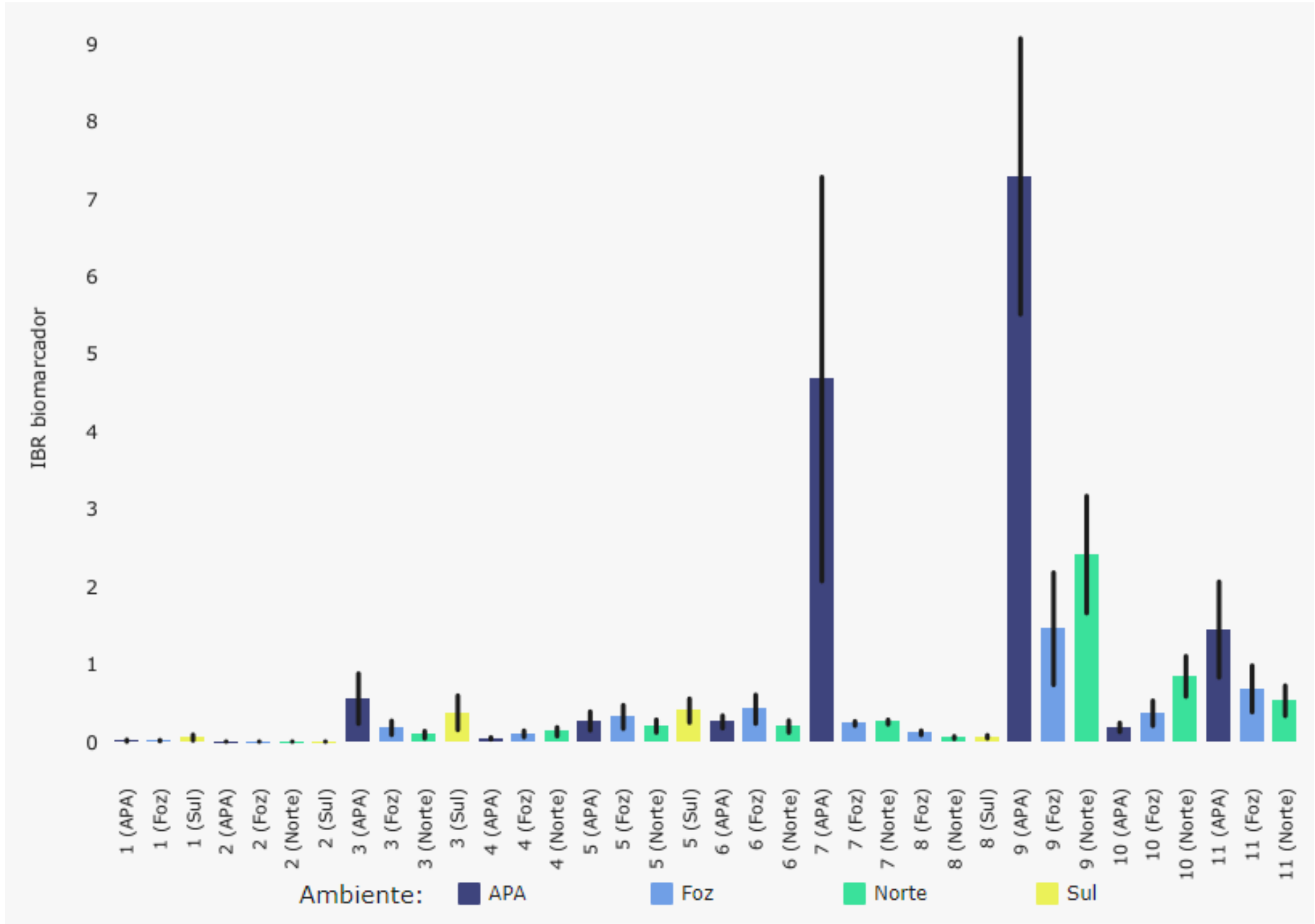
Na Campanha 7, o Setor APA foi o que apresentou, ao longo do monitoramento, o segundo maior valor do IBR Biomarcador, o qual teve uma contribuição relevante de todos os biomarcadores analisados. Porém, vale destacar que os biomarcadores MT no zooplâncton e MT no fitoplâncton apresentaram picos em seus valores no Setor APA. Por outro lado, os biomarcadores mais relevantes para a formação do índice no Setor Foz foram a LPO no fitoplâncton e LPO no zooplâncton. No Setor Norte, o estresse fisiológico se concentrou no zooplâncton, pois os biomarcadores mais importantes para a composição do IBR Biomarcador foram a MT e LPO no zooplâncton. Em relação ao Setor Sul, a contribuição mais importante para a composição do IBR Biomarcador foi a do biomarcador MT no fitoplâncton.

Na Campanha 8, foi observado que todos os biomarcadores contribuíram para a composição do IBR Biomarcador, em todos os Setores avaliados. Entretanto, vale destacar que a maior contribuição para a composição deste índice foi a do biomarcador LPO no fitoplâncton, principalmente no Setor Norte.

Na Campanha 10, o maior valor do IBR Biomarcador foi observado no Setor Norte. Apesar de todos os biomarcadores terem participado da composição do valor deste índice, as maiores contribuições foram da LPO no fitoplâncton e no zooplâncton, bem como da MT no fitoplâncton, a qual apresentou o valor mais alto dentre todos os biomarcadores analisados. Por sua vez, os valores do IBR Biomarcador dos Setores APA e Foz se associaram aos quatro biomarcadores analisados, porém com picos no valor da LPO no zooplâncton.

De uma forma geral, os biomarcadores que mais contribuíram para a composição do IBR Biomarcador, ao longo de todo o monitoramento, indicaram estresse oxidativo no fitoplâncton (LPO<sub>f</sub>) e zooplâncton (LPO<sub>z</sub>), bem como o impacto da bioacumulação de metais e As nas células destes organismos (MT<sub>z</sub> e MT<sub>f</sub>). Cabe ressaltar que aumentos no biomarcador LPO indicam danos nas membranas plasmáticas dos organismos avaliados, o que pode ocasionar prejuízos celulares severos. Por outro lado, o aumento de MT indica a ativação de respostas celulares de proteção frente à elevação na carga celular de metais e metalóides. Sem dúvida, o aumento dos valores de MT, com picos em vários Setores do Ambiente Marinho, reflete a contaminação desse ambiente por metais e As.

Figura 13: Valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de tecidos (brânquias, hepatopâncreas, músculo e hemolinfa) de camarões coletadas durante Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.

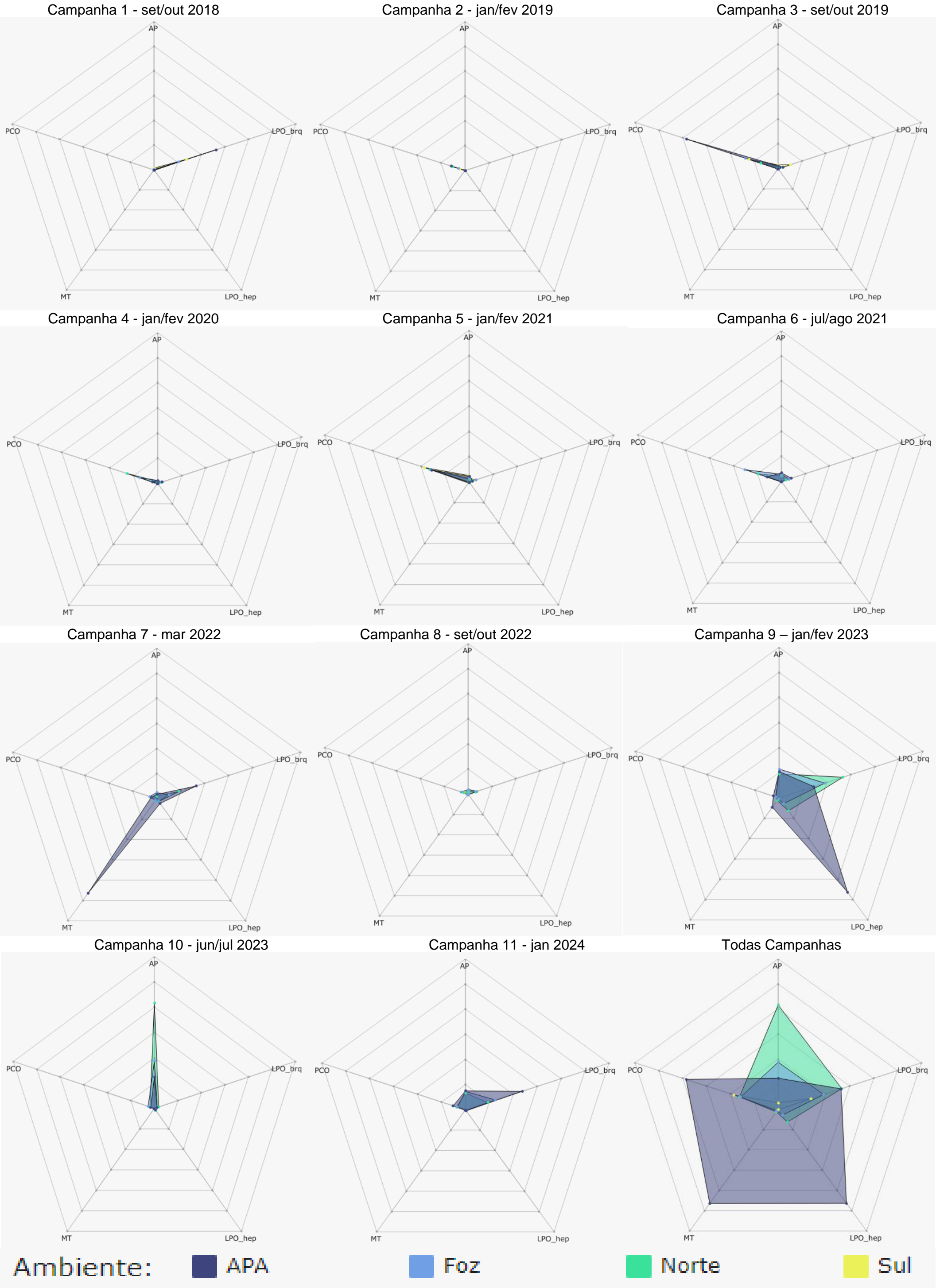


O gráfico de barras dos valores do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais das respostas dos biomarcadores nos camarões do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. Em relação à comparação temporal geral feita e apresentada na Figura 13, observa-se que os valores do IBR Biomarcador começaram a aumentar sutilmente a partir da Campanha 3 (set/out 2019 – período seco). Na Campanha 7, houve um aumento expressivo no valor deste índice para o Setor APA, o qual voltou a diminuir na Campanha 8. Porém, todos os Setores voltaram a apresentaram um aumento expressivo nos valores do IBR Biomarcador na Campanha 9, com destaque novamente para o Setor APA. Nas Campanhas 10 e 11, os valores deste índice voltaram a diminuir, indicando uma variação temporal importante no estresse fisiológico ao qual os camarões marinhos estão sujeitos.

Quando os valores do IBR Biomarcador de camarões marinhos foram comparados com os respectivos valores do IBR Bioacumulação, foi possível observar que os aumentos nos valores do IBR Biomarcador foram menores do que aqueles observados nos valores do IBR Bioacumulação. Uma possível interpretação para este achado é o fato de que a mistura e interação entre os contaminantes, incluindo metais e As, podem gerar efeitos antagônicos, resultando em uma menor resposta dos biomarcadores, mesmo que tenha ocorrido um incremento na bioacumulação dos contaminantes nos tecidos dos camarões (Vellinger et al., 2012). Por outro lado, pode também indicar um possível aumento da tolerância dos organismos à exposição crônica e à bioacumulação dos contaminantes presentes no Ambiente Marinho (Pestana et al., 2016).



Figura 14: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de tecidos de camarões coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Os biomarcadores considerados foram: lipoperoxidação nas brânquias (LPO\_brq) e no hepatopâncreas (LPO\_hep); concentração de metalotioneínas no hepatopâncreas (MT); proteínas carboniladas no músculo (PCO); e níveis de sítios AP (apurínicos/apirimídicos) (AP) da Campanha 1 à 8 na hemolinfa e da Campanha 9 à 10 no músculo. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].





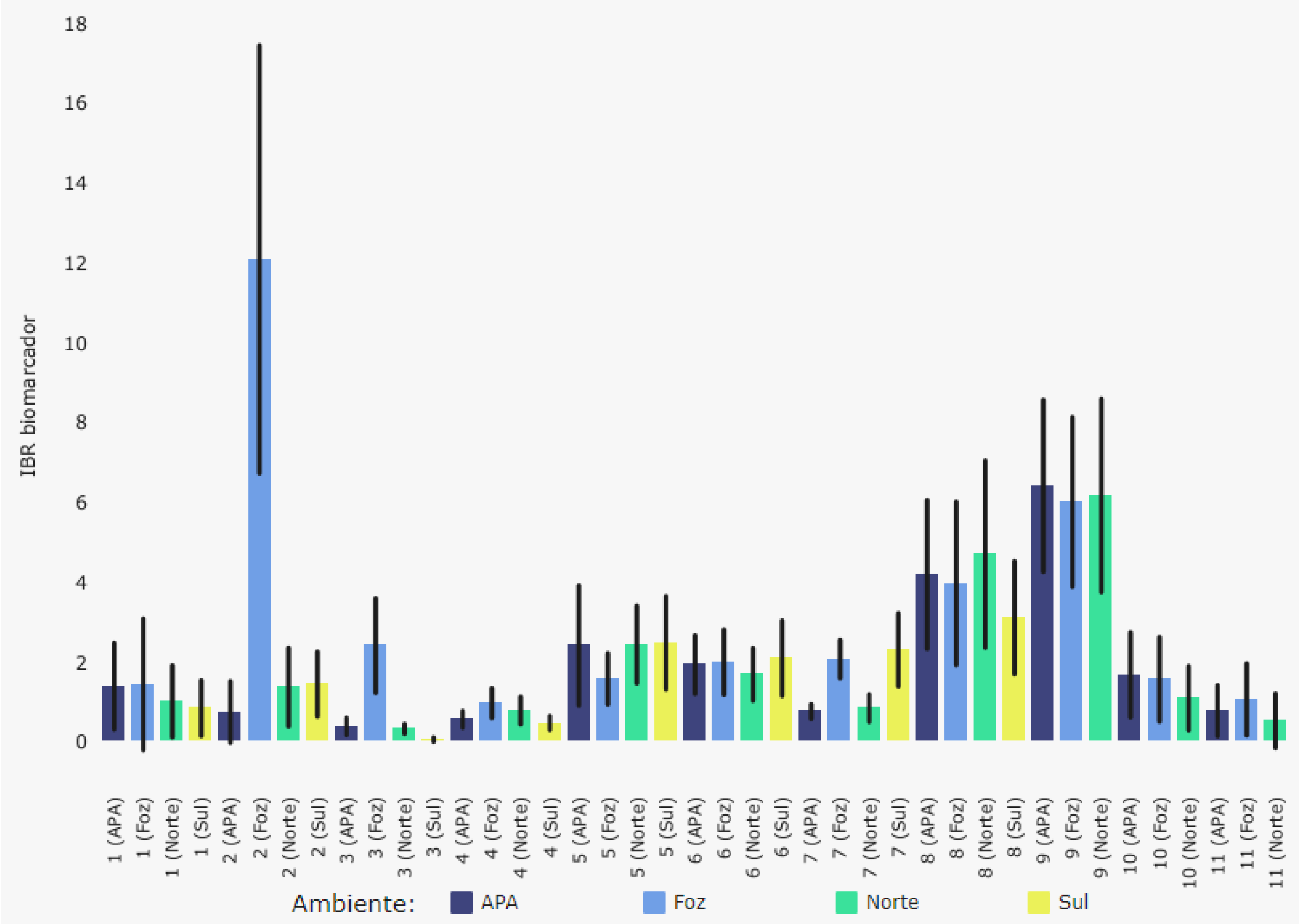
Os gráficos de radar apresentados na Figura 14 foram obtidos a partir do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) de cada Setor avaliado e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal das respostas dos biomarcadores nos camarões do Ambiente Marinho e a contribuição destes para a composição do índice. De uma forma geral, as Campanhas que apresentaram os maiores valores de IBR Biomarcador, bem como a maior diversidade de biomarcadores que contribuíram para este índice foram as Campanhas 7 e 9.

Na Campanha 7, o Setor APA foi o que apresentou o maior valor do IBR Biomarcador, sendo que os biomarcadores que mais contribuíram para a composição deste índice foram a LPO nas brânquias e no hepatopâncreas, bem como a PCO, sítios AP e MT no hepatopâncreas, com destaque para a MT que apresentou um pico de valor. Com relação aos Setores Foz e Norte, a LPO nas brânquias foi o biomarcador mais importante na composição dos valores do IBR Biomarcador nestes Setores.

Cabe destacar que a Campanha 9 se sobressaiu em relação às demais Campanhas, devido aos maiores valores do IBR Biomarcador observados em todos os Setores avaliados. O Setor APA foi aquele que apresentou o maior valor do índice, o qual foi composto, principalmente, pelos biomarcadores sítio AP, LPO (brânquias e hepatopâncreas) e MT, com destaque para um pico no valor da LPO no hepatopâncreas. Com relação ao Setor Norte, foi observada uma contribuição de todos os biomarcadores analisados, com os maiores valores sendo para a LPO nas brânquias. Por sua vez, o valor do IBR Biomarcador no Setor Foz apresentou associação com todos os biomarcadores analisados, exceto com a MT, apresentando também uma maior contribuição da LPO nas brânquias.

Vale ressaltar que as respostas da LPO nas brânquias e da PCO foram mais expressivas ao longo de todo o monitoramento realizado. Isto alerta para o fato de que os camarões coletados no Ambiente Marinho estavam sob estresse oxidativo. Além disso, vale ressaltar que, nas Campanhas 7 e 10, ocorreram valores elevados de contribuição dos biomarcadores MT e sítio AP, respectivamente. Isto pode estar sinalizando uma acumulação excessiva de contaminantes, bem como danos ao DNA nas células dos organismos analisados. Esses impactos podem afetar o desempenho da espécie no ambiente, influenciar a sobrevivência da população a longo prazo e afetar a saúde de organismos que os consomem, incluindo o homem (Ezemonye et al., 2019; Frías-Espericueta et al., 2022; MacFarlane et al., 2006).

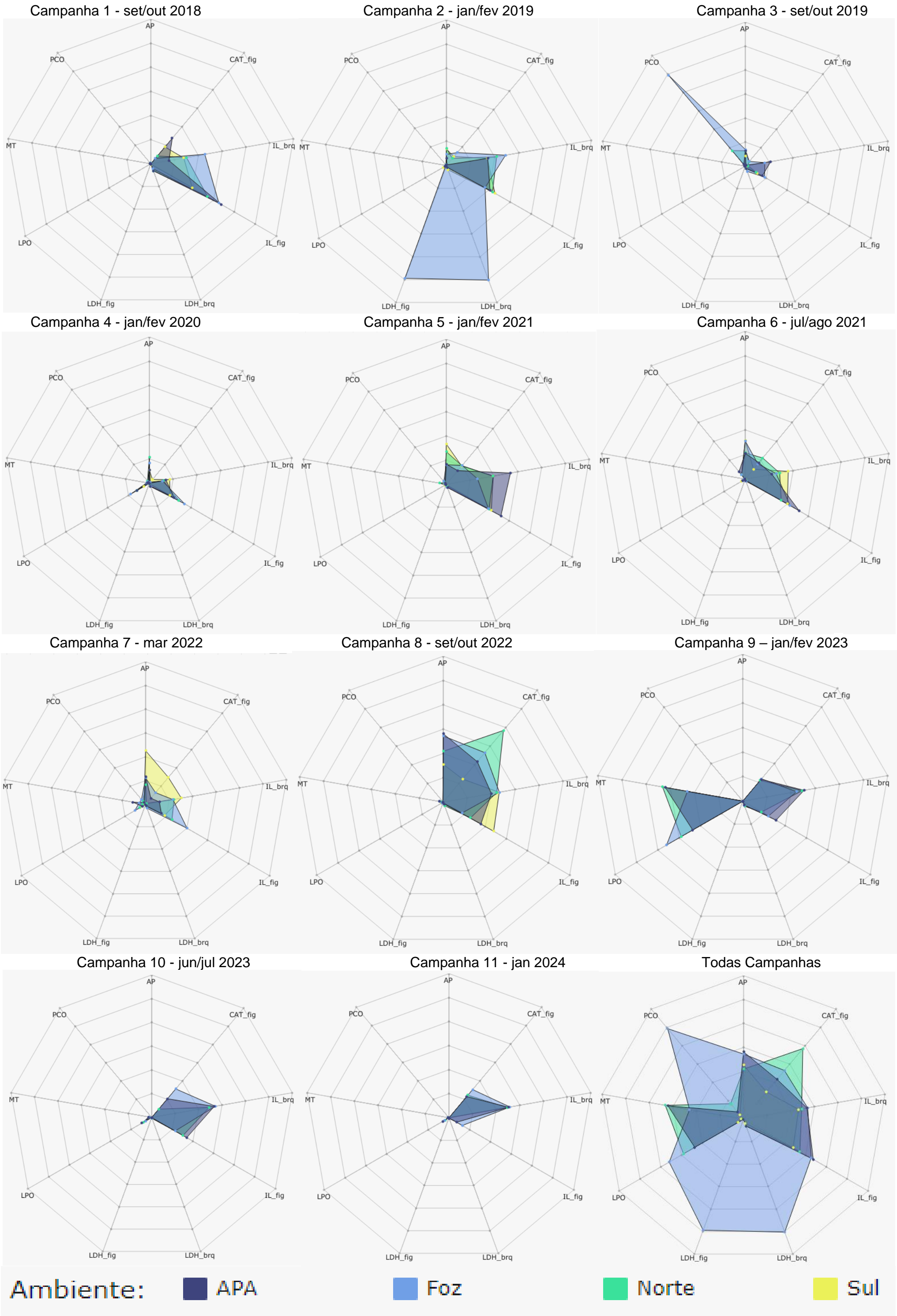
Figura 15: Valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de tecidos (brânquias, fígado, músculo e sangue) de peixes (carnívoros e onívoros) coletadas durante Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.



O gráfico de barras dos valores do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais das respostas de biomarcadores nos peixes (onívoros e carnívoros) do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. Com relação à comparação temporal global feita e apresentada na Figura 15, pode ser observado que o IBR Biomarcador nos peixes marinhos tende a aumentar gradualmente ao longo das Campanhas. Entretanto, os valores do IBR Biomarcador voltam a ficar menores nas Campanhas 10 e 11. Cabe destacar que as Campanhas 8 e 9 distinguem-se das demais Campanhas por apresentarem os maiores valores do IBR Biomarcador, em todos os Setores analisados. Porém, vale ressaltar que o maior valor deste índice ao longo de todo o período do monitoramento foi observado no Setor Foz na Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso).

A partir da análise do gráfico apresentado na Figura 5 (IBR Bioacumulação em peixes), pode ser observado que ocorreu uma bioacumulação de metais e As nos peixes marinhos ao longo do período de monitoramento. Outrossim, este gráfico apresenta um padrão similar de variações nos valores ao longo do tempo quando comparado com o gráfico do IBR Bioamarcador (Figura 15), indicando que as respostas observadas nos biomarcadores podem estar associadas ao estresse causado nos peixes pela bioacumulação de metais e As, em decorrência da biodisponibilidade destes contaminantes no ambiente marinho.

Figura 16: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de tecidos de peixes (carnívoros e onívoros) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Os biomarcadores considerados foram: lipoperoxidação no fígado (LPO); concentração de metalotioneína no fígado (MT); níveis de proteínas carboniladas da Campanha 1 à 8 no músculo e da Campanha 9 à 10 no fígado (PCO); níveis de sítios AP (apurínicos/apirimídicos) da Campanha 1 à 8 no sangue e da Campanha 9 à 10 nas brânquias (AP); índices médios de lesões histopatológicas nas brânquias (IL\_brq) e no fígado (IL\_fig); atividade da enzima catalase no fígado (CAT\_fig); e atividade da enzima lactato desidrogenase nas brânquias (LDH\_brq) e no fígado (LDH\_fig). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



Os gráficos de radar apresentados na Figura 16 foram obtidos a partir do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) de cada Setor avaliado e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal das respostas dos biomarcadores nos peixes (onívoros e carnívoros) do Ambiente Marinho, bem como a contribuição destes para a composição do índice. Os maiores valores do IBR Biomarcador foram observados nas Campanhas 2, 8 e 9. Apesar disso, as Campanhas que apresentaram a maior diversidade de contribuição de biomarcadores para a composição do índice foram as Campanhas 2 e 7.

Na Campanha 2, o Setor Foz apresentou o maior valor de IBR Biomarcador, sendo este índice formado pelos biomarcadores sítios AP, CAT no fígado, IL nas brânquias, IL no fígado, LDH nas brânquias e LDH no fígado. Neste caso, cabe destacar que dois picos de valores se destacaram e correspondem aos biomarcadores LDH no fígado e LDH nas brânquias. Os valores do IBR Biomarcador nos Setores Sul e Norte tiveram as contribuições dos biomarcadores AP, CAT no fígado, IL nas brânquias e IL no fígado. Já para o Setor APA, o IBR Biomarcador esteve relacionado com os biomarcadores sítios AP, IL nas brânquias e IL no fígado.

Na Campanha 7, os Setores Foz e Sul apresentaram os maiores valores do IBR Biomarcador. No Setor Foz, os biomarcadores sítios AP, CAT no fígado, IL nas brânquias, IL no fígado, LDH nas brânquias, LPO, MT e PCO contribuíram com valores para a composição do índice. Em relação ao Setor Sul, os biomarcadores que compuseram o IBR Biomarcador foram os sítios AP, CAT no fígado, IL nas brânquias, IL no fígado e LPO. Por sua vez, os biomarcadores que mais contribuíram para a composição dos valores do IBR Biomarcador nos Setores Norte e APA foram sítios AP, IL nas brânquias, IL no fígado e LPO. Além disso, no Setor APA, houve também a contribuição do biomarcador MT.

Com relação à Campanha 8, os biomarcadores mais relevantes para a formação do IBR Biomarcador, em todos os Setores, foram os sítios AP, CAT no fígado, IL nas brânquias e IL no fígado. Além disso, os valores do índice nos Setores Norte e APA apresentaram discretas contribuições dos biomarcadores MT e LDH nas brânquias. Já os valores do IBR Biomarcador nos Setores Sul e Foz contaram com a contribuição dos biomarcadores MT e LPO. Vale ressaltar que no Setor Norte houve um pico no valor do biomarcador CAT no fígado.

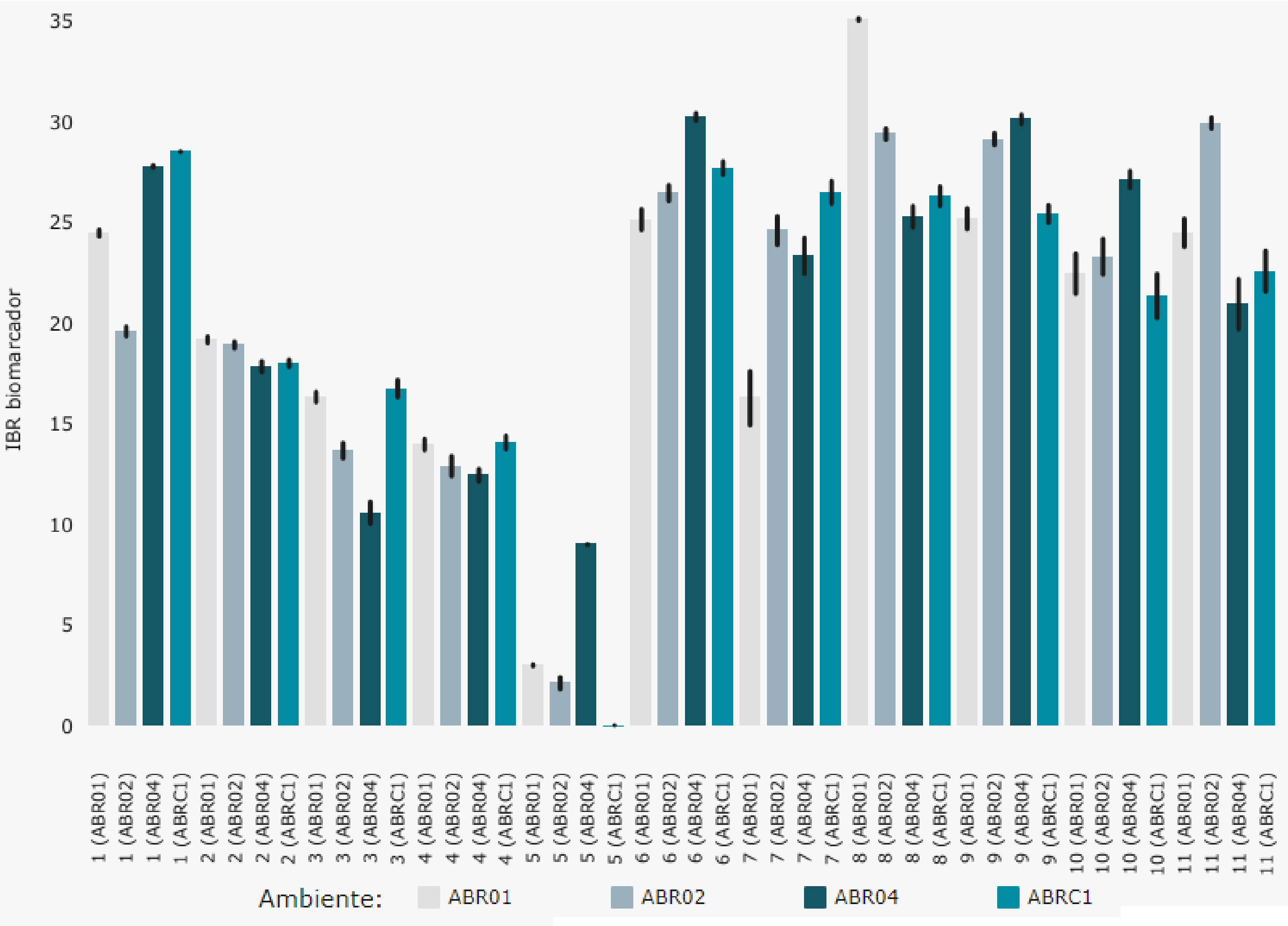
Na Campanha 9, os três Setores avaliados apresentaram um padrão similar de contribuição dos biomarcadores para a composição do IBR Biomarcador. Neste caso, os biomarcadores que mais contribuíram para a composição deste índice foram CAT no fígado, IL nas brânquias, IL no fígado, LDH nas brânquias, LPO e MT.

De um modo geral, os biomarcadores que apresentaram maior frequência de contribuição na composição do IBR Biomarcador, na maior parte das Campanhas realizadas, foram CAT no fígado, IL nas brânquias, IL no fígado e sítios AP. Cabe lembrar que as respostas destes biomarcadores indicam a ocorrência de estresse oxidativo (CAT), danos histológicos (IL) e danos ao DNA (sítios AP) no material biológico analisado. Além disso, cabe destacar a ocorrência de picos de valores relevantes de LDH nas

brânquias e no fígado na Campanha 2 e de PCO na Campanha 3. Estas respostas indicam uma demanda anaeróbica da célula e danos oxidativos nas proteínas devido ao estresse ambiental ao qual os organismos encontram-se expostos. Comparando-se esses resultados com aqueles de bioacumulação dos contaminantes nos peixes marinhos (Figura 5), há evidências de uma influência da contaminação do ambiente marinho na bioacumulação de metais e As e, consequentemente, nas respostas dos biomarcadores observadas ao longo do monitoramento realizado (Figuras 15 e 16).



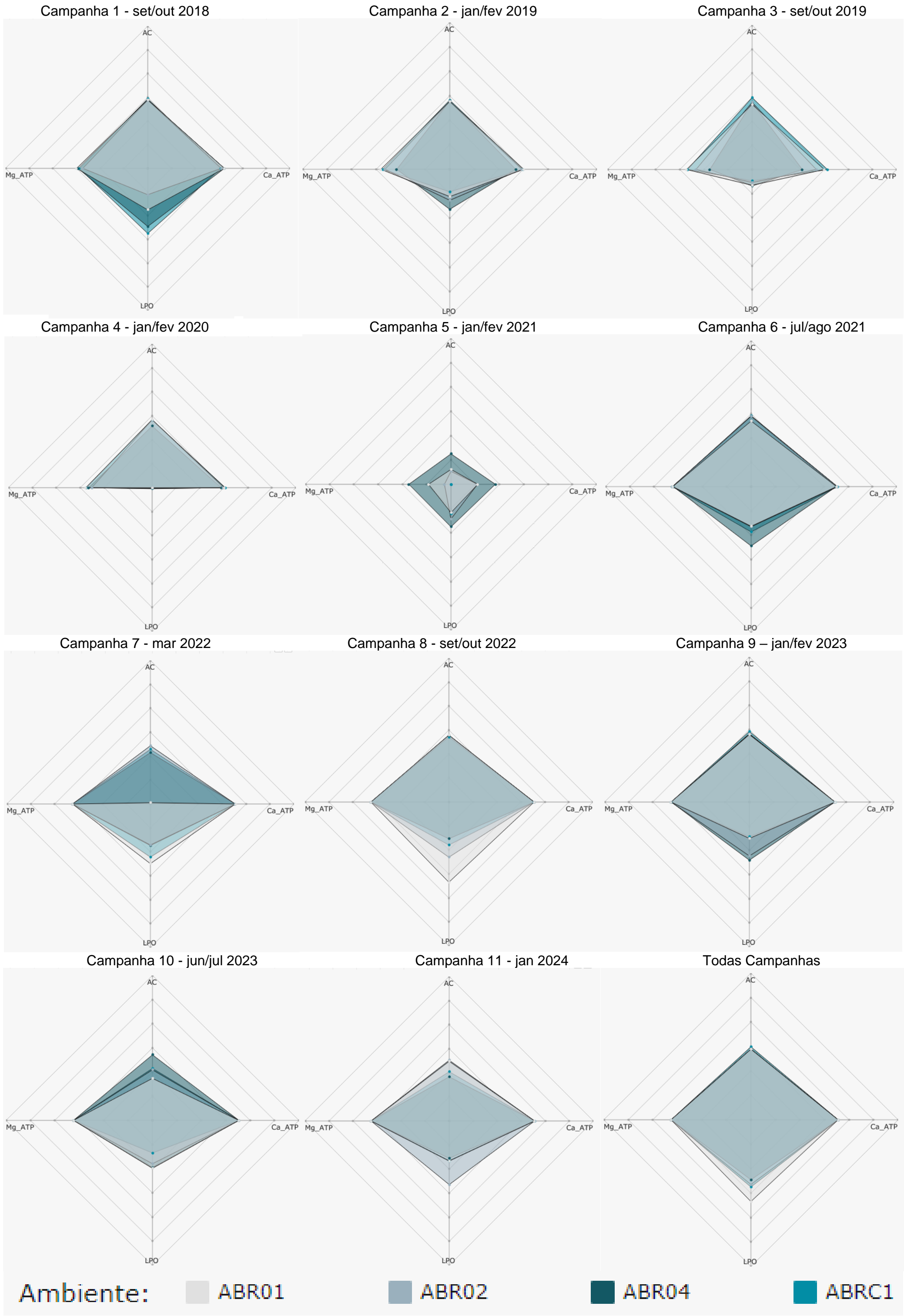
Figura 17: Valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de coral da espécie *Mussismilia harttii* e do hidrocoral da espécie *Millepora alcicornis* coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.



O gráfico de barras dos valores do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais das respostas dos biomarcadores no coral da espécie *Mussimilia harttii* e do hidrocoral da espécie *Millepora alcicornis* coletados no Setor Abrolhos do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento. Em relação à comparação temporal global feita e apresentada na Figura 17, denota-se que os valores do IBR Biomarcador foram altos em todas as estações amostrais, em todas as Campanhas realizadas, com exceção da Campanha 5, a qual apresentou menores valores do índice nas estações amostrais ABR01, ABR02 e ABRC1. Esses resultados indicam um alto estresse bioquímico e fisiológico crônico aos quais os corais e hidrocorais do Setor de Abrolhos estão sujeitos no ambiente. A partir da análise comparativa dos dados apresentados na Figura 7 (IBR Bioacumulação) com aqueles reportados na Figura 17 (IBR Biomarcador), verifica-se uma associação do estresse com a bioacumulação de metais e As nesses organismos coralíneos.

Sabe-se que alterações nos biomarcadores analisados no presente monitoramento são capazes de induzirem efeitos negativos sobre processos fisiológicos vitais dos organismos recifais, tais como redução do crescimento e reprodução, podendo assim afetar a dinâmica populacional, bem como a composição e biodiversidade das comunidades recifais da região dos Abrolhos. Vale ressaltar que, mudanças e perda na biodiversidade nos ecossistemas são uma das maiores preocupações atuais, já que a biodiversidade está relacionada com a capacidade do ambiente em desempenhar suas funções ecossistêmicas.

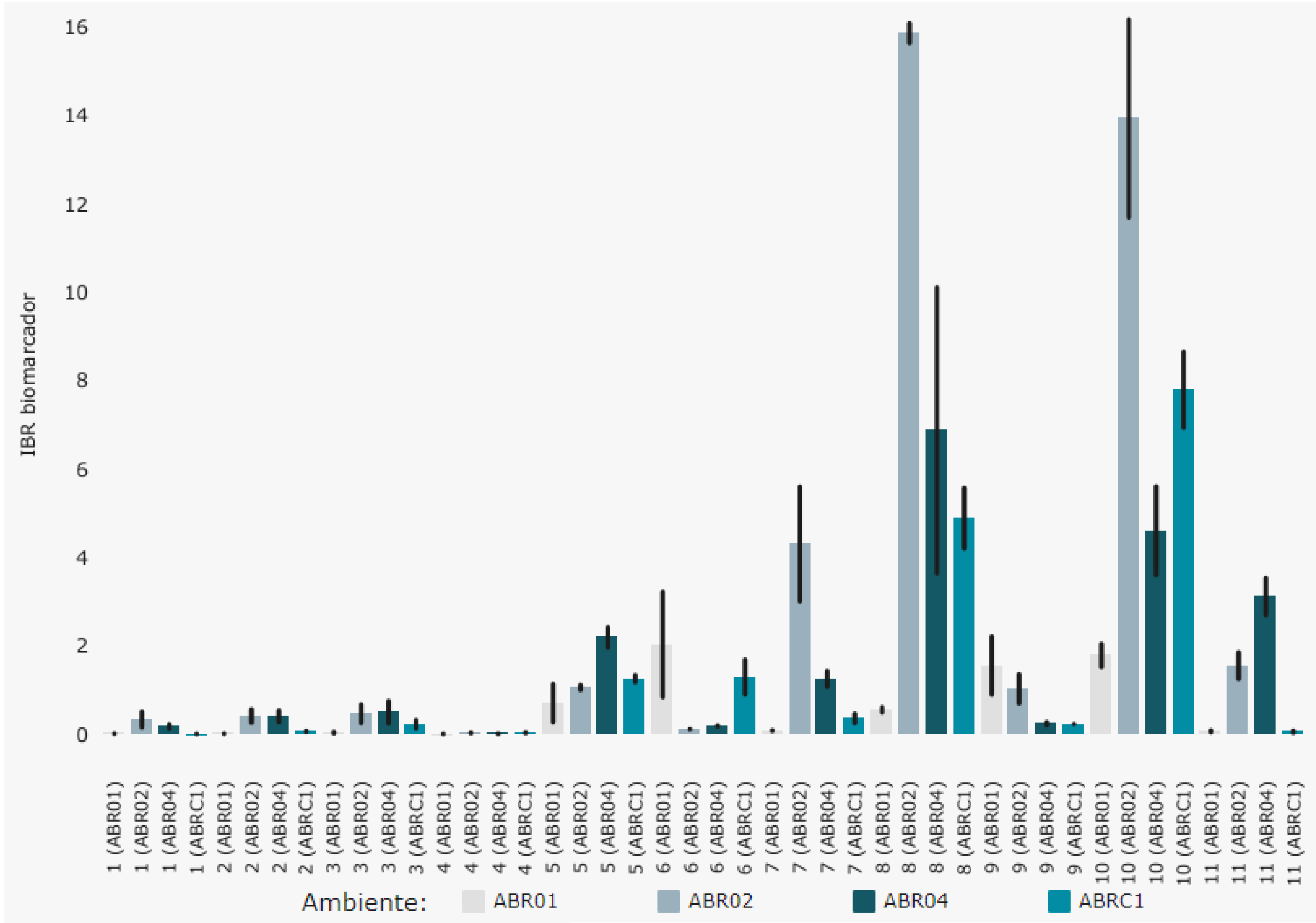
Figura 18: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de coral da espécie *Mussismilia harttii* e do hidrocoral da espécie *Millepora alcicornis* coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Os biomarcadores considerados foram: lipoperoxidação (LPO); atividade da enzima anidrase carbônica (AC); atividade da enzima Ca-ATPase (Ca-ATP); e atividade da enzima Mg-ATPase (Mg-ATP). Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)].



Os gráficos de radar apresentados na Figura 18 foram obtidos a partir do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) de cada Setor avaliado e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal das respostas dos biomarcadores no coral da espécie *Mussismilia harttii* e do hidrocoral da espécie *Millepora alcicornis* coletados no Setor Abrolhos do Ambiente Marinho, bem como a contribuição destes para a composição do índice.

De modo geral, todos os biomarcadores analisados apresentaram valores altos de contribuição para a composição do IBR Biomarcador em todas as estações amostrais avaliadas e em todas as Campanhas realizadas, à exceção da LPO nas Campanhas 3 e 4. Nestes casos, este biomarcador não apresentou uma grande contribuição para a composição do índice. Estes resultados demonstram claramente que os mecanismos responsáveis pela calcificação dos corais estão comprometidos, bem como evidenciam a ocorrência de danos oxidativos nos componentes das membranas celulares desses organismos, tornando-os mais suscetíveis aos efeitos negativos de patógenos e de condições ambientais adversas.

Figura 19: Valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de plâncton de Abrolhos (fitoplâncton e zooplâncton) coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]. As linhas verticais em preto representam o desvio padrão.



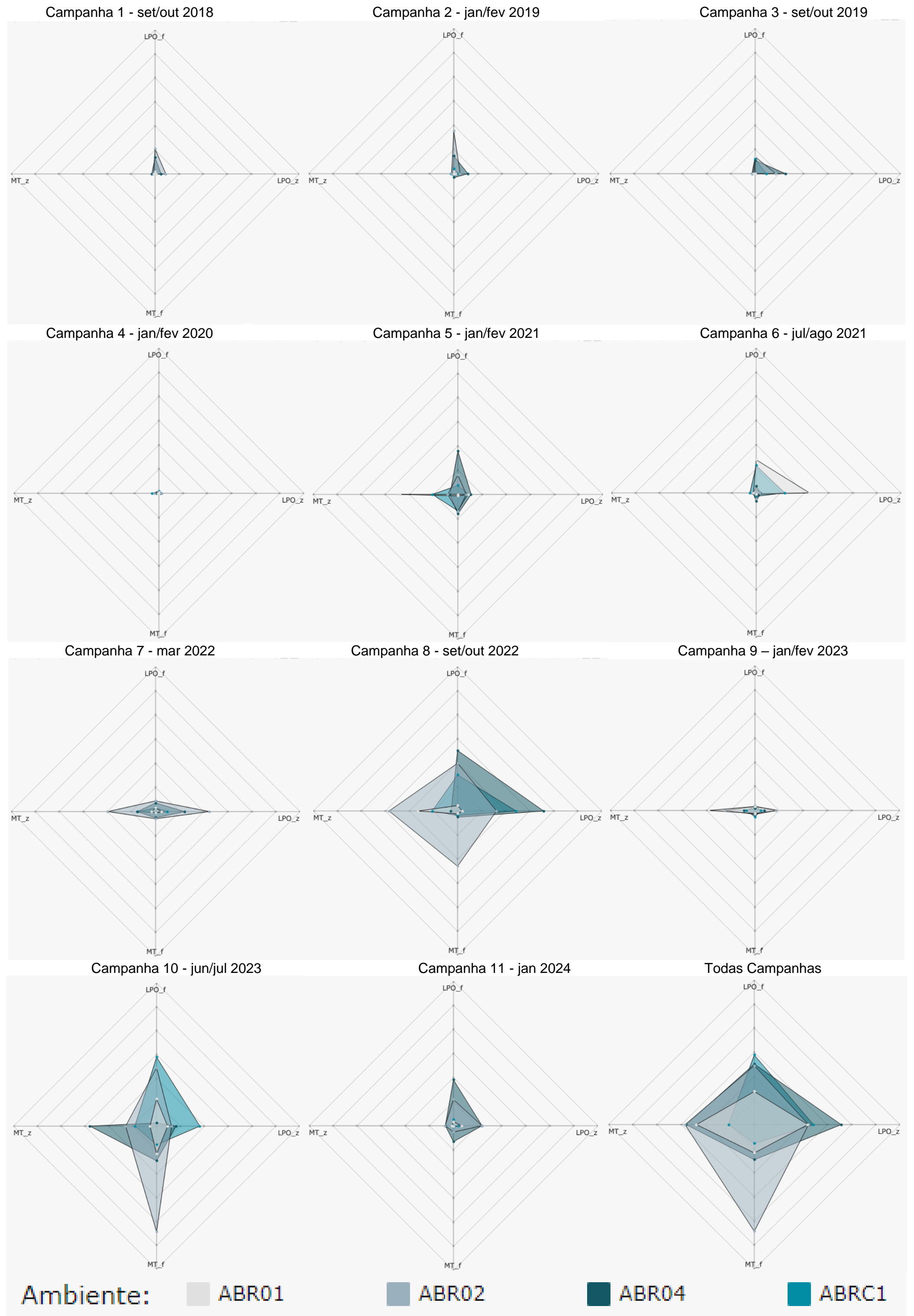
O gráfico de barras dos valores do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador), gerado para cada Setor avaliado e cada Campanha realizada, permite identificar tendências espaço-temporais dos efeitos das respostas dos biomarcadores no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) coletado no Setor Abrolhos do Ambiente Marinho, ao longo de todo o monitoramento.

De uma maneira geral, pode-se observar na Figura 19 que, no decorrer do monitoramento, houve uma tendência de aumento do valor do IBR Biomarcador em todas as estações amostrais avaliadas. Além disso, denota-se que os menores valores deste índice estão concentrados nas primeiras Campanhas (Campanhas 1 a 4). A partir da Campanha 5, os valores do IBR Biomarcador apresentaram uma tendência de aumento, com destaque para as Campanhas 8 e 10, as quais apresentaram os maiores valores do índice. As estações amostrais ABR02 e ABR04 foram aquelas que apresentaram os maiores valores do IBR Biomarcador na maior parte do período de monitoramento. Na Campanha 11, os valores deste índice diminuíram em relação àqueles observados na Campanha 10, em todas as estações amostrais avaliadas.

A comparação do gráfico do IBR Biomarcador (Figura 19) com aquele do IBR Bioacumulação (Figura 9) permite identificar uma notável interferência da bioacumulação de metais e As na saúde do plâncton coletado na região de Abrolhos. Vale lembrar que o plâncton faz parte da base da cadeia alimentar, onde o fitoplâncton é produtor primário e o zooplâncton é o consumidor primário. Portanto, as consequências de impactos diretos nesses organismos podem desencadear alterações ecológicas indiretas na cadeia trófica, como por exemplo, magnificação de metais nos indivíduos de níveis tróficos superiores, efeito bottom-up e alterações na comunidade aquática.



Figura 20: Gráficos de radar obtidos a partir dos valores médios do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) determinados para amostras de plâncton de Abrolhos [fitoplâncton (\_f) e zooplâncton(\_z)] coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). A ausência do monitoramento em ago/set 2020 – período seco, entre as Campanhas 4 e 5, foi devida a pandemia da COVID-19. Os biomarcadores considerados foram: lipoperoxidação (LPO); e concentração de metalotioneínas (MT). Classificação por Setor e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)].



Os gráficos de radar apresentados na Figura 20 foram obtidos a partir do Índice de Resposta Biológica (IBR Biomarcador) de cada Setor avaliado e de cada Campanha realizada. Estes gráficos mostram a variação espaço-temporal das respostas dos biomarcadores no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) coletados no Setor Abrolhos, bem como a contribuição destes para a composição do índice.

As Campanhas que apresentaram os maiores valores de IBR Biomarcador, ao longo de todo o monitoramento, foram as Campanhas 8 e 10. Na maior parte das Campanhas, houve a participação de todos os biomarcadores na composição do IBR Biomarcador. As exceções foram as Campanhas 1, 3 e 4, nas quais os valores do índice se associaram aos biomarcadores LPO no fitoplâncton, LPO no zooplâncton e MT no zooplâncton e, portanto, sem a contribuição da MT no fitoplâncton.

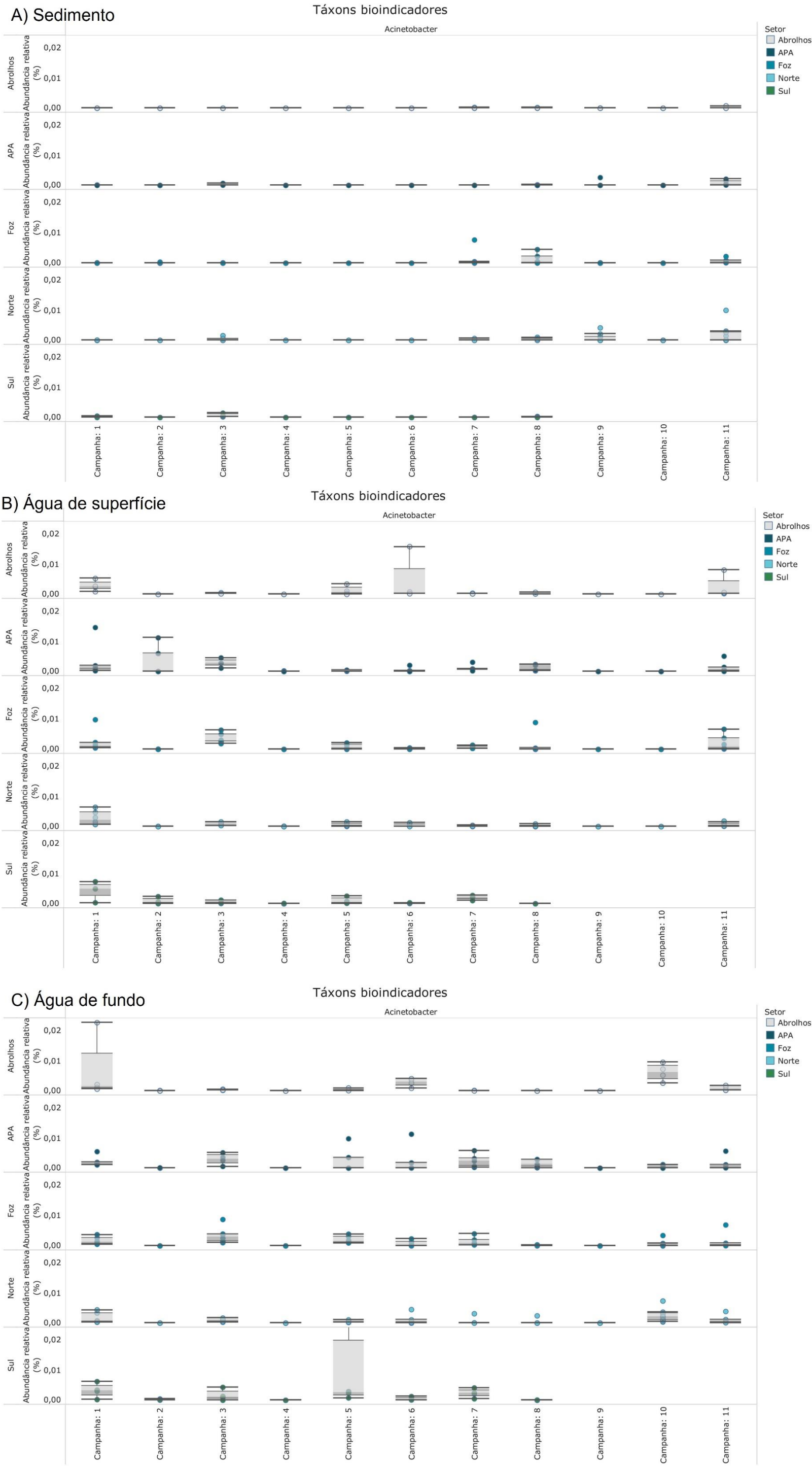
A Campanha 8 se destacou por apresentar os maiores valores do IBR Biomarcador nas estações amostrais ABR02 e ABR04, em todo o período do monitoramento. A estação amostral ABR02 apresentou o maior valor do IBR Biomarcador, sendo que todos os biomarcadores apresentaram uma contribuição relevante na composição do índice. Nesta estação amostral, foi possível observar picos de valores dos biomarcadores MT no fitoplâncton e MT no zooplâncton. Por sua vez, os valores do IBR Biomarcador nas estações amostrais ABR04 e ABRC1 contaram com a contribuição de todos os biomarcadores, sendo mais relevantes as da LPO no fitoplâncton e zooplâncton. Na estação amostral ABR01, o biomarcador mais importante para a composição do IBR Biomarcador foi a MT no zooplâncton, embora outros biomarcadores também tenham contribuído de forma menos expressiva na composição do índice.

Com relação à Campanha 10, os maiores valores de IBR Biomarcador foram observados nas estações amostrais ABR02 e ABRC1. Para todas as estações amostrais, os valores do IBR Biomarcador se associaram aos quatro biomarcadores analisados. Porém, o que diferiu entre elas foram os biomarcadores que mais contribuíram para a composição dos valores do índice nas diferentes estações amostrais. Na estação amostral ABR02, a MT no zooplâncton foi o biomarcador que apresentou o maior valor de contribuição para o IBR Biomarcador. Por sua vez, o biomarcador que mais contribuiu para a composição do valor do índice na estação amostral ABRC1 foi a LPO no fitoplâncton. Já na estação amostral ABR04, a MT no zooplâncton foi o biomarcador que mais contribuiu na composição do índice. Por fim, a estação amostral ABR01 teve o valor do seu índice associado à LPO e MT no fitoplâncton.

A indução da atividade de MT no plâncton está associada à síntese de proteínas pelos organismos expostos aos metais e ao As, visando sua proteção contra os efeitos negativos destes contaminantes. Por sua vez, o aumento da LPO no plâncton indica estresse oxidativo nos organismos em decorrência da contaminação ambiental por metais e As. Assim, foi possível fazer uma associação entre o estresse fisiológico observado e a bioacumulação de metais e As no plâncton marinho. Além disso, foi observado que, no início do monitoramento, o estresse fisiológico e a indução das respostas dos biomarcadores estiveram mais relacionadas ao fitoplâncton. Por sua vez, a importância dos biomarcadores relacionados ao zooplâncton passou a ser mais destacada a partir da Campanha 5, demonstrando assim um efeito mais crônico da contaminação ambiental a que estes organismos estão sujeitos no ambiente marinho.

3.3 DIVERSIDADE MICROBIANA

Figura 21: Abundância relativa do táxon *Acinetobacter*, bioindicador microbiano da contaminação por metal, mensurada nas amostras de sedimento (A), água de superfície (B) e água de fundo (C) do Oceano e de Abrolhos, coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]; Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



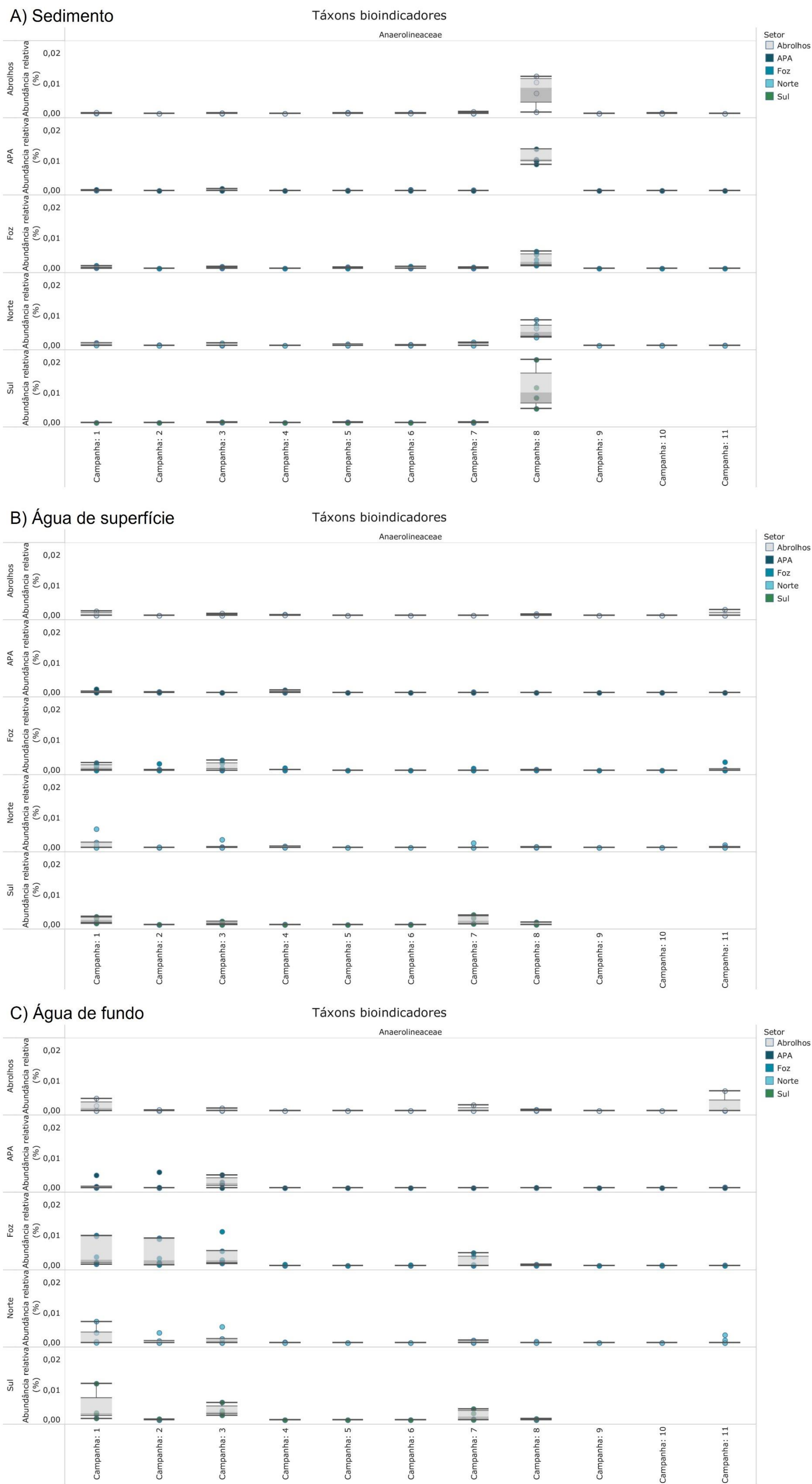
Na Figura 21, pode ser observado que a presença de *Acinetobacter* no sedimento marinho parece mostrar uma tendência de estabilidade na sua abundância relativa, mantendo-se abaixo de 0,002%. Exceções a essa tendência são observadas no Setor Foz e Setor Norte durante as Campanhas 7 a 9, onde foram registrados valores de aproximadamente 0,004%. É importante destacar que o gênero *Acinetobacter* é conhecido por sua resistência a altas concentrações de metais pesados e óleo (Méndez et al., 2017), tornando sua detecção no sedimento um sinal de contaminação ambiental. Na região de Abrolhos, observa-se que os níveis deste gênero se mantiveram baixos e estáveis, sem oscilações significativas. Embora *Acinetobacter* seja considerada um excelente bioindicador na superfície, seu crescimento em regiões mais profundas e com temperaturas mais baixas pode ser inibido, pois apesar de sua ampla faixa de tolerância térmica, *Acinetobacter* geralmente prospera em ambientes com temperaturas entre 20 e 44°C (Wisplinghoff, 2017).

Na água de superfície, *Acinetobacter* apresentou valores de abundância relativa mais elevados nas Campanhas de 1 a 3. Portanto, é possível observar com mais clareza as tendências que surgem com valores mais altos nessas Campanhas iniciais, os quais tendem a diminuir subsequentemente até a Campanha 10. A Campanha 11 foi uma exceção a esse padrão, demonstrando valores acima de 0,005% nos setores Abrolhos, APA e Foz. Além disso, nos Setores APA e Abrolhos foram registrados valores elevados nas Campanhas 2 e 6, com 0,011% e 0,015%, respectivamente. Da Campanha 7 em diante, parece haver uma estabilização com valores abaixo de 0,005%, em todas as regiões.

Na água de fundo, assim como no sedimento, os valores de abundância relativa foram baixos e constantes, não ultrapassando, em sua maioria, 0,01%. Cabe ressaltar que a questão relativa à temperatura em profundidade marinha pode ter afetado esse bioindicador (Wisplinghoff, 2017). As exceções foram observadas no Setor Abrolhos, que apresentou valores acima de 0,02% na Campanha 1, e no Setor Sul, onde o valor de abundância de *Acinetobacter* foi superior a 0,03% na Campanha 5.



Figura 22: Abundância relativa do táxon Anaerolineaceae, bioindicador microbiano da contaminação por metal, mensurada nas amostras de sedimento (A), água de superfície (B) e água de fundo (C) do Oceano e de Abrolhos, coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]; Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



O táxon Anaerolineaceae é caracterizado por microrganismos fermentadores anaeróbios, os quais são altamente dependentes de compostos inorgânicos, podendo servir como um indicador sensível de contaminação por metais (Chung et al., 2019). Assim, sua detecção, mesmo em quantidades mínimas, pode representar um alerta ambiental de grande relevância. Este fenômeno é particularmente significativo ao considerar o sedimento encontrado na região marinha adjacente à costa brasileira, onde os metais têm a capacidade de se depositar e persistir por longos períodos.

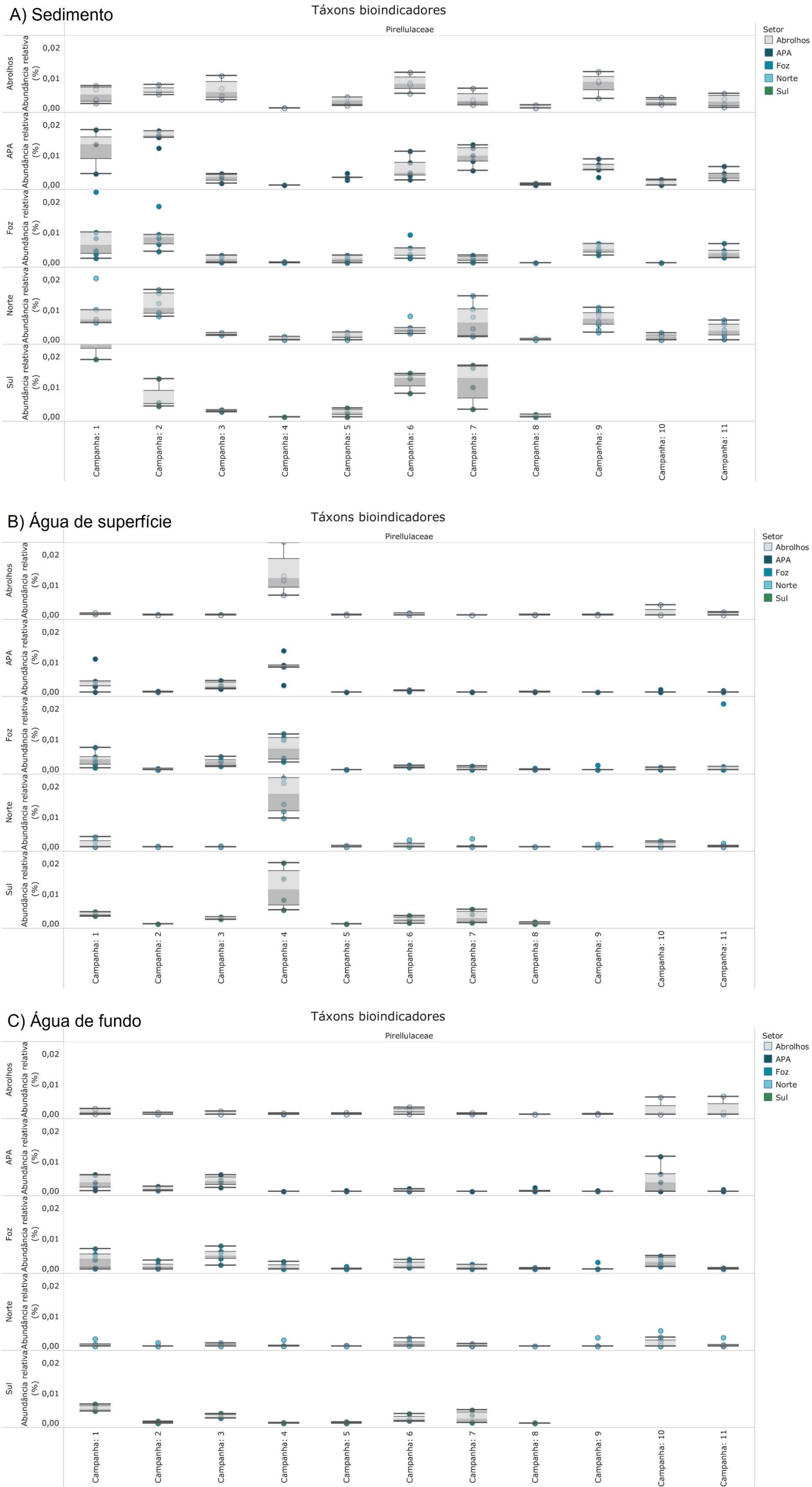
A Figura 22 mostra que a família Anaerolineaceae foi identificada no sedimento de todas as regiões amostradas, com destaque para a Campanha 8 no Setor Sul, onde os valores ultrapassaram 0,02%. Notavelmente, a Campanha 8 coincidiu com um período seco, e algum evento sazonal parece ter promovido o aumento da abundância relativa deste táxon durante esse período de amostragem. Nas demais Campanhas, observa-se uma tendência de estabilização. Fernandes et al. (2022) já haviam relacionado a presença de Anaerolineaceae aos sedimentos do Rio Doce e ao rompimento da barragem de Fundão, especialmente nos primeiros 3 anos após a ocorrência do evento.

Na água de superfície, a presença de Anaerolineaceae se destacou especialmente nas Campanhas de 1 a 4, com os valores mais elevados (0,004%) tendo sido registrados nas Campanhas 1 e 3. Após a Campanha 4, foi observada uma tendência de estabilização, exceto no Setor Sul. Neste caso, durante a Campanha 7, foram registrados valores de abundância relativa de aproximadamente 0,004%, o que representa um alto valor, observado apenas nesta região. Nos outros Setores, durante as Campanhas 5 a 11, os valores não ultrapassam 0,002%.

Na água de fundo, em todas as regiões, e não apenas o Setor Sul, foram inicialmente observados valores elevados do táxon Anaerolineaceae e, assim como na água superfície, foi observada uma tendência de estabilização, com valores de abundância relativa inferiores a 0,005%. Porém, houveram exceções, como na Campanha 7 onde observou-se elevada abundância relativa de Anaerolineaceae nos Setores Foz e Sul, e na Campanha 11 que apresentou valores mais altos no Setor de Abrolhos, sendo estes superiores a 0,006%.



Figura 23: Abundância relativa do táxon *Pirellulaceae*, bioindicador microbiano da contaminação por metal, mensurada nas amostras de sedimento (A), água de superfície (B) e água de fundo (C) do Oceano e de Abrolhos, coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]; Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].

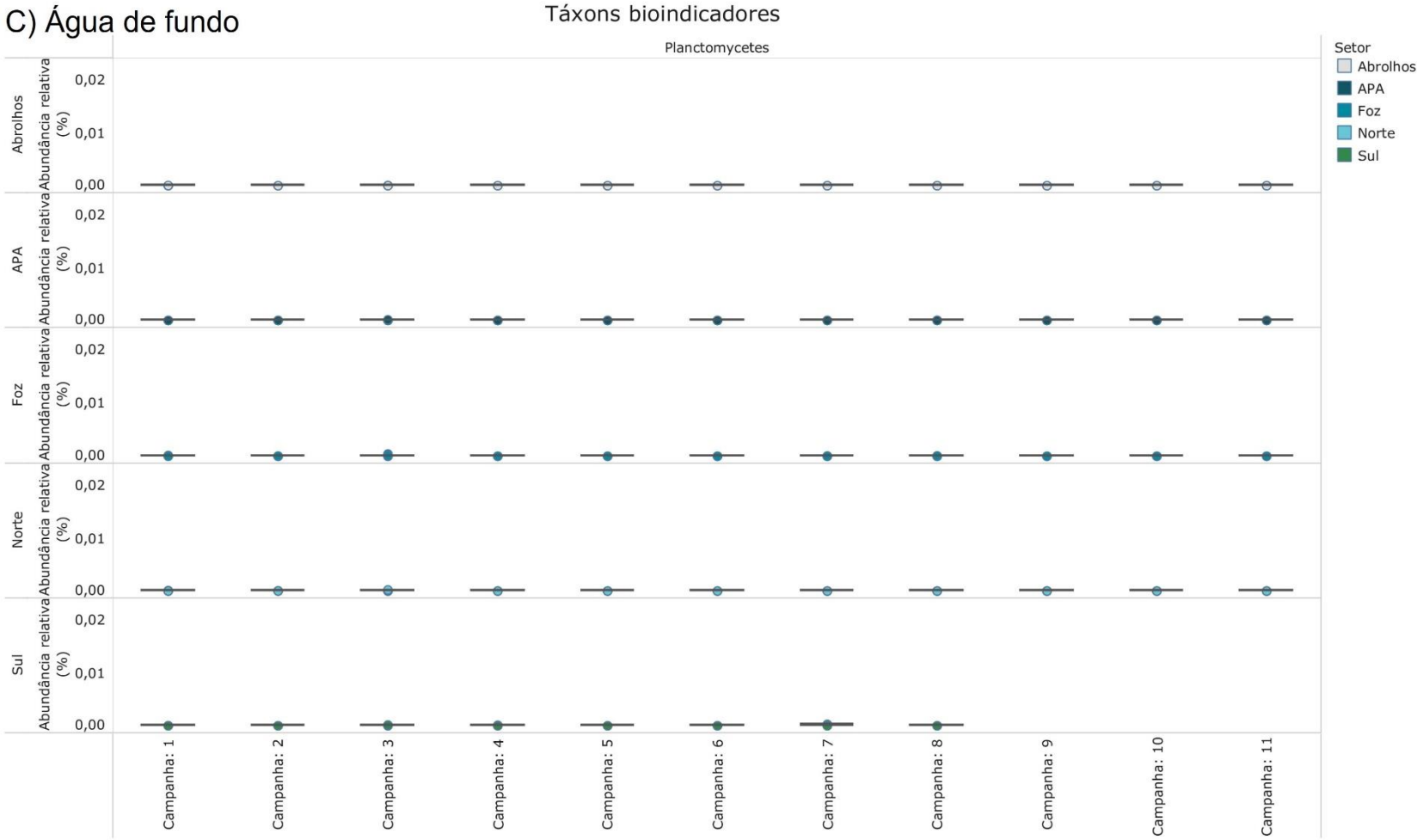
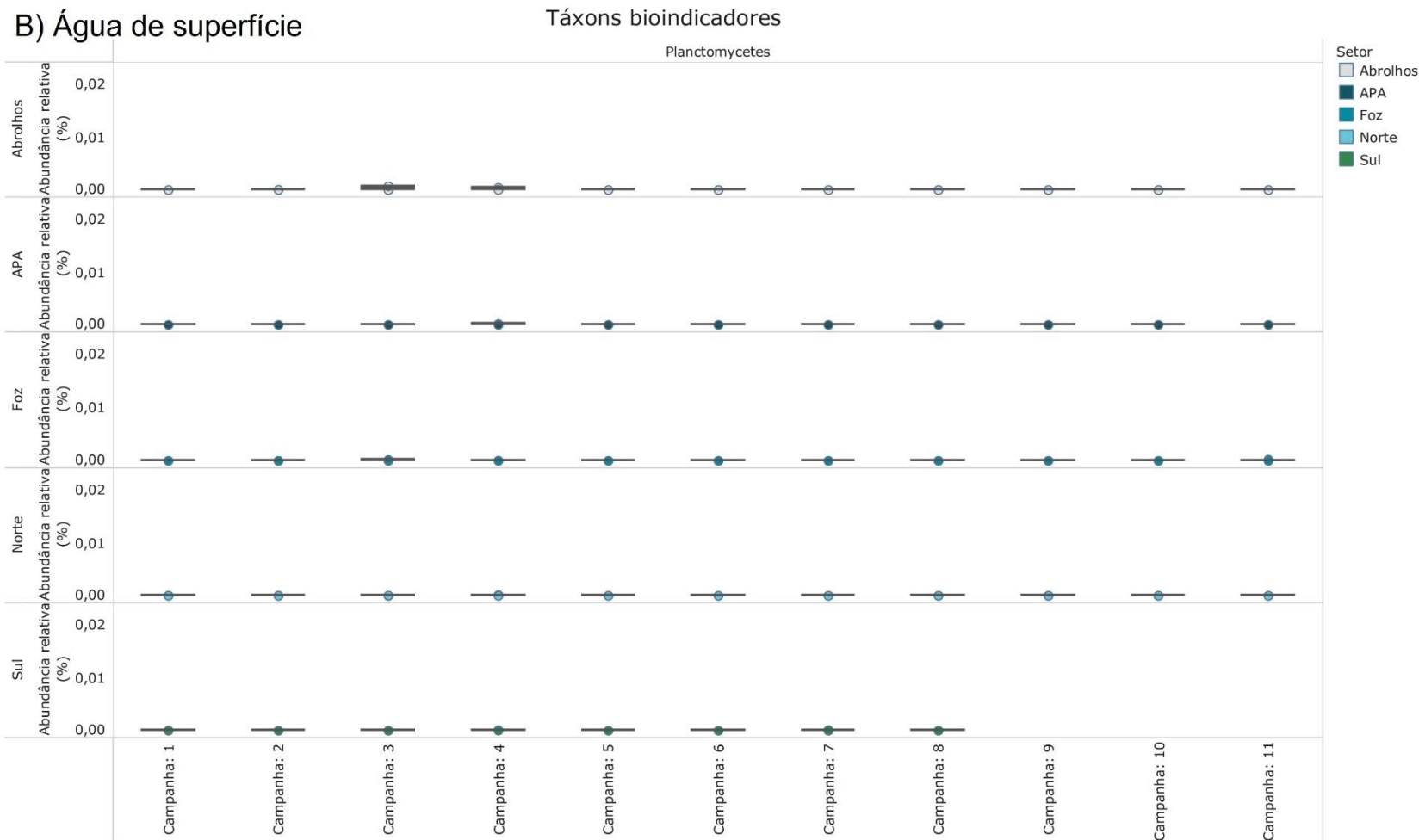
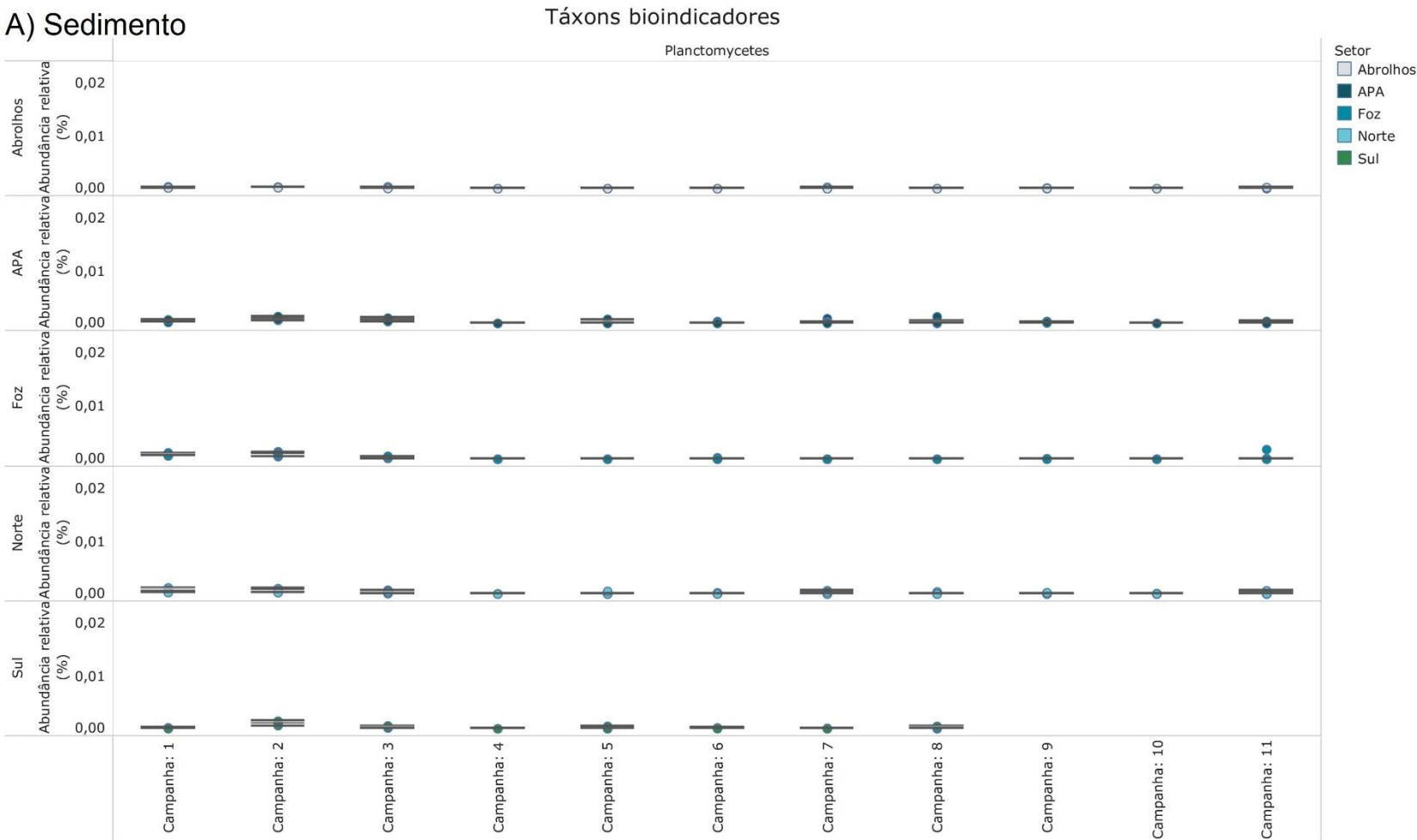


A Figura 23 mostra que a abundância da família Pirellulaceae no sedimento da região marinha adjacente ao Rio Doce apresentou valores oscilantes desde a Campanha 1, sendo maiores que 0,03% nos picos mais altos e menores que 0,01% nos pontos mais basais, considerando-se todos os Setores avaliados. Gêneros pertencentes à família Pirellulaceae, como *Rhodopirellula*, foram observados nos primeiros 3 anos de monitoramento, tendo este gênero sido amplamente associado ao rompimento da barragem de Fundão (Fernandes et al., 2022), bem como a resíduos de contaminação por metais, devido aos seus mecanismos de tolerância a estes elementos (Yan et al., 2020). O perfil de oscilação deste táxon no sedimento está, possivelmente, associado a eventos sazonais e a entrada de água e sedimento do Rio Doce na região marinha adjacente. Esse indício é corroborado por estudos que também correlacionaram Pirellulaceae com resíduos de mineração, especialmente em contaminação por altos níveis de Mn (Sjöberg et al., 2020).

Na água de superfície, a abundância relativa de Pirellulaceae variou menos do que no sedimento, mantendo níveis baixos em todos os Setores avaliados (<0,01%). Exceção foi observada na Campanha 4, na qual a abundância relativa foi mais alta do que nas demais Campanhas, com valores entre 0,01 e 0,03%. Considerando que Pirellulaceae está mais intimamente associada ao sedimento e aos resíduos minerais, é esperado que os níveis de sua abundância relativa na água de superfície sejam inferiores. No entanto, mesmo quando pequenos valores surgem na água em movimento, isso pode representar um importante alerta ambiental. De fato, estudos anteriores já demonstraram que táxons como Pirellulaceae podem estar associados à mudança no microbioma pela entrada de metais no ecossistema (Chen et al., 2018).

Conforme esperado, na água de fundo, foi observado que a abundância relativa de Pirellulaceae foi mais semelhante à do sedimento do que da água de superfície, com tendência de oscilação entre 0,001 e 0,01%, aproximadamente. Este táxon parece estar mais intimamente conectado ao sedimento, tanto marinho quanto proveniente do Rio Doce, do que à água e às correntes marinhas. Vale destacar que, nesta matriz, foi observada alta abundância relativa de Pirellulaceae na região de Abrolhos nas Campanhas 10 e 11, sendo 0,005% e 0,006% respectivamente.

Figura 24: Abundância relativa do táxon Planctomycetes, bioindicador microbiano da contaminação por metal, mensurada nas amostras de sedimento (A), água de superfície (B) e água de fundo (C) do Oceano e de Abrolhos, coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)]; Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1), Costa das Algas 2 (CA2), Costa das Algas 3 (CA3), Costa das Algas 4 (CA4) e Costa das Algas 5 (CA5)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1), Foz do Rio Doce 3 (FRD3), Foz do Rio Doce 6 (FRD6), Foz do Rio Doce 8 (FRD8), Foz do Rio Doce 9 (FRD9) e Foz do Rio Doce 10 (FRD10)]; Norte [Barra Nova 1 (BN1), Barra Nova 2 (BN2), Barra Seca 1 (BS1– a partir da Campanha 9), Barra Seca 2 (BS2 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 1 (CB1 – a partir da Campanha 9), Conceição da Barra 2 (CB2 – a partir da Campanha 9), Degredo 1 (DEG1), Degredo 2 (DEG2), Itaúnas 1 (ITA1) e Itaúnas 2 (ITA2)]; e Sul [Guarapari 1 (GUA1 - da Campanha 1 à 8), Guarapari 2 (GUA2 - da Campanha 1 à 8), Vitória 1 (VIX1 - da Campanha 1 à 8) e Vitória 2 (VIX2 - da Campanha 1 à 8)].



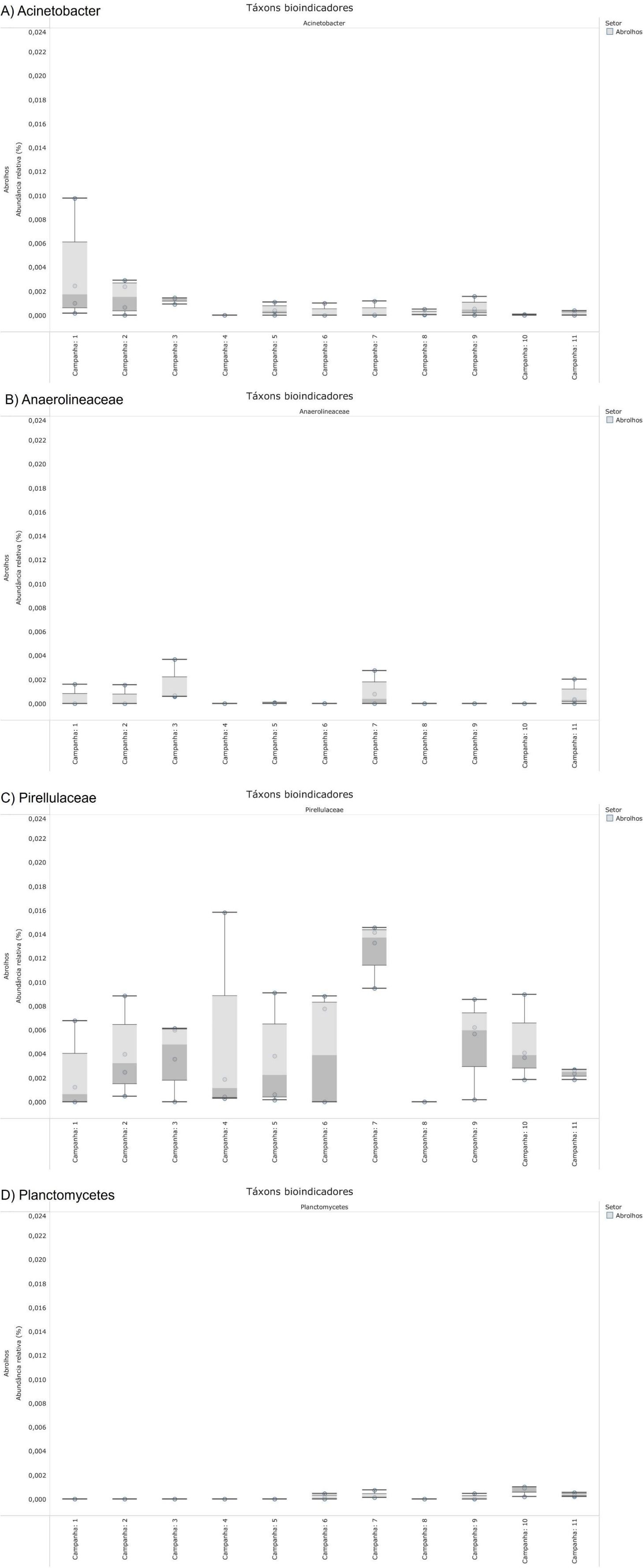
Com relação ao táxon Planctomycetes, a Figura 24 mostra que houve uma tendência mais robusta de altos níveis de sua abundância relativa nas amostras de sedimento coletadas entre as Campanhas 1 e 3 (entre 0,0001 e 0,001%), seguida por uma tendência de redução, embora não completamente constante, nas amostras coletadas até a Campanha 11. O Setor Foz apresentou resultados mais uniformes, com uma tendência de declínio a partir da Campanha 4. Cabe ressaltar que Planctomycetes estão relacionados à toxicidade de metais (Lage et al., 2012). Assim, os altos valores na abundância relativa observadas para este táxon podem indicar contaminação por metais.

A água de superfície apresentou menores valores de abundância relativa de Planctomycetes do que o sedimento. Os maiores valores de abundância relativa foram registrados na Campanha 3 e na Campanha 4, sem ultrapassar 0,0007%. Planctomycetes é um filo amplo e, ao contrário de outros indicadores, pode apresentar uma variação menos pronunciada devido à sua abrangência taxonômica. Planctomycetes está frequentemente associado ao microbioma marinho e está correlacionado com algas (Pizzetti et al., 2011), bem como com mudanças na comunidade influenciadas pela contaminação por metais (Huang et al., 2021). Portanto, mesmo com valores menos proeminentes, picos repentinos de abundância relativa deste bioindicador não devem ser negligenciados.

Na água de fundo, os microorganismos do táxon Planctomycetes foram observados com maior abundância relativa do que na água de superfície. Os Setores Abrolhos, APA e Norte apresentaram os menores valores (<0,0001%), sendo que a tendência foi se manter em níveis basais. Os Setores Foz e Sul apresentaram abundâncias relativas mais proeminentes, com valores acima de 0,0002% no Sul, por exemplo. Por sua vez, o Setor Foz apresentou valores próximos de 0,0002% nas Campanhas 1 e 3. Com exceção do Setor Sul, que apresentou maior oscilação na abundância relativa, todos os demais Setores apresentaram valores de aproximadamente 0,0001%. Como a água de fundo é mais influenciada pelo sedimento, é mais provável que esse resultado esteja relacionado com a presença de metais, já que o filo Planctomycetes tem correlação com a presença de depósitos destes elementos no ambiente marinho (Storesund & Øvreås, 2013).



Figura 25: Abundância relativa dos táxons *Acinetobacter* (A), *Anaerolineaceae* (B), *Pirellulaceae* (C) e *Planctomycetes* (D) bioindicadores microbianos da contaminação por metal, mensurada nas amostras do coral da espécie *Mussismilia hartii* de Abrolhos, coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)].



A Figura 25 mostra o perfil microbiológico encontrado no coral *Mussismilia harttii*. A influência do rompimento da barragem de Fundão pode ser inferida pelos dados do biomarcador *Acinetobacter* no coral *M. harttii*, onde nas Campanhas 1 e 2 foram observados os maiores valores de abundância relativa (0,009 e 0,003%, respectivamente). Posteriormente, observa-se uma diminuição gradual e valores inferiores até a Campanha 11. Esses achados são consistentes, uma vez que a contaminação por metais e As ocorrida após o rompimento da barragem favoreceu a proliferação de bactérias que possuem genes de resistência, como *Acinetobacter* (Ghaima et al., 2018), capazes de desempenhar um papel importante na mitigação destes compostos em ambientes contaminados.

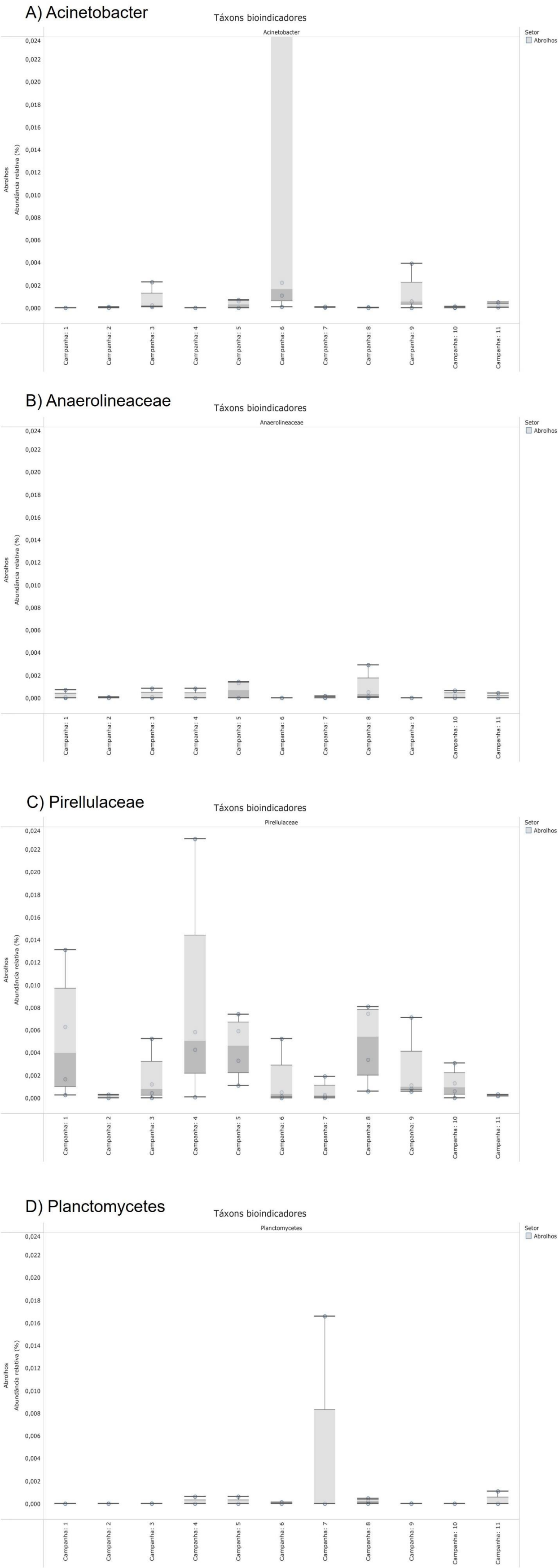
A abundância de Anaerolineaceae no coral *M. harttii* foi mais expressiva nos anos 1 e 2 do monitoramento, alcançando seu valor máximo na Campanha 3 (0,0036%), com a ocorrência de apenas dois picos nos anos seguintes, mais especificamente nas Campanhas 7 e 11, atingindo 0,0027% e 0,0020% respectivamente. O aumento da abundância relativa de Anaerolineaceae no coral *M. harttii* parece ter sido diretamente influenciado pelo rompimento da barragem, o que é corroborado pela presença desta família em ambientes contaminados por metais, especialmente Cu (Zárate et al., 2021).

A abundância relativa de Pirellulaceae no coral *M. harttii* foi elevada, mas sem demonstrar um padrão sazonal, embora tenha sido observado um pico na Campanha 4 (0,015%) e uma redução na Campanha 8. De fato, o táxon Pirellulaceae apresentou a maior abundância relativa ao longo de todas as Campanhas tanto no coral *M. harttii* (Figura 25) como no hidrocoral *Millepora alcicornis* (Figura 26). Além disso, embora tenha ocorrido uma diminuição em alguns períodos, seus valores de abundância relativa permaneceram acima de 0,002% durante todo o período de monitoramento. Esta família já foi identificada em áreas contaminadas por resíduos de mineração (Fernandes et al., 2018; Böhmer et al., 2020), sugerindo que a sua presença e abundância podem estar diretamente associadas à contaminação proveniente do rompimento da barragem de Fundão.

Durante os 2 primeiros anos de monitoramento, não foram detectados valores de abundância relativa de Planctomycetes no coral *M. harttii*. Um aumento gradual na presença desse bioindicador somente foi observado a partir da Campanha 6, atingindo um pico de abundância relativa na Campanha 10 (0,0010%). Planctomycetes é um filo comumente encontrado na microbiota saudável do coral *M. harttii* (de Castro et al. 2013). No entanto, este microorganismo também está presente em diversos ambientes contaminados por Hg, Mn e Zn (Beattie et al., 2018; Frossard et al., 2018). Os baixos níveis de abundância relativa de Planctomycetes tanto no coral *M. harttii* (Figura 25) como no hidrocoral *M. alcicornis* (Figura 26), bem como o aumento progressivo da sua presença no coral *M. harttii* a partir do ano 3 do monitoramento, sugerem uma possível supressão inicial do crescimento deste filo, com uma adaptabilidade tardia da microbiota destes corais após o rompimento da barragem.



Figura 26: Abundância relativa dos táxons *Acinetobacter* (A), *Anaerolineaceae* (B), *Pirellulaceae* (C) e *Planctomycetes* (D) bioindicadores microbianos da contaminação por metal, mensurada nas amostras do hidrocoral da espécie *Millepora alcicornis* de Abrolhos, coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco ), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Classificação por Setores e por Estações de coleta: Abrolhos [Abrolhos Controle 1 (ABRC1), Abrolhos 1 (ABR01), Abrolhos 2 (ABR02) e Abrolhos 4 (ABR04)].



A Figura 26 mostra o perfil microbiológico encontrado no hidrocoral *Millepora alcicornis*. É possível observar que, no decorrer do período de monitoramento, a abundância relativa do gênero *Acinetobacter* no hidrocoral *M. alcicornis* permaneceu baixa, tendo sido observado um pequeno aumento nas Campanhas 3, 5 e 9 e 11 (0,0005% a 0,004%). No entanto, destaca-se que foi observado um pico na abundância relativa deste gênero (0,06%) na Campanha 6 (período seco). Vale lembrar que *Acinetobacter* é um gênero de vasto potencial metabólico que está normalmente presente no microbioma do hidrocoral *M. alcicornis* (Vilela et al., 2021). Ainda que sua resistência a metais correlacione o biomarcador *Acinetobacter* com a presença destes elementos no ambiente, observando sua abundância relativa no hidrocoral *M. alcicornis* não foi possível determinar um padrão (Figura 26), em contraste com os dados obtidos para o coral *M. harttii* (Figura 25).

Os dados de abundância relativa de Anaerolineaceae no hidrocoral *M. alcicornis* indicaram que os maiores valores ocorreram durante o ano 3 (0,0014%) e o ano 4 (0,0029%) do monitoramento. Ainda que tenha sido possível observar oscilações nos níveis de abundância relativa deste táxon, não parece haver um padrão de sazonalidade. Da mesma forma, a influência do rompimento da barragem parece ter sido mais pronunciada no microbioma do coral *M. harttii* do que no microbioma do hidrocoral *M. alcicornis*.

Com relação aos dados de abundância relativa da família Pirellulaceae no hidrocoral *M. alcicornis*, embora não tenha sido possível observar um padrão sazonal, os maiores valores foram registrados na Campanha 1 (0,013%) e na Campanha 4 (0,022%). Cabe destacar que este biomarcador está normalmente presente no microbioma de corais, atuando em conjunto com outros microrganismos em processos metabólicos como a oxidação de amônia, essencial para a ciclagem de nitrogênio (Marchioro et al., 2020; Kellogg et al., 2019).

A abundância relativa de Planctomycetes no hidrocoral *M. alcicornis* foi geralmente baixa, em todas as Campanhas do monitoramento, com exceção da Campanha 7 (período chuvoso). Neste caso, foi observada uma abundância relativa de 0,017%. Apesar de ser um aumento discreto, uma tendência de maior abundância de Planctomycetes nos períodos chuvosos parece ocorrer. Vale lembrar que as chuvas estão associadas à ressuspensão de sedimentos depositados após o rompimento da barragem, o que, potencialmente, pode ter contribuído para o aumento da abundância relativa de Planctomycetes durante os períodos chuvosos.

### 3.4 ÍNDICE DE TOXICIDADE

Figura 27: Classificação e valores da toxicidade das amostras de água e sedimento coletadas durante a Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso), Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 8 (set/out 2022 – período seco), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso), Campanha 10 (jun/jul 2023 - período seco) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). As amostras foram classificadas de acordo com o índice de toxicidade, expresso numericamente em cada célula, e seguindo um padrão de cores como: Verde - Não tóxico [NT ( $\leq 1$  ou Não Estimável (NE))]; Amarelo - Levemente tóxico [LT (2-25)]; Laranja - Moderadamente tóxico [MT (26-50)]; Vermelho -Tóxico [T (51-100)]; e Cinza – “NA” = sem dados devido a ausência de coleta. Classificação por Setores e por Estações de coleta: Área de Proteção Ambiental - APA [Costa das Algas 1 (CA1); Costa das Algas 2 (CA2)]; Foz [Foz do Rio Doce 1 (FRD1); e Foz do Rio Doce 6 (FRD6)]; e Norte [Degredo 1 (DEG1 - Campanha 3)].

Estações	Matriz	Campanha 1	Campanha 2	Campanha 3	Campanha 4	Campanha 5	Campanha 6	Campanha 7	Campanha 8	Campanha 9	Campanha 10	Campanha 11
DEG1	Água	NA	NA	24	25	48	36	2	10	2	1	1
	Sedimento	NA	NA	42	40	41	59	39	49	21	1	21
FRD6	Água	48	9	9	24	30	36	1	2	2	1	2
	Sedimento	55	32	41	40	42	59	21	49	21	2	21
FRD1	Água	17	9	15	29	38	30	1	2	12	2	1
	Sedimento	33	53	40	30	33	39	20	30	22	1	21
CA1	Água	35	21	26	24	18	48	0	6	2	6	2
	Sedimento	51	50	41	40	26	78	20	22	1	2	3
CA2	Água	17	NA	NA	24	19	48	1	11	1	2	6
	Sedimento	54	38	NA	41	41	59	39	33	0	1	21
Classificação por matriz: <span style="color: green;">■</span> NT - Não tóxica <span style="color: yellow;">■</span> LT - Levemente tóxica <span style="color: orange;">■</span> MT - Moderadamente tóxica <span style="color: red;">■</span> T - Tóxica <span style="color: gray;">■</span> Sem dados												

Os ensaios de toxicidade realizados com organismos de diferentes níveis da cadeia trófica indicaram que a água e o sedimento da foz do Rio Doce e região marinha adjacente tiveram uma redução significativa na sua toxicidade. Para a água, esta redução ocorreu a partir da Campanha 7. Para o sedimento, esta redução ocorreu a partir da Campanha 9 (Figura 27). Antes disso, as matrizes estavam apresentando toxicidade moderada e alta, com destaque para as Campanhas 1, 5 e 6. De fato, as Campanhas 9, 10 e 11 apresentaram os menores valores de toxicidade, contendo apenas amostras classificadas como levemente tóxicas e não tóxicas. Porém, considerando estas últimas Campanhas, fica evitendo a influência das chuvas na toxicidade das amostras, principalmente do sedimento. De fato, foi observado um aumento da toxicidade das amostras no período chuvoso (jan/fev 2023 e jan 24/24), representado por maiores valores do índice do que aqueles observados no período seco (jun/jul 2023). Cabe destacar que os maiores valores do índice de toxicidade estiveram relacionados ao sedimento, imputando um maior efeito tóxico à essa matriz. Apesar da redução gradativa da toxicidade das matrizes ambientais nas estações monitoradas, deve-se considerar que os efeitos ecotoxicológicos medidos nos ensaios de toxicidade estão relacionadas com respostas como mortalidade, desenvolvimento e reprodução dos indivíduos testados. Portanto, efeitos ecotoxicológicos observados em outros níveis de organização biológica, como por exemplo os moleculares e bioquímicos, os quais foram medidos através de biomarcadores específicos em organismos coletados em campo, merecem atenção especial, visto que são respostas biológicas mais sensíveis.

#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO**

Os padrões de bioacumulação de contaminantes evidenciados no plâncton marinho (fitoplâncton e zooplâncton) foram identificados através da análise do Índice de Bioacumulação de metais e As (IBR Bioacumulação). Os resultados do IBR Bioacumulação mostraram que houve um aumento expressivo nos níveis de acumulação de metais e As na comunidade planctônica marinha analisada na Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso), em todos os Setores amostrais avaliados. Nesta Campanha, foi observado o maior nível de bioacumulação de metais e As para o plâncton coletado nos Setores Foz e APA, ao longo de todo o monitoramento realizado. Já no setor Norte, apesar de bastante alta na Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso), a maior bioacumulação de metais e As foi observada na Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso). Este aumento na bioacumulação destes contaminantes no plâncton indica maior grau de contaminação ambiental ou maior biodisponibilidade de metais e As no Ambiente Marinho nas últimas Campanhas de monitoramento. A análise do IBR Bioacumulação também evidenciou uma importante contribuição de contaminantes característicos do rejeito da barragem de Fundão para a composição do valor do índice. Tendo em vista o ciclo de vida relativamente curto dos organismos planctônicos, apesar de ter sido verificada uma discreta redução nos valores do IBR Bioacumulação no plâncton coletado na Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco), sugere-se que os altos níveis de metais acumulados neste grupo de organismos em comparação aos valores pretéritos à chegada dos rejeitos de mineração no Ambiente Marinho reflitam uma biodisponibilização constante destes elementos na região marinha adjacente ao Rio Doce, situação que pode ser intensificada em períodos de maior pluviosidade. Comparações entre os níveis atuais de bioacumulação e aqueles pretéritos ao rompimento da barragem de Fundão para amostras de zooplâncton coletadas em nov/2015 na região marinha mais próxima à foz do Rio Doce, antes da chegada da pluma de rejeitos (Bianchini, 2019), mostram que os níveis de Fe nos organismos de base da cadeia trófica ainda estão elevados, sendo que nas últimas Campanhas realizadas foram observados os maiores valores médios deste metal ao longo de todo monitoramento. Isto pode estar relacionado às intensas chuvas que aumentam o aporte de material do Rio Doce para o ambiente marinho. Adicionalmente, cabe ressaltar que elementos, como As, Cd, Cr, Cu, Hg e Pb, ainda são encontrados em níveis elevados no plâncton (acima dos resultados pretéritos), mesmo já decorridos 8 anos do rompimento da barragem de Fundão. No que se refere aos níveis de bioacumulação de metais e As no plâncton (fitoplâncton e zooplâncton) coletado no Setor Abrolhos, a análise do IBR Bioacumulação indicou que, de maneira geral, as Campanhas 7, 8, 9 e 11 foram aquelas que mais se destacaram por apresentarem os maiores valores deste índice, bem como a maior diversidade de contaminantes bioacumulados no plâncton marinho.

Com relação à comparação geral feita a partir da avaliação do IBR Bioacumulação em camarões marinhos, os valores deste índice indicam uma tendência de aumento temporal nos níveis de metais e As bioacumulados nestes organismos, com maiores valores do IBR Bioacumulação associados às Campanhas 7 (mar 2022 – período chuvoso), 8 (set/out 2022 – período seco) e 11 (jan 2024 – período

chuvoso), com destaque para os Setores Foz e Norte e, também para o Setor APA na Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Apesar de ter sido verificada uma discreta redução nos valores do IBR Bioacumulação na Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco), esta redução foi transitória, já que foi seguida por um novo e expressivo aumento no valor do IBR Bioacumulação. Assim, o conjunto dos resultados obtidos fornecem evidências de uma contaminação crônica, seguindo da foz do Rio Doce em direção ao Norte. Corroborando esta hipótese, vale lembrar que o IBR Bioacumulação para o plâncton indica maiores níveis de bioacumulação no Setor Norte nas últimas Campanhas de monitoramento, com pico de bioacumulação durante a Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), enquanto foram observados picos nos outros Setores na Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso). Esses resultados evidenciam o aporte contínuo de Fe e outros metais associados aos rejeitos de minério para esta região central e próxima da foz do Rio Doce, que parecem estar sob maior influência do aporte fluvial de rejeitos. Além do Fe, concentrações de Cd, Cr e Mn acima dos valores pretéritos também são ainda encontradas no músculo dos camarões coletados em praticamente todos os pontos amostrais e em todas as Campanhas realizadas. Reforçando estes achados, ao considerarmos como referência os resultados de metais e As em músculos de camarões coletados em diferentes pontos amostrais da região marinha adjacente à foz do Rio Doce entre dez/2015 e fev/2016, é nítido o aumento temporal no teor de metais nos camarões coletados e analisados no âmbito do PMBA/Fest, principalmente para o Cd e Pb em diversos pontos amostrais, bem como para o Fe e Mn na região da Foz e em pontos amostrais do setor Norte (Relatório Técnico – RT EcoConservation 065/2016). Em suma, os resultados do IBR Bioacumulação para camarões destacaram os setores Foz e Norte como sendo os mais contaminados ao longo das Campanhas do monitoramento ecotoxicológico, corroborando os resultados obtidos para o plâncton marinho.

Com relação ao padrão geral de bioacumulação de metais e As na comunidade de peixes marinhos, a análise do IBR Bioacumulação demonstrou que os valores mais altos deste índice haviam sido obtidos na Campanha 1 (set/out 2018 – período seco), com exceção do Setor Sul. Porém, na Campanha 11 (jan 2024 - período chuvoso) foram observados valores de IBR Bioacumulação que ultrapassaram todos aqueles relatados anteriormente. Assim, da Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso) até a Campanha 6 (jul/ago 2021 – período seco), o IBR Bioacumulação apresentou uma redução e tendeu a se manter em um nível mais baixo em todos os Setores avaliados. Porém, a partir da Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), foi observado um discreto aumento no valor do IBR Bioacumulação em todos os Setores avaliados. Após uma discreta redução no nível de bioacumulação de metais e As nos tecidos dos peixes marinhos observada na Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco), foram registrados, na Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso) aumentos altamente expressivos e preocupantes nos valores do IBR Bioacumulação nos três Setores avaliados no Ambiente Marinho. Vale ressaltar que os maiores valores do IBR Bioacumulação, ao longo do monitoramento, se concentraram nos Setores Foz, Norte e APA, enquanto o menor valor do IBR Bioacumulação foi observado no Setor Sul, corroborando assim os resultados obtidos para os níveis tróficos inferiores (plâncton e camarões). Assim como os camarões, os músculos dos peixes coletados ao longo das onze Campanhas realizadas no Ambiente Marinho também apresentaram concentrações elevadas de metais e As quando comparadas àquelas



observadas antes do rompimento da Barragem de Fundão. Ambas as guildas tróficas (onívoros e carnívoros) de peixes marinhos coletados no âmbito do PMBA/Fest apresentaram concentrações superiores àquelas observadas para os peixes coletados em nov/2015, antes da chegada do rejeito na foz do Rio Doce, principalmente para Cd, Cr, Cu, Fe e Mn (Bianchini, 2019).

Para os corais e hidrocorais coletados na região de Abrolhos, o IBR Bioacumulação indicou uma tendência geral de diminuição nas concentrações de metais e As nestes organismos ao longo do tempo, da Campanha 1 (set/out 2018 - período seco) até a Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso). No entanto, os corais e hidrocorais coletados nas estações amostrais ABR04 e ABRC1 durante a Campanha 10 (jun/jul 2023 – período seco) apresentaram um incremento significativo no valor do IBR Bioacumulação, indicando assim uma maior biodisponibilidade de metais e As nestas estações amostrais neste período do monitoramento. Esse padrão foi mantido na Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso), além de ter sido observado grande aumento no valor do índice para a estação amostral ABR04. De maneira geral, valores elevados do IBR Bioacumulação foram observados em todas as Campanhas realizadas, exceto na Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso) e Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso). Neste contexto, o aumento observado nos valores do IBR Bioacumulação de corais e hidrocorais nas últimas Campanhas realizadas pode ser consequência de um aumento progressivo observado nos níveis de contaminação do plâncton de Abrolhos com metais e As. De fato, foi observado que os valores do IBR Bioacumulação do plâncton de Abrolhos aumentaram a partir da Campanha 4 (jan/fev 2020 – período chuvoso), com os aumentos mais expressivos ocorrendo a partir da Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), evidenciando assim uma exposição em longo prazo (crônica) dos organismos coletados em Abrolhos.

Em relação à comparação temporal geral feita a partir da avaliação do IBR Biomarcador para o plâncton marinho, foi observado um nítido aumento na resposta biológica destes organismos a partir da Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), sugerindo, por sua vez, um efeito crônico da contaminação ambiental sobre as respostas biológicas do plâncton. Neste contexto, cabe destacar que foi observada também uma variação sazonal das respostas observadas, uma vez que os valores do IBR Biomarcador para os Setores APA e Foz apresentaram uma tendência de aumento nos valores do índice nos períodos chuvosos [Campanha 5 (jan/fev 2021 – período chuvoso), Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso) e Campanha 11 (jan 2024 – período chuvoso)], com destaque para o Setor APA, o qual apresentou os valores mais altos do IBR Biomarcador. Já nos períodos secos (Campanha 6, Campanha 8 e Campanha 10), os valores do índice tenderam a aumentar no Setor Norte, o qual, em geral, se destaca dos demais Setores por apresentar os maiores valores do IBR Bioacumulação.

Em relação à comparação temporal geral do IBR Biomarcador para os camarões marinhos, foi observado que, a partir da Campanha 3 (set/out 2019 – período seco), os valores deste índice começam a aumentar sutilmente. Na Campanha 7 (mar 2022 – período chuvoso), ocorreu um expressivo aumento no valor do IBR Bioacumulação para o Setor APA, decorrente do aumento de metalotioneínas (MTs) e

de lipoperoxidação (LPO) no hepatopâncreas dos camarões coletados neste Setor, o qual volta a diminuir na Campanha 8 (set/out 2022 – período seco). Por fim, nas Campanhas 9, 10 e 11, todos os Setores apresentaram um aumento nos valores do IBR Biomarcador, com destaque novamente para o setor APA (Campanhas 9 e 11). Estes resultados estão em concordância com o maior aporte de material proveniente do Rio Doce nestes períodos chuvosos (Campanhas 7 e 9) e corroborando com os resultados obtidos para os níveis tróficos inferiores (plâncton e camarões). Por sua vez, o valor do IBR Biomarcador para a comunidade de peixes marinhos (onívoros/herbívoros e carnívoros) tendeu a aumentar gradualmente ao longo do tempo, até a Campanha 9. Apesar disto, nas Campanhas 10 e 11, foi possível observar uma diminuição do valor deste índice. A Campanha 8 (set/out 2022 – período seco) e a Campanha 9 (jan/fev 2023 – período chuvoso) distinguem-se das demais por apresentarem os maiores valores do IBR Biomarcador, em todos os Setores avaliados, à exceção do Setor Foz na Campanha 2 (jan/fev 2019 – período chuvoso). Neste caso, foi observado um expressivo aumento no valor do IBR Biomarcador, caracterizando o Setor Foz na Campanha 2 como tendo o maior valor do índice observado ao longo de todo o período do monitoramento. Em conjunto, estes resultados sugerem que a biota marinha analisada respondeu mais intensamente a um aumento da contaminação ambiental ao longo dos anos de 2022 e 2023.

Em suma, os resultados das análises de biomarcadores demonstram que os organismos do Ambiente Marinho ainda estão sob grande estresse fisiológico. Como consequência disso, eles podem estar mais debilitados, se tornando mais vulneráveis para fatores como a predação, mudanças das variáveis abióticas e exposição a contaminantes. No caso da contaminação, ora esta ocorre pela reincidência e aumento na biodisponibilidade dos metais aqui analisados, ora por novos eventos de entrada de outras substâncias químicas no ambiente (López-Valcárcel et al., 2024; Niinemets et al., 2017). Isto pode trazer consequências negativas para o ambiente, como por exemplo perda da biodiversidade, alterações na estrutura das comunidades e populações aquáticas, bem como alterações na dinâmica e funcionalidade do ecossistema (Tovar-Sánchez et al., 2018). Além disso, vale lembrar que os metais são elementos não biodegradáveis e persistentes no ambiente, causando toxicidade à biota aquática quando se encontram biodisponíveis (Pereira et al., 2023).

Com relação a diversidade microbiológica, os resultados das análises realizadas no Ambiente Marinho demonstram manutenção dos principais grupos bacterianos observados ao longo das últimas Campanhas do monitoramento. Neste contexto, *Acinetobacter* permanece sendo observado com constância em todas as Campanhas realizadas no Ambiente Marinho. Por sua vez, os grupos Anaerolineaceae e Pirellulaceae continuam se destacando em amostras de sedimento, sendo que este último vem sendo indicado como potencial bioindicador da presença de metais em sedimento marinho. De fato, a sua presença no ambiente está fortemente associada a rejeitos de mineração e ao metabolismo associado à presença de metais pesados (Almeida et al., 2023; Sjöberg et al., 2020; Zeng et al., 2022). Os microorganismos do gênero *Acinetobacter* também demonstraram aumento na sua abundância relativa tanto na água do Rio Doce quanto nos corais de Abrolhos, na Campanha 4 (período chuvoso de 2020). Este evento foi relacionado aos altos índices de pluviosidade ocorridos à época, o que pode ter promovido a ressuspensão do sedimento do Rio Doce, afetando assim diretamente o

microbioma dos corais. Tal fato é preocupante, pois *Acinetobacter* possui alta resistência e capacidade de metabolizar metais, sendo comumente encontrada em ambientes contaminados por estes contaminantes (Akkoyun et al., 2020; Park & Chon, 2016). Neste contexto, cabe destacar que este gênero apresentou grande abundância na bacia do Rio Doce dias após o rompimento da barragem de Fundão (Reis et al., 2020).

Quanto à abundância relativa da família Pirellulaceae no sedimento da região costeira, esta tem sido caracterizada por uma variação constante ao longo das Campanhas realizadas. Gêneros pertencentes à família Pirellulaceae, foram identificados nos primeiros três anos do monitoramento, sendo que o gênero *Rhodopirellula* foi demonstrado estar associado ao rompimento da barragem (Fernandes et al., 2022). A tendência observada no sedimento, no que se refere a abundância relativa de microorganismos da família Pirellulaceae sugere um padrão de flutuação, possivelmente influenciado por eventos sazonais e pela entrada de água e sedimento provenientes do Rio Doce. Esta suposição é respaldada por outras pesquisas que também relacionam a presença de microorganismos da família Pirellulaceae com resíduos de mineração, especialmente em áreas contaminadas com elevados teores de Mn (Sjöberg et al., 2020).

As observações feitas ao longo do monitoramento corroboram a hipótese de que o Rio Doce exerce forte influência sobre a microbiota da região costeira. Esta constatação fica evidente através da similaridade observada entre grupos de amostras coletadas nos Setores Sul e Norte. Além disso, foi observado que amostras coletadas no Setor Abrolhos se agruparam com outras amostras localizadas ao Sul ou ao Norte da foz do Rio Doce, o que evidencia uma interferência sazonal do Rio Doce. De fato, foi observado que a sazonalidade desempenha um papel significativo nas oscilações dos gêneros bacterianos, abrangendo períodos de seca e chuva, juntamente com outros elementos ambientais que explicam a variabilidade em ambientes mais dinâmicos. Portanto, ao longo do monitoramento realizado, foi possível constatar a presença de bactérias características de resíduos de mineração nos corais coletados em Abrolhos e no ambiente costeiro, reforçando a persistência do impacto decorrente do rompimento da barragem e contaminação por minérios na região monitorada.

Os resultados dos ensaios de toxicidade, resumidos no Índice de Toxicidade, indicaram que houve uma tendência de redução da toxicidade da água e do sedimento a partir das Campanhas 7 e 9, respectivamente. Antes desse período de amostragem, as matrizes estavam apresentando toxicidade moderada e alta, com destaque nas Campanhas 1, 5 e 6. De fato, as Campanhas 9, 10 e 11 resultaram nos menores valores de toxicidade, contendo apenas amostras classificadas como levemente tóxicas e não tóxicas. Porém, quando se considera sobretudo as últimas Campanhas realizadas, fica evidente a influência das chuvas na toxicidade das amostras, principalmente do sedimento. De fato, foi observado um aumento da toxicidade das amostras nos últimos dois períodos chuvosos (jan/fev 2023 e jan 2024), evidenciado pelos maiores valores do índice em relação àquele observado no período seco (jun/jul 2023). Neste contexto, cabe destacar que os maiores valores do índice de toxicidade estiveram relacionados ao sedimento, imputando maior efeito tóxico dessa matriz. Apesar da redução gradual da toxicidade nas amostras coletadas nas estações monitoradas ao longo do monitoramento, é importante

destacar que os efeitos ecotoxicológicos observados através dos testes de toxicidade estão associados a respostas terminais, tais como mortalidade, desenvolvimento e reprodução dos organismos testados. Portanto, torna-se fundamental considerar os efeitos ecotoxicológicos observados em outros níveis de organização biológica, tais como aqueles detectados através das análises de biomarcadores específicos em organismos coletados no campo, uma vez que estes efeitos representam respostas biológicas mais sensíveis.

## 5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos para o Tema.

## 6 REFERÊNCIAS

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15350. (2023). *Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica de curta duração – método de ensaio com ouriço-do-mar (Echinodermata: Echinoidea)*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 15469. (2021). *Ecotoxicologia—Coleta, preservação e preparo de amostras*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

ABNT - Associação Brasileira de Normas Técnicas. NBR 16181. (2021). *Ecotoxicologia aquática – Toxicidade crônica – microalgas marinhas*. Associação Brasileira de Normas Técnicas.

Aebi, H. (1984). [13] Catalase in vitro. Em *Methods in Enzymology* (p. 121–126). Academic Press. [https://doi.org/10.1016/S0076-6879\(84\)05016-3](https://doi.org/10.1016/S0076-6879(84)05016-3)

Akkoyun, M. B., Özdemir, S., Kılınç, E., & Birhanlı, E. (2020). Investigations of Hg(II) and Pb(II) tolerance, removal and bioaccumulation and their effects on antioxidant enzymes on thermophilic *Exiguobacterium profundum*. *Human and Ecological Risk Assessment: An International Journal*, 26(5), 1234–1253. <https://doi.org/10.1080/10807039.2018.1562882>

Albarico, F. P. J. B., Chen, C.-W., Lim, Y. C., Wang, M.-H., Chuang, Y., & Dong, C.-D. (2022). Driving factors of phytoplankton trace metal concentrations and distribution along anthropogenically-impacted estuaries of southern Taiwan. *Regional Studies in Marine Science*, 56, 102610. <https://doi.org/10.1016/j.rsma.2022.102610>

Almeida, P. I. N. de, Jesus, H. E. de, Pereira, P. H. F., Vieira, C. E. D., Bianchini, A., Martins, C. D. M. G., & Santos, H. F. dos. (2023). The microbial profile of rivers and lagoons three years after the impact

of the world's largest mining disaster (Fundão dam, Brazil). *Environmental Research*, 216. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2022.114710>

Arreguin-Rebolledo, U., Castelhana Gebara, R., Valencia-Castañeda, G., Rico-Martínez, R., Frías-Espericueta, M. G., Longo, E., & Páez-Osuna, F. (2024). Toxicity of binary-metal mixtures (As, Cd, Cu, Fe, Hg, Pb and Zn) in the euryhaline rotifer *Proales similis*: Antagonistic and synergistic effects. *Marine Pollution Bulletin*, 198, 115819. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2023.115819>

Beattie, R. E., Henke, W., Campa, M. F., Hazen, T. C., McAliley, L. R., & Campbell, J. H. (2018). Variation in microbial community structure correlates with heavy-metal contamination in soils decades after mining ceased. *Soil Biology and Biochemistry*, 126, 57–63. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.08.011>

Beliaeff B., & Burgeot, T. (2002). Integrated biomarker response: A useful tool for ecological risk assessment. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 21(6), 1316– 1322. <https://doi.org/10.1002/etc.5620210629>

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(1), 25–34. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2761.1999.00134.x>

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.

Böhmer, M., Ozdín, D., Račko, M., Lichvár, M., Budiš, J., & Szemes, T. (2020). Identification of bacterial and fungal communities in the roots of orchids and surrounding soil in heavy metal contaminated area of mining heaps. *Applied Sciences*, 10(20), 7367. <https://doi.org/10.3390/app10207367>

Bradford, M. M. (1976). A rapid and sensitive method for the quantitation of microgram quantities of protein utilizing the principle of protein-dye binding. *Analytical Biochemistry*, 72(1), 248–254. [https://doi.org/10.1016/0003-2697\(76\)90527-3](https://doi.org/10.1016/0003-2697(76)90527-3)

Bulich, A. A. (1982). A practical and reliable method for monitoring the toxicity of aquatic samples. *Process Biochemistry*, 17(2), 45–47.

Cedergreen, N. (2014). Quantifying synergy: A systematic review of mixture toxicity studies within environmental toxicology. *PLOS ONE*, 9(5), e96580. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0096580>

Chen, Y., Jiang, Y., Huang, H., Mou, L., Ru, J., Zhao, J., & Xiao, S. (2018). Long-term and high-concentration heavy-metal contamination strongly influences the microbiome and functional genes in Yellow River sediments. *Science of The Total Environment*, 637–638, 1400–1412. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.109>

Chevrollier, L.-A., Koski, M., Søndergaard, J., Trapp, S., Aheto, D. W., Darpaah, G., & Nielsen, T. G. (2022). Bioaccumulation of metals in the planktonic food web in the Gulf of Guinea. *Marine Pollution Bulletin*, 179, 113662.

Childress, J. J., & Somero, G. N. (1979). Depth-related enzymic activities in muscle, brain and heart of deep-living pelagic marine teleosts. *Marine Biology*, 52(3), 273–283. <https://doi.org/10.1007/BF00398141>

Chung, A. P., Coimbra, C., Farias, P., Francisco, R., Branco, R., Simão, F. V., Gomes, E., Pereira, A., Vila, M. C., Fiúza, A., Mortensen, M. S., Sørensen, S. J., & Morais, P. V. (2019). Tailings microbial community profile and prediction of its functionality in basins of tungsten mine. *Scientific Reports*, 9(1), 19596. <https://doi.org/10.1038/s41598-019-55706-6>

de Castro, A. P., Araújo, S. D., Reis, A. M. M., Pompeu, M., Hatay, M., de Moura, R. L., Francini-Filho, R. B., Thompson, F. L., & Krüger, R. H. (2013). Bacterial communities associated with three Brazilian endemic reef corals (*Mussismilia* spp.) in a coastal reef of the Abrolhos shelf. *Continental Shelf Research*, 70, 135–139. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2013.05.009>

de Oliveira Gomes, L. E., Correa, L. B., Sá, F., Neto, R. R., & Bernardino, A. F. (2017). The impacts of the Samarco mine tailing spill on the Rio Doce estuary, eastern Brazil. *Marine Pollution Bulletin* 120, 28–36. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.04.056>

Devin, S., Burgeot, T., Giambérini, L., Minguez, L., & Pain-Devin, S. (2014). The integrated biomarker response revisited: Optimization to avoid misuse. *Environmental Science and Pollution Research*, 21(4), 2448–2454. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2169-9>

EcoConservation. Relatório Técnico - RT ECV 065/16. Monitoramento de bioacumulação (ictiofauna, carcinofauna e malacofauna) por metais, na região marinha adjacente à foz do Rio Doce e sob possível influência da lama de rejeitos oriunda do rompimento da barragem de Fundão.

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. <https://doi.org/10.1016/j.toxrep.2018.11.010>



Fernandes, C. C., Kishi, L. T., Lopes, E. M., Omori, W. P., Souza, J. A. M. de, Alves, L. M. C., & Lemos, E. G. de M. (2018). Bacterial communities in mining soils and surrounding areas under regeneration process in a former ore mine. *Brazilian Journal of Microbiology*, 49(3), 489–502. <https://doi.org/10.1016/j.bjm.2017.12.006>

Fernandes, L., Jesus, H., Almeida, P., Sandrini, J., Bianchini, A., & Santos, H. (2022). The influence of the Doce River mouth on the microbiome of nearby coastal areas three years after the Fundão Dam failure, Brazil. *Science of the Total Environment*, 807. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151777>

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia (2023). Relatório Semestral de Evolução do PMBA/Fest – RT-44, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 79 pag.

Frías-Espéricueta, M. G., Bautista-Covarrubias, J. C., Osuna-Martínez, C. C., Delgado-Alvarez, C., Bojórquez, C., Aguilar-Juárez, M., Roos-Muñoz, S., Osuna-López, I., & Páez-Osuna, F. (2022). Metals and oxidative stress in aquatic decapod crustaceans: A review with special reference to shrimp and crabs. *Aquatic Toxicology*, 242, 106024. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2021.106024>

Frossard, A., Donhauser, J., Mestrot, A., Gygax, S., Bååth, E., & Frey, B. (2018). Long- and short-term effects of mercury pollution on the soil microbiome. *Soil Biology and Biochemistry*, 120, 191–199. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2018.01.028>

Ghaima, K., Lateef, S., Khaz'al, Z. (2018). Heavy metal and antibiotic resistance of *Acinetobacter* spp. isolated from diesel fuel polluted soil. *Journal of Advanced Laboratory Research in Biology*. 58-64. 9.2.

Henry, R. P. (1991). Techniques for Measuring Carbonic Anhydrase Activity in Vitro. Em S. J. Dodgson, R. E. Tashian, G. Gros, & N. D. Carter (Orgs.), *The Carbonic Anhydrases: Cellular Physiology and Molecular Genetics* (p. 119–125). Springer US. [https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0750-9\\_8](https://doi.org/10.1007/978-1-4899-0750-9_8)

Huang, C.-C., Liang, C.-M., Yang, T.-I., Chen, J.-L., & Wang, W.-K. (2021). Shift of bacterial communities in heavy metal-contaminated agricultural land during a remediation process. *PLOS ONE*, 16(7), e0255137. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0255137>

Hussain, M. B., Laabir, M., & Daly Yahia, M. N. (2020). A novel index based on planktonic copepod reproductive traits as a tool for marine ecotoxicology studies. *Science of The Total Environment*, 727, 138621. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.138621>

Isibor, P. O., Imoobe, T. O. T., Dedeké, G. A., Adagunodo, T. A., & Taiwo, O. S. (2020). Health risk indices and zooplankton-based assessment of a tropical rainforest river contaminated with iron, lead,

cadmium, and chromium. *Scientific Reports*, 10(1), Artigo 1. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-72526-1>

Ju, Y.-R., Lo, W.-T., Chen, C.-F., Chen, C.-W., Huang, Z.-L., & Dong, C.-D. (2019). Effect of metals on zooplankton abundance and distribution in the coast of southwestern Taiwan. *Environmental Science and Pollution Research*, 26(33), 33722–33731. <https://doi.org/10.1007/s11356-018-2169-x>

Kellogg, C. A. (2019). Microbiomes of stony and soft deep-sea corals share rare core bacteria. *Microbiome*, 7(1), 90. <https://doi.org/10.1186/s40168-019-0697-3>

Lage, O. M., Bondoso, J., & Catita, J. A. M. (2012). Determination of zeta potential in Planctomycetes and its application in heavy metals toxicity assessment. *Archives of Microbiology*, 194(10), 847–855. <https://doi.org/10.1007/s00203-012-0818-x>

Lokeshappa, B., Shivpuri, K., Tripathi, V., & Dikshit, A. K. (2012). assessment of toxic metals in agricultural produce. *Food and Public Health*, 2(1), 24–29.

Lomartire, S., Marques, J. C., & Gonçalves, A. M. M. (2021). The key role of zooplankton in ecosystem services: A perspective of interaction between zooplankton and fish recruitment. *Ecological Indicators*, 129, 107867. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107867>

López-Valcárcel, M. E., del Arco, A., & Parra, G. (2024). Zooplankton vulnerability to glyphosate exacerbated by global change. *Science of The Total Environment*, 913, 169806. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169806>

Lotufo, G. R., & Abessa, D. M. S. (2002). Testes de toxicidade com sedimento total e água intersticial estuarinos utilizando copépodes bentônicos. Em I. A. Nascimento, E. C. P. M. Sousa, & M. G. Nipper (Orgs.), *Métodos em Ecotoxicologia Marinha: Aplicações no Brasil* (p. 91–92). Artes Gráficas e Indústria Ltda.

MacFarlane, G. R., Schreider, M., & McLennan, B. (2006). Biomarkers of heavy metal contamination in the red fingered marsh crab, *Parasesarma erythodactyla*. *Archives of Environmental Contamination and Toxicology*, 51(4), 584–593. <https://doi.org/10.1007/s00244-005-5067-4>

Marchioro, G. M., Glasl, B., Engelen, A. H., Serrão, E. A., Bourne, D. G., Webster, N. S., & Frade, P. R. (2020). Microbiome dynamics in the tissue and mucus of acroporid corals differ in relation to host and environmental parameters. *PeerJ*, 8, e9644. <https://doi.org/10.7717/peerj.9644>

Marklund, S., & Marklund, G. (1974). Involvement of the superoxide anion radical in the autoxidation of pyrogallol and a convenient assay for superoxide dismutase. *European Journal of Biochemistry*, 47(3), 469–474. <https://doi.org/10.1111/j.1432-1033.1974.tb03714.x>

Méndez, V., Fuentes, S., Morgante, V., Hernández, M., González, M., Moore, E., & Seeger, M. (2017). Novel hydrocarbonoclastic metal-tolerant *Acinetobacter* and *Pseudomonas* strains from Aconcagua river oil-polluted soil. *Journal of Soil Science and Plant Nutrition*, 17(4), 1074–1087. <https://doi.org/10.4067/S0718-95162017000400017>

Niinemets, Ü., Kahru, A., Mander, Ü., Nõges, P., Nõges, T., Tuvikene, A., & Vasemägi, A. (2017). Interacting environmental and chemical stresses under global change in temperate aquatic ecosystems: Stress responses, adaptation, and scaling. *Regional Environmental Change*, 17(7), 2061–2077. <https://doi.org/10.1007/s10113-017-1196-3>

OECD - Organisation for Economic Co-operation and Development. (2019). *Test No. 203: Fish, Acute Toxicity Test*. Organisation for Economic Co-operation and Development. <https://doi.org/10.1787/9789264069961-en>

Park, J. H., & Chon, H.-T. (2016). Characterization of cadmium biosorption by *Exiguobacterium* sp. isolated from farmland soil near Cu-Pb-Zn mine. *Environmental Science and Pollution Research*, 23(12), 11814–11822. <https://doi.org/10.1007/s11356-016-6335-8>

Pereira, J. G., Raikar, S. S., Bhatti, A. G., Fatarpekar, P. G., & Nasnodkar, M. R. (2023). Metal bioavailability, bioaccumulation, and toxicity assessment through sediment and edible biota from intertidal regions of the Aghanashini Estuary, India. *Marine Environmental Research*, 191, 106172. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2023.106172>

Pestana, J. L. T., Novais, S. C., Norouzitalab, P., Vandegehuchte, M. B., Bossier, P., De Schampelaere, K. A. C. (2016). Non-lethal heat shock increases tolerance to metal exposure in brine shrimp. *Environmental Research*, 151, 663-670. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2016.08.037>.

Pizzetti, I., Fuchs, B. M., Gerdts, G., Wichels, A., Wiltshire, K. H., & Amann, R. (2011). Temporal variability of coastal Planctomycetes Clades at Kabeltonne Station, North Sea. *Applied and Environmental Microbiology*, 77(14), 5009–5017. <https://doi.org/10.1128/AEM.02931-10>

Rauf, A., Javed, M., & Jabeen, G. (2019). Uptake and accumulation of heavy metals in water and planktonic biomass of the River Ravi, Pakistan. *Turkish Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 19(10), 857–864.

RRDM, Rede Rio Doce Mar (2022). Relatório Anual do PMBA/Fest-RRDM 2022 - Síntese integrativa entre ambientes. RT-39E, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito santense de Tecnologia. 150 pag.

Reis, M. P., Suhadolnik, M. L. S., Dias, M. F., Ávila, M. P., Motta, A. M., Barbosa, F. A. R., & Nascimento, A. M. A. (2020). Characterizing a riverine microbiome impacted by extreme disturbance caused by a mining sludge tsunami. *Chemosphere*, 253, 126584. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.126584>

Ribeiro, A. C., Batista, M. T. O., Rodrigues Junior, E., Oliveira, M. F. de, Vani, G. S., Rodrigues, E., & Suda, C. N. K. (2015). Atividades de lactato desidrogenase e malato desidrogenase de *Astyanax bimaculatus* (lambari) da bacia hidrográfica do rio Una como biomarcadoras de impacto ambiental. *Revista Ambiente & Água*, 10, 793–803. <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.1615>

Rocha, G. S., de Palma Lopes, L. F., de Medeiros, J. F., Montagner, C. C., & Gaeta Espíndola, E. L. (2023). Environmental concentrations of cadmium and fipronil, isolated and combined, impair the survival and reproduction of a Neotropical freshwater copepod. *Environmental Pollution*, 336, 122415. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2023.122415>

Segura, F. R., Nunes, E. A., Paniz, F. P., Paulelli, A. C. C., Rodrigues, G. B., Braga, G. U. L., Pedreira Filho, W. R., Barbosa Jr., F., Cerchiaro, G., Silva, F. F., & Batista, B. L. (2016). Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). *Environmental Pollution*, 218, 813–825. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005>

Sjöberg, S., Stairs, C. W., Allard, B., Homa, F., Martin, T., Sjöberg, V., Ettema, T. J. G., & Dupraz, C. (2020). Microbiomes in a manganese oxide producing ecosystem in the Ytterby mine, Sweden: impact on metal mobility. *FEMS Microbiology Ecology*, 96(11). <https://doi.org/10.1093/femsec/fiaa169>

Storesund, J. E., & Øvreås, L. (2013). Diversity of Planctomycetes in iron-hydroxide deposits from the Arctic Mid Ocean Ridge (AMOR) and description of *Bythopirellula goksoyri* gen. nov., sp. nov., a novel Planctomycete from deep sea iron-hydroxide deposits. *Antonie van Leeuwenhoek*, 104(4), 569–584. <https://doi.org/10.1007/s10482-013-0019-x>

Tovar-Sánchez, E., Hernández-Plata, I., SantoyoMartínez, M., Valencia-Cuevas, L., & Galante, P. M. (2018). Heavy Metal Pollution as a Biodiversity Threat. Em *Heavy Metals*. IntechOpen. <https://doi.org/10.5772/intechopen.74052>

U.S. EPA. (2007). *Method 3015A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Aqueous Samples and Extracts*. Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. (2007). *Method 3051A (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Sediments, Sludges, and Oils*, Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA (1998). *Method 6020A (SW-846): Inductively Coupled Plasma—Mass Spectrometry*. [https://19january2017snapshot.epa.gov/homeland-security-research/epa-method-6020a-sw-846-inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry\\_.html](https://19january2017snapshot.epa.gov/homeland-security-research/epa-method-6020a-sw-846-inductively-coupled-plasma-mass-spectrometry_.html)

Vajreswari, A., Rao, P. S., Kaplay, S. S., & Tulpule, P. G. (1983). Erythrocyte membrane in rats fed high erucic acid-containing mustard oil: Osmotic fragility, lipid composition, and (Na<sup>+</sup>, K<sup>+</sup>)- and (Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>)-ATPases. *Biochemical Medicine*, 29(1), 74–84. [https://doi.org/10.1016/0006-2944\(83\)90056-X](https://doi.org/10.1016/0006-2944(83)90056-X)

van Dam, J. W., Negri, A. P., Uthicke, S., & Mueller, J. F. (2011). Chemical Pollution on Coral Reefs: Exposure and Ecological Effects. Em F. Sanchez-Bayo, P. J. van den Brink, & R. M. Mann (Orgs.), *Ecological Impacts of Toxic Chemicals* (p. 187–211). Bentham Science Publishers.

Vellinger, C., Parant, M., Rousselle, P., & Usseglio-Polatera, P. (2012). Antagonistic toxicity of arsenate and cadmium in a freshwater amphipod (*Gammarus pulex*). *Ecotoxicology*, 21(7), 1817–1827. <https://doi.org/10.1007/s10646-012-0916-1>

Vilela, C.L.S., Villela, H.D.M., Rachid, C.T.C.d.C., Carmo, F.L.d., Vermelho, A.B., Peixoto, R.S. (2021). Exploring the diversity and biotechnological potential of cultured and uncultured coral-associated bacteria. *Microorganisms*. 9(11), 2235. <https://doi.org/10.3390/microorganisms9112235>

Walker, C. H., Hopkin, S. P., Sibly, R. M., & Peakall, D. B. (1996). *Principles of Ecotoxicology*. Taylor & Francis.

Wisplinghoff, H. (2017). *Pseudomonas* spp., *Acinetobacter* spp. and Miscellaneous Gram-Negative Bacilli. *Infectious Diseases, 2-Volume Set*, 1579-1599.e2. <https://doi.org/10.1016/B978-0-7020-6285-8.00181-7>

Yan, C., Wang, F., Liu, H., Liu, H., Pu, S., Lin, F., Geng, H., Ma, S., Zhang, Y., Tian, Z., Chen, H., Zhou, B., & Yuan, R. (2020). Deciphering the toxic effects of metals in gold mining area: Microbial community tolerance mechanism and change of antibiotic resistance genes. *Environmental Research*, 189, 109869. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2020.109869>

Zárate, A., Dorador, C., Valdés, J., Molina, V., Icaza, G., Pacheco, A. S., & Castillo, A. (2021). Benthic microbial diversity trends in response to heavy metals in an oxygen-deficient eutrophic bay of the Humboldt current system offshore the Atacama Desert. *Environmental Pollution*, 286, 117281. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2021.117281>

Zebral, Y. D., Righi, B. D. P., Anni, I. S. A., Escarrone, A. L. V., Roza, M., Vieira, C. E. D., Costa, P. G., & Bianchini, A. (2021). Pollution levels and biomarker responses in zooplankton from three hydrographic regions of southern Brazil: An integrated approach for water quality monitoring. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, 9(5), 106180. <https://doi.org/10.1016/j.jece.2021.106180>

Zeng, T., Wang, L., Zhang, X., Song, X., Li, J., Yang, J., Chen, S., & Zhang, J. (2022). Characterization of Microbial Communities in Wastewater Treatment Plants Containing Heavy Metals Located in Chemical Industrial Zones. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(11), 6529. <https://doi.org/10.3390/ijerph19116529>