

**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: Hidrogeoquímica**

**RT- 44/ NOV 23**

**RSE2023 PMBA/FEST**

Vitória,

Novembro de 2023

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL .....</b>	<b>3</b>
<b>2</b>	<b>RESULTADOS DOS INDICADORES .....</b>	<b>3</b>
2.1	QUALIDADE DA ÁGUA DO MAR .....	3
2.1.1	Nutrientes .....	5
2.1.2	Orgânicos .....	7
2.1.3	Metais .....	12
2.2	QUALIDADE DO SEDIMENTO MARINHO .....	15
2.2.1	Orgânicos .....	16
2.2.2	Metais .....	20
<b>3</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>26</b>

## 1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

O histórico de malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) abrange informações de suma importância para o balizamento do presente programa, uma vez que passou por modificações ao longo do tempo, visando melhor 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 coletadas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais coletadas 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 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 do monitoramento (setembro/2018 – março/2023) 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:

### 2.1 QUALIDADE DA ÁGUA DO MAR

Neste resumo serão abordados os dados do Tema Hidrogeoquímica ao longo das campanhas amostrais do PMBA/Fest previstas no RSE2023, incluindo o período chuvoso de 2023, tendo como base a concentração de cada variável química analisada e a aplicação de índices para avaliação

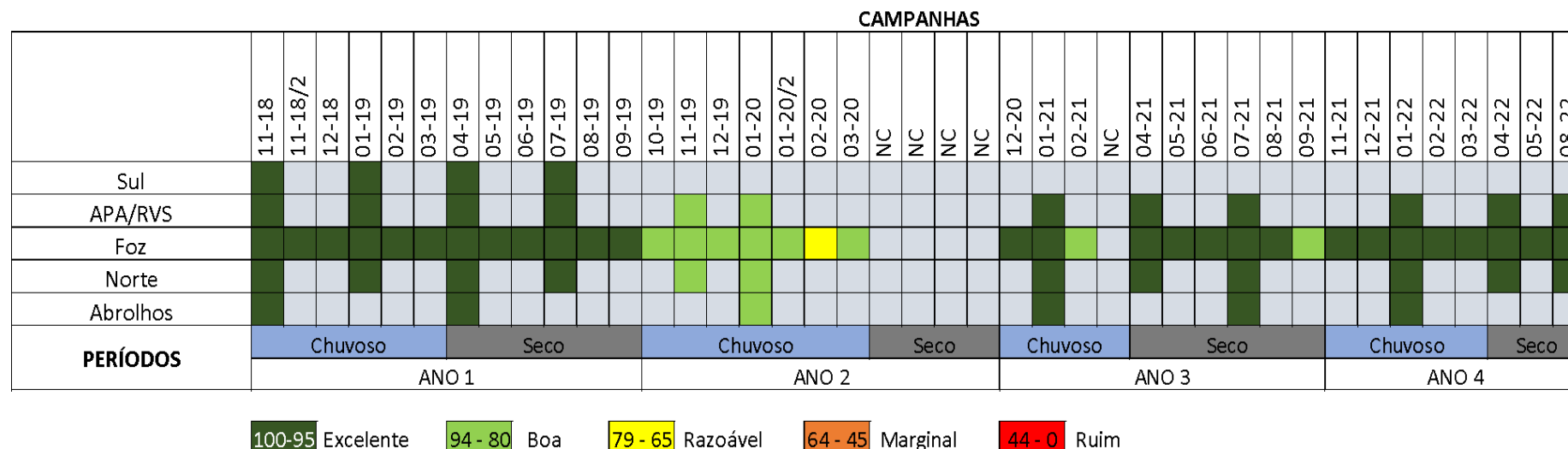
espaço-temporal da qualidade da água e do sedimento marinhos, que compõem os indicadores propostos por este tema. A qualidade da água foi avaliada pelos índices CCME WQI para metais e compostos orgânicos, baseados em valores orientadores nacionais e internacionais, e pelo Índice de Incremento em Nutrientes (IIN) – Adaptado do Índice de Carga de Poluição (PLI, Longhini et al., 2022) – que foi calculado com base nos valores de referência pré- Rompimento da Barragem (Figueiredo et al., 2016) e pós-Rompimento da Barragem no âmbito do PMBA (anterior ao PMBA/Fest - UFES, 2017), uma vez que os nutrientes se apresentarem dentro dos valores permitidos por lei na região marinha monitorada. Tendo em vista que os metais e compostos orgânicos não possuem dados pré-Rompimento da Barragem para a água, optou-se por manter os limites definidos por lei como procedimento padrão para o cálculo do índice CCME WQI.



Nesta atualização dos dados dos nutrientes na água do mar para o período chuvoso do Ano 5 do PMBA/Fest (outubro de 2022 e janeiro de 2023) houve alteração do Índice de Incremento em Nutrientes (IIN) nos setores APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz e Foz apenas na campanha de janeiro de 2023, onde menos de 25% das amostras estiveram acima do valor de referência pré-Rompimento da Barragem (Figura 1A, Figueiredo et al., 2016). A alteração observada na APA/REVIS foi bastante pontual, ocorrendo apenas na água de superfície da estação CA03 em função do aumento da sílica dissolvida neste ponto ( $11,52 \mu\text{mol/l}$ ). Já as alterações observadas no setor Foz ocorreram no subsetor foz sul, nas estações SDS20 e SDS35, também em virtude do aumento da sílica dissolvida (SDS20 S =  $17,90 \mu\text{mol/l}$  e SDS35 S =  $28,31 \mu\text{mol/l}$ ). Este padrão pode ser explicado pelas condições meteoceanográficas no momento da coleta de janeiro de 2023, quando as amostras do setor Foz foram coletadas durante o pico de vazão ( $>4.500 \text{ m}^3/\text{s}$ ) com ventos de NE-E atuando sobre a costa e direcionando a pluma de sedimento para a APA Costa das Algas/REVIS Santa Cruz (setor coletado após este pico de vazão). Em geral, há o aumento de sílica dissolvida no setor APA/REVIS durante os períodos chuvosos, o que confirma a dispersão de sedimento superficial para o sul nesses meses. É importante destacar as concentrações de nitrogênio total e fósforo total no setor APA/REVIS nesta campanha de janeiro de 2023, onde foram observadas as maiores concentrações de nitrogênio total em todo o PMBA/Fest (CA09 F e CA13 F  $>200 \mu\text{mol/l}$ ) e de fósforo total para este setor (CA01 S =  $1,79 \mu\text{mol/l}$ ), com as frações orgânicas representando majoritariamente estes nutrientes. As estações CA 06, CA07, CA08 também tiveram valores elevados de nitrogênio ( $>80 \mu\text{mol/l}$ ) e de fósforo (CA07 S =  $1,02 \mu\text{mol/l}$ ) totais. O aumento do nitrogênio e fósforo orgânicos nessa região pode estar associado a maior produtividade biológica e aumento da densidade planctônica, ou pode ainda ser oriundo de outras fontes orgânicas continentais. Embora tenham sido observadas alterações nas concentrações dos nutrientes nos setores APA/REVIS e Foz, os valores são menores do que os registrados na fase aguda do impacto nestas campanhas do período chuvoso do Ano 5 (Figura 1B). O nutriente que teve as menores concentrações no último ano do monitoramento foi o n-amoniaco, estando abaixo do limite de detecção para a maioria das amostras analisadas. Este padrão é o oposto do observado no início do monitoramento, quando o n-amoniaco se apresentava frequentemente acima dos valores de referência locais, em especial nos períodos secos. Entretanto, o aumento do IIN observado na estação SDS30 na campanha de janeiro de 2023 é explicado principalmente pelo aumento do n-amoniaco, que foi de  $2,28 \mu\text{mol/l}$  para a superfície e  $3,24 \mu\text{mol/l}$  para o fundo. Essa ocorrência ressalta a variabilidade observada para os nutrientes no ambiente marinho, governada por fatores hidrodinâmicos e biogeoquímicos. Não houve aumento do IIN no Setor Norte no período chuvoso do Ano 5.

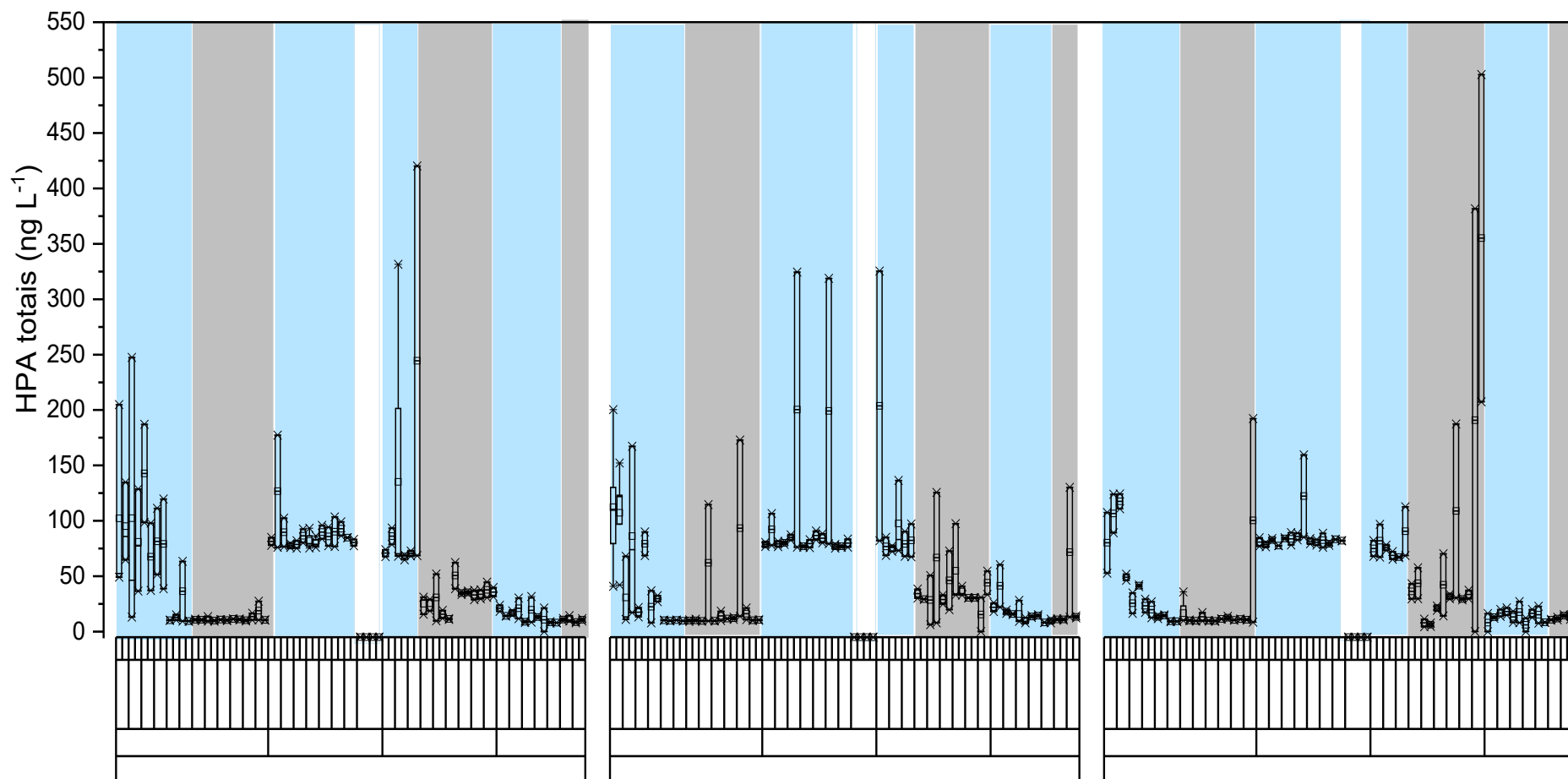
## 2.1.2 Orgânicos

Figura 2: Valores dos índices CWQI para hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) em amostras de água com o objetivo de avaliar o indicador de Qualidade de Água proposto pelo Tema Hidrogeoquímica. Este parâmetro foi descontinuado no Novo Ciclo do PMBA/Fest, sendo, portanto, reportado os resultados até agosto/2022.



O índice CWQI foi calculado integrando as concentrações de HPA em amostras de água para todas as campanhas e setores do PMBA/Fest contemplados neste relatório. O Ano 2 foi o mais impactado até o momento no PMBA/Fest, sendo classificado durante o período chuvoso com os índices de boa e razoável qualidade. Neste período a piora foi observada no Setor Foz do Rio Doce (Outubro/2019 a Março/2020). Para os setores APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz e Setor Norte, momentos de piora na qualidade foram observados nos meses de novembro/2019 e janeiro/2020. Durante o Ano 3, no setor Foz do Rio Doce, momentos de piora ocorreram durante o período chuvoso nas campanhas de fevereiro e setembro/2021. A piora da qualidade foi influenciada pela contaminação principalmente por benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-cd)pireno e dibenzo(a,h)antraceno. Observa-se uma tendência de retorno à condição de qualidade excelente de água em relação às concentrações HPA a partir do Ano 4. Destaca-se a ocorrência de ambientes impactados no Setor Foz do Rio Doce. Apesar da classificação como ambiente não impactado em diversos setores, ressaltamos que existem estações amostrais, consideradas *hotspots*, que ao longo do monitoramento se enquadraram como moderadamente impactadas. A partir do Ano 5 não foram mais coletadas amostras para a determinação de HPAs, não sendo possível a continuidade da avaliação deste índice de qualidade envolvendo este parâmetro.

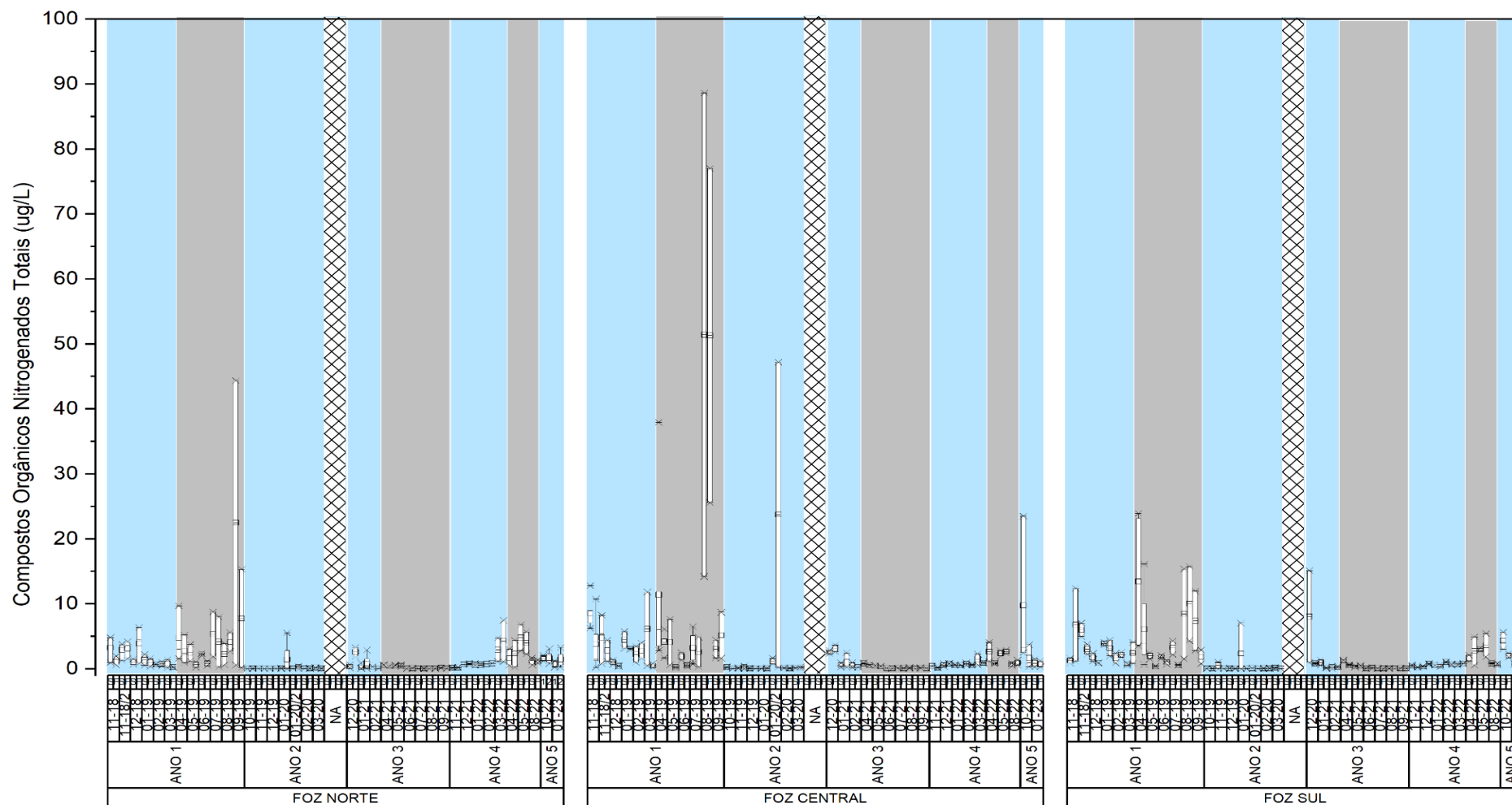
Figura 3: Distribuição dos valores de mínima e máxima (\*), média (quadrado) e mediana (linha) das concentrações de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos Totais em águas de superfície (S) e fundo (F) do setor Foz do Rio Doce nas campanhas amostrais do monitoramento PM PMBA/Fest. Área sombreada em azul: período chuvoso; área sombreada em cinza: período seco (novembro/2018 a maio/2022). Este parâmetro foi descontinuado no Novo Ciclo do PMBA/Fest, sendo, portanto, reportado os resultados até maio/2022.





No Setor Foz do Rio Doce as concentrações de HPA totais em água apresentam uma variação espaço temporal muito distinta dos demais setores entre os períodos seco e chuvosos e entre seus subsetores Foz Norte, Central e Sul. As concentrações são mais elevadas durante os períodos chuvosos dos Anos 1, 2 e 3. No subsetor Foz Sul, as concentrações aumentam significativamente durante o período seco do Ano 3. Nos períodos chuvosos, as concentrações atingiram máximos de concentração em períodos chuvosos de novembro/2018, dezembro/2019 e fevereiro/2021. Já para os períodos secos, a concentração de HPAs se equipara aos máximos observados nos períodos chuvosos, apenas durante no Ano 3, principalmente na Foz Sul (agosto e setembro/2021). No Ano 4, durante o período chuvoso foi registrado uma tendência de diminuição nos níveis de concentração em todos os subsetores. As altas concentrações observadas durante o Ano 1 evidenciam o transporte destes contaminantes em função da passagem da lama de rejeito. A partir do Ano 5 não foram mais coletadas amostras para a determinação de HPAs.

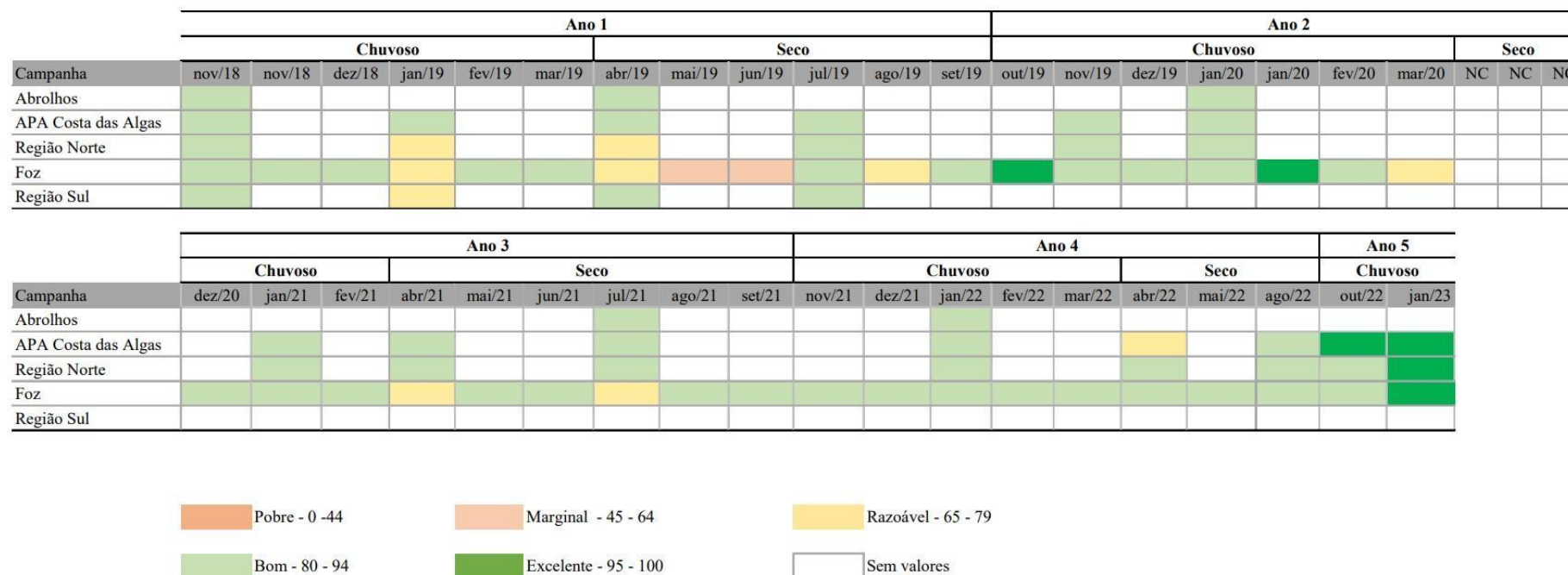
Figura 4: Distribuição dos valores de mínima e máxima (\*), média (quadrado) e mediana (linha) das concentrações de Compostos Orgânicos Nitrogenados Totais (µg/L) em águas de superfície (S) e fundo (F) do setor Foz do Rio Doce nas campanhas amostrais do monitoramento PMBA/Fest. Área sombreada em azul: período chuvoso; área sombreada em cinza: período seco (novembro/2018 a janeiro/2023).



Os dados referentes à concentração de aminas, ao longo dos anos de monitoramento, apresentaram uma grande variação espaço-temporal, sendo principalmente influenciados por ação de mecanismos hidrodinâmicos e meteoceanográficos. Na Foz do Rio Doce os maiores níveis foram registrados durante o Ano 1. Durante este período de amostragem, os maiores valores de concentração detectados ocorreram no período seco, atingindo os níveis máximos reportados durante todo o monitoramento, principalmente na Foz Central. No ano seguinte, Ano 2, notou-se uma redução significativa na concentração destes contaminantes. Ainda assim, os maiores registros continuaram sendo registrados no Setor Foz do Rio Doce, em especial nos subsetores Central e Norte. Nos períodos chuvosos dos anos 3 e 4, as concentrações atingiram máximos de concentração em dezembro/2020 e março/2022. Durante o Ano 4, a partir de março/2022, essa tendência de aumento foi confirmada. No Ano 5, as concentrações de compostos orgânicos nitrogenados continuaram aumentando, principalmente na Foz Central, onde os valores médios atingiram patamares similares aos encontrados durante o período chuvoso do Ano 1. Perfil semelhante, também foi observado na Foz Sul e Norte. Essa contínua tendência de aumento, denota a importância de avaliação deste parâmetro, no que diz respeito a sua relação com o rejeito. Embora os níveis remanescentes de concentração desses compostos sejam inferiores em relação aos registros observados próximos ao rompimento da barragem, devemos também ressaltar a persistência desses poluentes nas lamas de rejeitos de minério de ferro, que ainda são remobilizados e disponibilizados ao meio ambiente.

### 2.1.3 Metais

Figura 5: Valores dos índices CWQI para metais em água durante o período de monitoramento do PMBA/Fest entre o ano de 2018 a 2023.

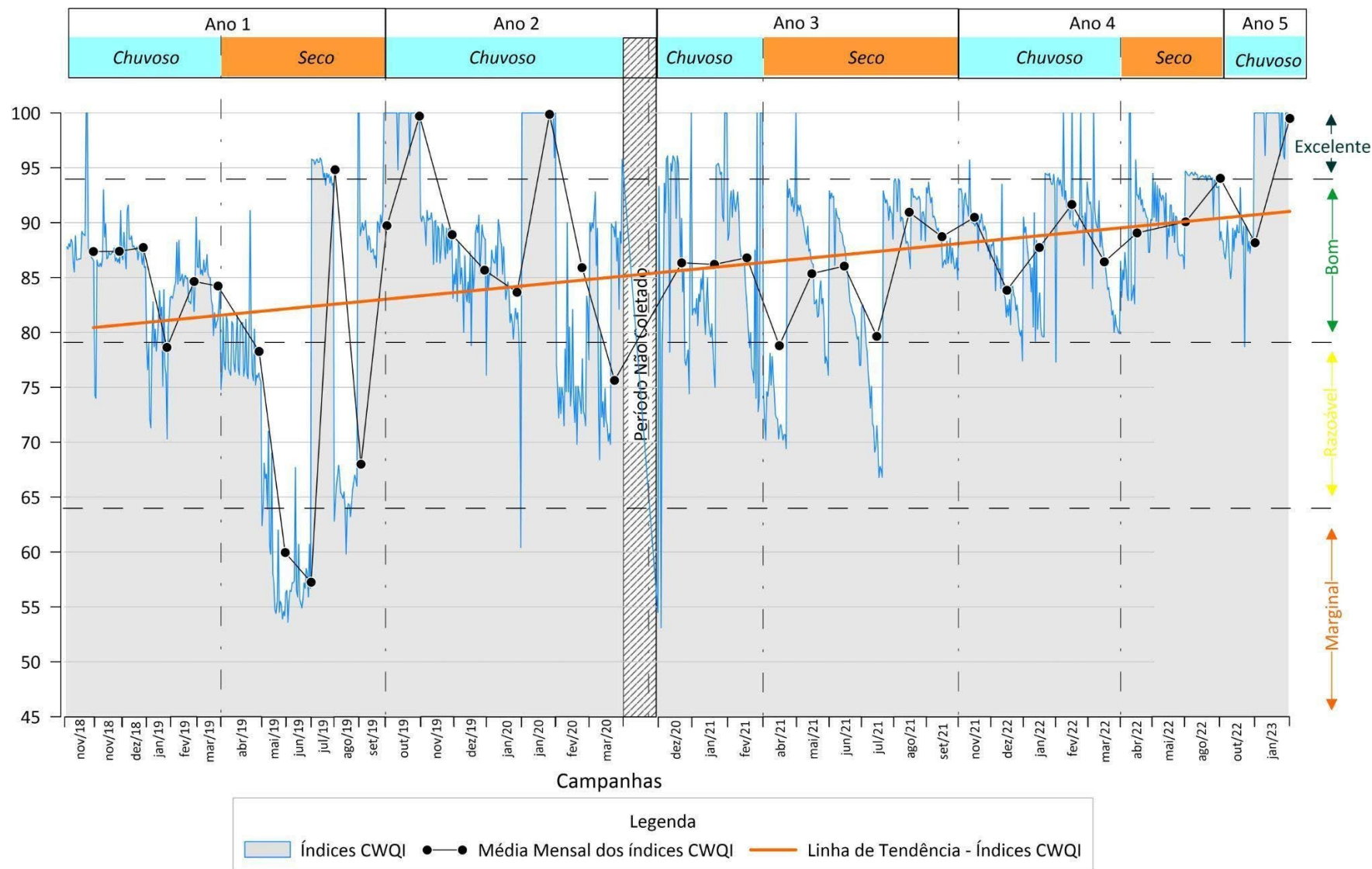


Os índices foram calculados com o auxílio do software *WQI Calculator* desenvolvido pelo Conselho Canadense de Ministros do Meio Ambiente (CCME). O índice incorpora três elementos: escopo (o número de parâmetros que não atendem às diretrizes de qualidade da água), frequência (o número de vezes que essas diretrizes não são atendidas) e amplitude (o quanto as diretrizes não são atendidas). O índice classifica em 0 (pior qualidade da água) e 100 (melhor qualidade da água), sendo classificado em cinco categorias: Excelente (CCME WQI valores entre 95-100) apresentando qualidade da água protegida com uma ausência virtual de ameaça ou prejuízo e condições muito próximas dos níveis naturais ou primitivos; Bom (CCME WQI valores entre 80-94) com qualidade da água protegida com apenas um pequeno grau de ameaça ou prejuízo e condições raramente se afastam dos níveis naturais ou desejáveis; Razoável (CCME WQI valores entre 65-79) com qualidade da água geralmente protegida, mas ocasionalmente ameaçada ou prejudicada e condições às vezes se afastam dos

níveis naturais ou desejáveis; Marginal (CCME WQI valores entre 45-64) com qualidade da água frequentemente ameaçada ou prejudicada e condições muitas vezes se afastam dos níveis naturais ou desejáveis, por fim, Ruim (CCME WQI valores entre 0-44) com qualidade da água quase sempre ameaçada ou prejudicada e condições geralmente se afastam dos níveis naturais ou desejáveis. As concentrações de V, Co, Ni, Cu, As, Cd, Ba, Pb, Fe, Al, Mn, Zn e Hg na fração dissolvida e de Ni, As, Cd, Ba, Pb, Cr, Mn e Zn para a fração total foram utilizadas para o cálculo desses índices.

O Ano 1 apresentou uma grande variação nos índices de qualidade para metais em água, variando de qualidade marginal a bom. O período chuvoso foi caracterizado com o maior predomínio de índices bons com valores variando de 84,2 a 90,8. Contudo, foram registrados índices razoáveis para o mês de janeiro de 2019 para a Região Norte (72,6), Região da Foz (78,6) e Região Sul (77,4). Para o período seco houve o predomínio de qualidade bom com índices variando de 80,2 a 94,8. Porém, esse foi o período que registrou índices de qualidade marginal para a Região da Foz em maio e junho de 2019, com índices de 59,9 e 57,2, respectivamente. Além disso, índices de qualidade razoável foram registrados para o período seco do Ano 1 para o mês de abril de 2019 na Região Norte (79,9) e Foz (78,3) e em agosto de 2019 para a Foz (68,0). No Ano 2 foi observada uma melhora nos índices de qualidade em quase todos os meses analisados, variando de índice bom (83,7 a 88,9) a excelente (99,7 a 99,9), com exceção do mês de março de 2020, que apresentou uma queda nos índices de qualidade, registrando valor de 75,6, classificado como índice razoável. Para o Ano 3, o período chuvoso foi classificado com índice bom, valores variando de 86,2 a 91,7. Já o período seco, foi classificado em sua maioria com índice bom com valores variando de 85,4 a 92,2. Contudo, a Região da Foz do Rio Doce registrou dois índices razoáveis para os meses de abril (78,8) e julho de 2021 (79,6). No Ano 4, o período chuvoso registrou em todos os meses analisados índice bom, com valores variando de 82,6 a 94,8. Para o período seco, foram classificados com índice bom praticamente todos os meses e locais, com valores variando de 85,3 a 94,8, exceto para a Região da APA Costa das Algas em abril de 2022, que foi classificada com índice razoável (75,3). No Ano 5, o período chuvoso apresentou uma melhora nos índices de qualidade, primeiramente para a APA Costa das Algas, para o mês de outubro de 2022 e se mantendo para o mês de janeiro de 2023, além da melhora nos índices de qualidade para a Região Norte e para a Foz, passando de índice bom (87) para excelente (99,8).

Figura 6: Comportamento dos índices de qualidade em água para a região da Foz do Rio Doce durante o período do PMBA/Fest entre os anos de 2018 a 2023.





O principal responsável pela diminuição dos índices de qualidade para a região foram as concentrações de arsênio na fração total para todos os períodos, variando de 29,948 a 179,000  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , apresentando valores acima dos limites de referência ( $< 10 \mu\text{g.L}^{-1}$ ). Além disso, as concentrações de ferro ( $2,145 > \text{Fe} \leq 339,919 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) e zinco ( $0,118 > \text{Zn} \leq 120,052 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) dissolvido e, chumbo ( $0,507 > \text{Pb} \leq 28,844 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) e zinco ( $2,515 > \text{Zn} \leq 1.019,475 \mu\text{g.L}^{-1}$ ) na fração total foram as principais responsáveis pelo índices classificados como razoável.

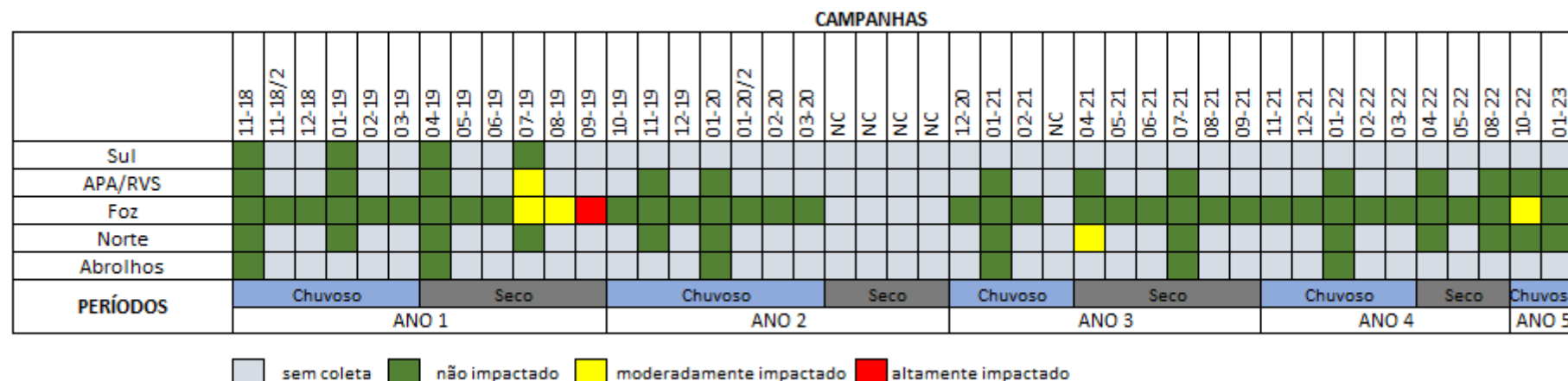
Dentre todas as áreas monitoradas ao longo dos 5 anos, a região da Foz do Rio do Doce registrou a maior variação nos índices de qualidade de água variando de marginal (5,3% das campanhas – 2/38), razoável (15,8% das campanhas - 6/38), boa (71,1% das campanhas – 27/38) e excelente (com 7.9% das campanhas – 3/38). Nos episódios marginais, as concentrações de ferro e cobalto na análise da fração dissolvida registraram valores de 567,982 a 844,414  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e 2.41 a 2.695  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , respectivamente. Somado a isso, as concentrações de manganês, arsênio e níquel apresentaram valores de 12.527 a 202,239  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , 36,025 a 55.148  $\mu\text{g.L}^{-1}$  e 41.267 a 851,033  $\mu\text{g.L}^{-1}$ , respectivamente. As concentrações de níquel na fração total ficaram acima dos valores de referência em até 47 vezes. O Ano 2 registrou índices de qualidade predominantemente de razoável para bom, com episódios de índices excelentes. O Ano 3 apresentou o predomínio de índices de bom a excelente durante o período chuvoso, com episódios de índices razoáveis. Ao contrário, o período seco do referido ano registrou predomínio de índices variando de razoável a bom, com um episódio de índice excelente para o período. O Ano 4 apresentou um comportamento bem diferente aos outros anos monitorados. Esse Ano apresentou menor variação, com predomínio de índices Bom, com dois episódios de índices razoáveis e seis episódios de índices excelentes. Com a análise da linha de tendência (em laranja) é possível observar uma sensível melhora nos índices de qualidade de água para a região da foz do Rio Doce. Contudo, para o Ano 5, a região da Foz apresentou uma melhora nos índices de qualidade de água passando de Bom para Excelente. Essa melhora é reflexo do registro de menores concentrações de metais dissolvidos e totais para a água ao longo do período de monitoramento.

## 2.2 QUALIDADE DO SEDIMENTO MARINHO

Para a qualidade do sedimento, foi aplicado o índice SQG-q para metais e compostos orgânicos com base na legislação nacional vigente e valores norteadores internacionais, bem como em relação aos dados Pré-Rompimento da Barragem (Petrobrás, 2015) e Pós-Rompimento da Barragem no âmbito do PMBA (anterior ao PMBA/Fest - UFES, 2016).

## 2.2.1 Orgânicos

Figura 7: Valores dos índices SQG-q para hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA) em amostras de sedimentos com o objetivo de avaliar o indicador de Qualidade da Sedimento proposto pelo Tema Hidrogeoquímica. O índice foi calculado integrando as concentrações de HPA para todas as campanhas e setores do PMBA/Fest contemplados neste relatório.

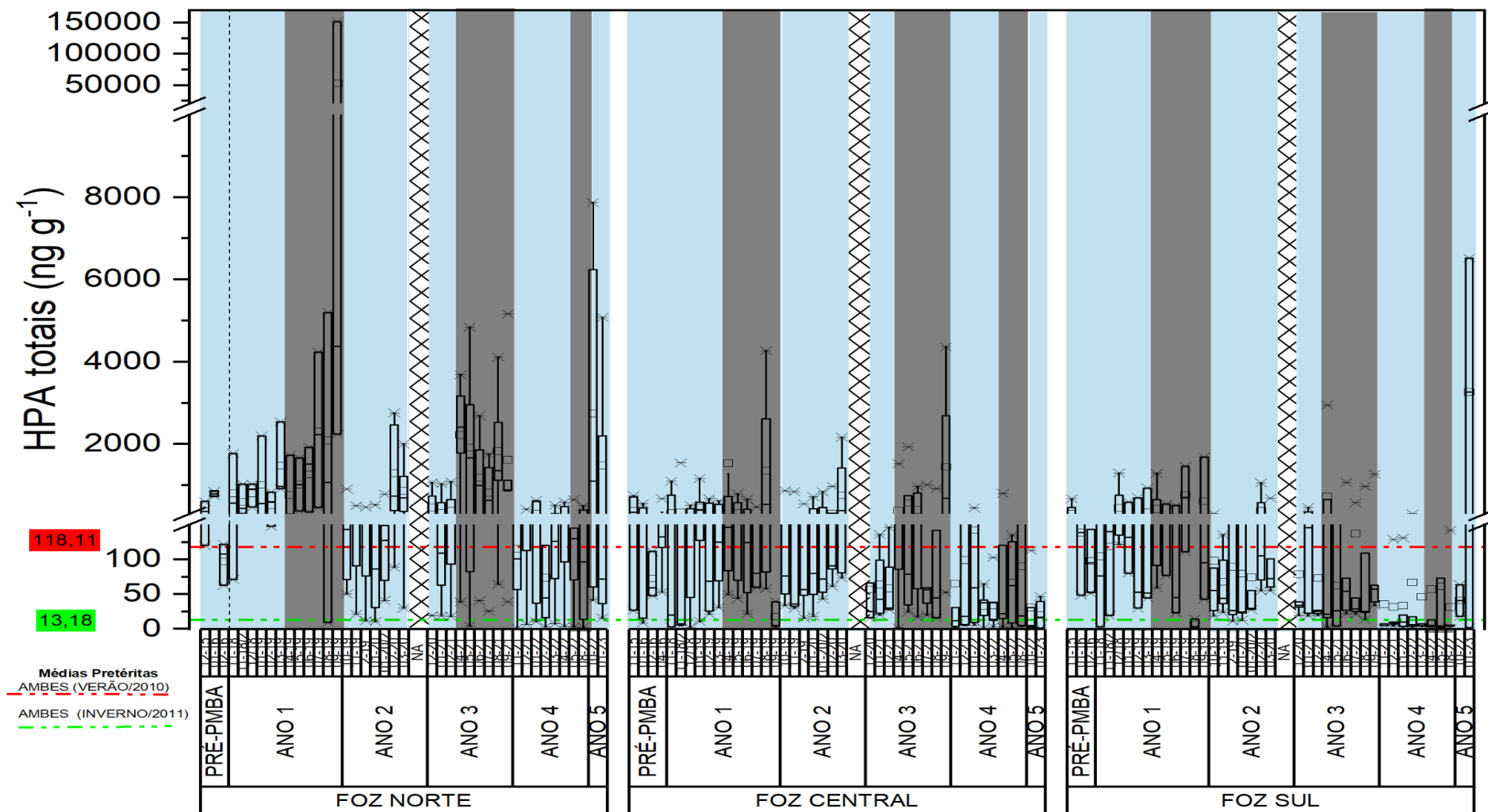


O parâmetro de Qualidade de Sedimento - Índice SQGQ para HPAs revela a contaminação por HPAs, principalmente por fluoranteno, benzo(a)antraceno, criseno, benzo(a)pireno, indeno(1,2,3-cd)pireno e dibenzo(a,h)antraceno. Destaca-se a ocorrência de ambientes impactados, em especial na Foz do Rio Doce, nas áreas de preservação ambiental APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz e Setor Norte em períodos secos. Para a Foz, a piora da qualidade ocorreu nas campanhas julho a setembro de 2019. O Ano 1 foi o mais impactado até o momento no PMBA/Fest e há uma tendência de melhora do ambiente marinho em relação às concentrações HPA a partir do Ano 2 no Setor Foz do Rio Doce. Durante o período seco do Ano 1, apenas 9% dos pontos amostrais foram classificados como moderadamente a altamente impactados, em destaque os situados no Setor Foz e APA Costa das Algas/RVS Santa Cruz (julho/2019). Durante o Ano 3 também foi observada uma piora da qualidade do sedimento no Setor Norte em abril/2021, sendo caracterizado como moderadamente impactado. No Ano 5, foram observadas altas concentrações de alguns HPA em sedimentos, o que modificou o índice de qualidade para moderadamente impactado no setor Foz durante o período chuvoso (outubro-2022). Apesar da classificação como ambiente não impactado em diversos setores, ressaltamos que existem estações amostrais, consideradas *hotspots*, que ao longo do monitoramento se enquadraram como moderadamente impactadas. A aplicação



deste índice como critério de qualidade para sedimentos pós-Rompimento da Barragem no Âmbito do PMBA (pré-PMBA/Fest) evidencia que houve uma piora do ambiente, inferindo assim uma relação com o transporte de material continental com a passagem da lama, porém um comportamento de melhora da qualidade vem sendo observado.

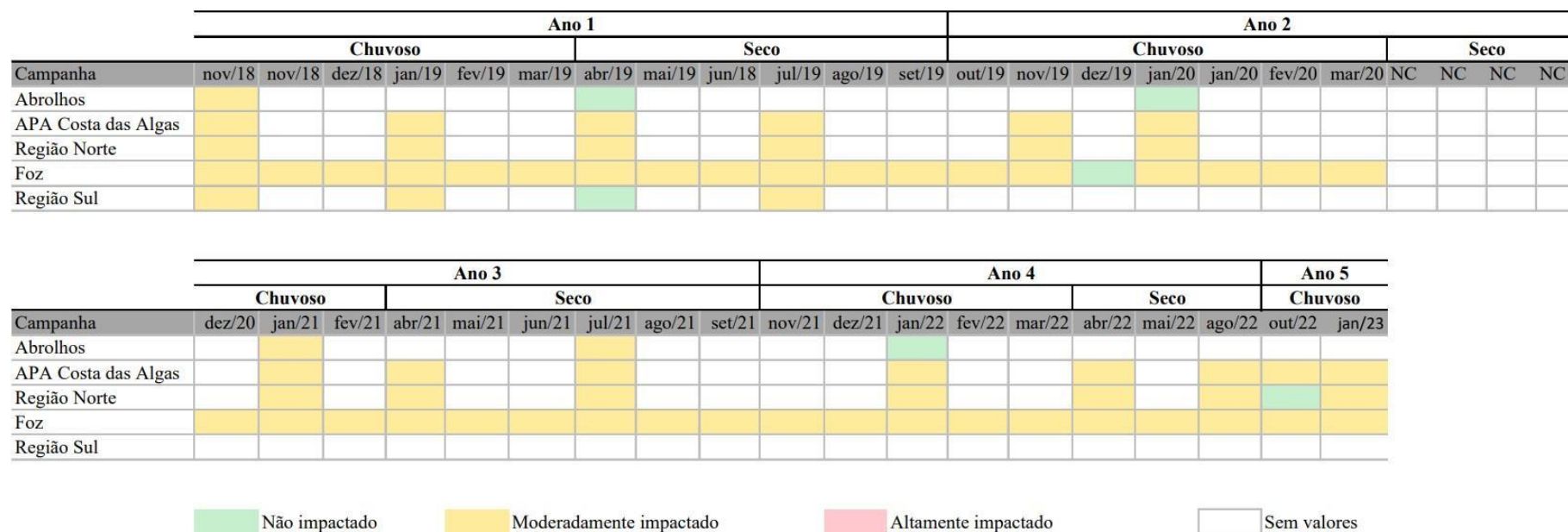
Figura 8: Distribuição dos valores de mínima e máxima (\*), média (quadrado) e mediana (linha) das concentrações de Hidrocarbonetos Policíclicos Aromáticos Totais em amostras de sedimento do Setor Foz do Rio Doce nas campanhas amostrais do monitoramento PM PMBA/Fest. Área sombreada em azul: período chuvoso; área sombreada em cinza: período seco.



Para o Setor Foz, as concentrações de hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em sedimento mantêm um perfil de distribuição e concentração muito semelhante entre os períodos secos e chuvosos dos Anos 1, 2 e 3. Durante o período chuvoso do Ano 4 as concentrações continuaram a apresentar elevados níveis de concentração (agosto/2022), entretanto ainda inferiores aos observados nos anos anteriores. Já para o Ano 5, as concentrações de HPA totais aumentaram significativamente, atingindo níveis similares aos observados no período seco do Ano 1 e superiores ao período chuvoso do mesmo ano. Ainda assim, em quase todos os setores monitorados, com exceção do Setor Foz, os mais elevados níveis de concentração são detectados durante o período seco em todos os Anos de monitoramento deste projeto. Portanto, é de notar que os níveis de concentração ainda excedem os dados pretéritos ao rompimento da barragem de rejeitos. Também, cabe aqui ressaltar a importância da contribuição continental, além da redistribuição de material em sedimento de fundo principalmente em *hotspots*, onde condições físicas e geológicas podem favorecer ao acúmulo desse tipo de material. Ressalta-se que os níveis de concentração observados ao longo do monitoramento apresentaram, em sua maioria, concentrações acima do que foi observado no pré-Rompimento da Barragem evidenciando o aumento da poluição, confirmando o transporte destes contaminantes em função da passagem da lama de rejeito.

## 2.2.2 Metais

Figura 9: Índice de qualidade de sedimentos para metais em sedimentos superficiais durante o período do PMBA/Fest entre os anos de 2018 e 2023. NC (Não Coletado) corresponde ao período de pandemia.



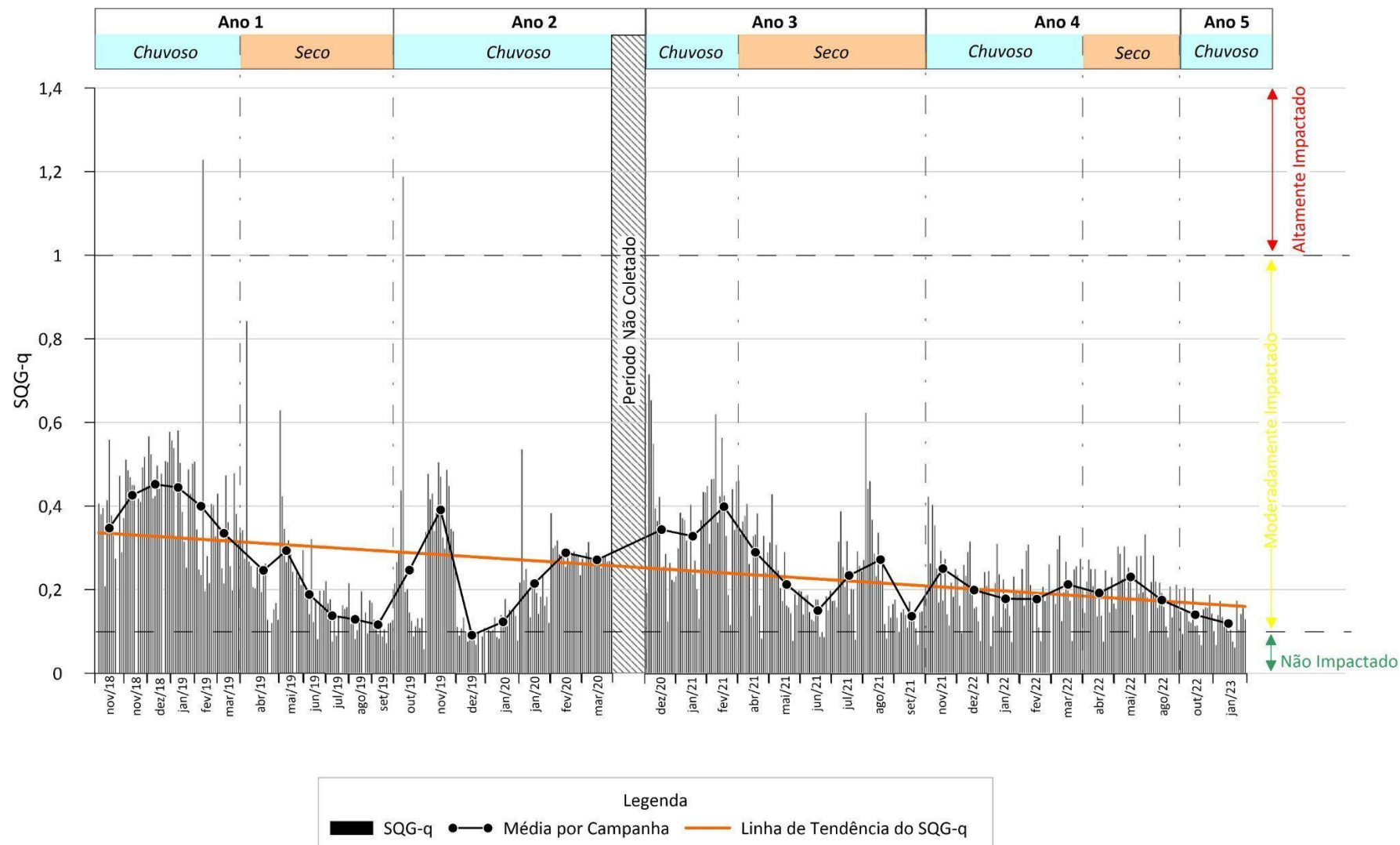
Os índices foram calculados a partir da razão entre a concentração registrada na amostra pelos níveis de efeitos provável (*Probable Effects Levels* - PEL) para os elementos níquel, cobre, arsênio, prata, cádmio, chumbo, cromo, zinco e mercúrio.

O Ano 1 registrou índices de qualidade de sedimentos classificados como moderadamente impactado em quase todas as áreas e períodos amostrados variando de 0,23 a 0,50 e média de  $0,38 \pm 0,08$  para o período chuvoso e 0,10 a 0,37 com média de  $0,36 \pm 0,12$  para o período seco. O Ano 1 apresentou uma exceção para a região de Abrolhos e Região Sul durante o período seco, especificamente para o mês de abril de 2019, classificando a região com índices não impactados (0,06 e 0,08 respectivamente). Para o Ano 2, o índice de qualidade moderadamente impactado também foi quase totalitário ao longo do período chuvoso, variando de 0,12 a 0,60 com média de  $0,28 \pm 0,09$ . O Ano 2 também apresentou exceção para a Região da Foz para o mês de dezembro de 2019 e para a

Região de Abrolhos para o mês de janeiro de 2020, registrando índices não impactados (0,08 e 0,09, respectivamente). O Ano 3 foi classificado em sua totalidade com índices moderadamente impactados, para todas as regiões e todos os períodos analisados. Contudo, o período chuvoso registrou variação de 0,20 a 0,49 com média de  $0,37 \pm 0,05$  e o período seco variou de 0,10 a 0,49 com média de  $0,25 \pm 0,05$ . Desta maneira é possível observar que o período chuvoso se apresenta ligeiramente mais impactado quando comparado ao período seco do referido ano. Para o Ano 4, o período chuvoso foi classificado como moderadamente impactado com índices variando de 0,16 a 0,25 com média de  $0,20 \pm 0,03$ , exceto para a Região de Abrolhos para o mês de janeiro de 2022, apresentando índice não impactado (SQG-q = 0,09). Já o período seco do Ano 4 foi classificado com índice moderadamente impactado para todos os períodos analisados, variando de 0,17 a 0,24 com média de  $0,21 \pm 0,03$ . Para o período chuvoso do Ano 5 predominaram índices moderadamente impactados, com índices variando de 0,11 a 0,14 e média  $0,12 \pm 0,02$ . Ao longo do monitoramento, foi no Ano 5 que a Região Norte apresentou melhora nos índices de qualidade (SQG-q = 0,09). Quando comparados o período chuvoso e seco é possível observar um ligeiro incremento nos valores médios para o período seco, indicando a possibilidade de uma piora na qualidade dos sedimentos.

Os principais elementos que determinam o decaimento nos índices de qualidade para o sedimento foram: i) para Abrolhos, a concentração dos elementos mercúrio e arsênio foram os responsáveis para o período chuvoso do Ano 1 e do Ano 3; ii) para a Região Sul e a APA Costa das Algas foram os elementos arsênio, níquel e mercúrio; iii) para a Região Norte foram as concentrações de níquel, arsênio, prata e mercúrio; e por fim, iv) para a região da Foz do Rio Doce foram as concentrações dos elementos arsênio, prata e mercúrio.

Figura 10: Comportamento dos índices de qualidade de sedimento (SQG-q) para a região da foz do Rio Doce.



A Região da Foz do Rio Doce apresentou uma alta variabilidade em relação aos valores dos índices de qualidade de sedimentos durante o período de monitoramento. De forma geral, os índices de qualidade de sedimento predominaram como moderadamente impactados para todo o período de monitoramento, apresentando episódios de índices altamente impactados. Para o Ano 1, as médias dos índices foram ligeiramente maiores durante o período chuvoso quando comparados ao período seco, registrando um pico do índice classificado como altamente impactado para o período chuvoso (1,23 em fevereiro de 2019). No Ano 2, os índices de qualidade de sedimento foram predominantemente moderadamente impactados, registrando um pico de qualidade de altamente impactado (1.19 em outubro de 2019). Contudo, para esse ano foi registrada a maior concentração de índices não impactados em dezembro de 2019, com valores variando de 0,03 a 0,09. Embora essa melhora na qualidade de sedimentos tenha sido registrada, ocorreu uma piora gradual nos índices de qualidade para o restante do período chuvoso do Ano 2, passando de valor médio de 0,12 em janeiro de 2020 para 0,27 em março de 2020. O Ano 3 registrou comportamento semelhante ao Ano 1, com maiores valores médios para o período chuvoso (variando de 0,33 a 0,40) quando comparados ao seco (variando de 0,14 a 0,29). A diferenciação nos índices de qualidade de sedimento entre os períodos chuvosos e secos entre os Ano 1, Ano 2 e Ano 3 podem estar associados a fenômenos meteoceanográficos. O Ano 4 foi o que apresentou menor variação dos índices de qualidade entre os períodos chuvoso (médias das campanhas variando de 0,18 a 0,25) e seco (médias das campanhas variando de 0,19 a 0,23), classificados como moderadamente impactados, sem episódios de picos com índices altamente impactados. Entretanto, foram observados registros de picos de índices não impactados ( $SQG-q < 0,1$ ) com valores variando para o referido ano de 0,03 a 0,09. Esses picos de índices não impactados não apresentaram um padrão evidente, sendo extremamente pontuais entre os meses que compõem o período seco do Ano 4. Para o Ano 5, a região da Foz apresentou, para o período chuvoso, uma melhora na qualidade de sedimento, apresentando variação de 0,06 a 0,21 e média de  $0,13 \pm 0,03$ . Ao longo do monitoramento é possível registrar uma ligeira melhora nos índices de qualidade de sedimentos na Região da Foz do Rio Doce, como observado pelo cálculo da linha de tendência (em laranja) apresentando uma declividade levemente negativa, com tendência de valores de  $SQG-q$  menores que a 0,1.



Tabela 1: Frequência de ocorrência para as alterações nas concentrações de Fe no sedimento, considerando os dados Pré-Rompimento da Barragem como valores de referência (Petrobras, 2015). NC ("Não Coletado") corresponde ao período da pandemia. ADP: Acima dos Dados Pretéritos. Os números indicam a taxa de incremento (número de vezes acima dos valores pretéritos).

COLETAS		11-18 a 03-19	04-19 a 09-19	10-19 a 03-20	NC	12-20 a 02-21	04-21 a 09-21	11-21 a 03-22	04-22 a 08-22	10-22 e 01-23
SETORES	Sul									
	APA/RVS	2	1	2		1	1	1	1	1
	Foz	2	1	1		1	1	1	1	1
	Norte									
	Abrolhos	2	1	3		3	2	2		
PERÍODOS		Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso	Seco	Chuvoso
		ANO 1		ANO 2		ANO 3		ANO 4		ANO 5

Sem dados pretéritos/não coletado
  Não alterado
  <25% ADP
  >25% ADP
  >50% ADP
  >75% ADP
  100% ADP

Com relação à qualidade do sedimento para as concentrações de Fe, foi avaliada a frequência de ocorrência de amostras que apresentaram níveis Acima dos Dados Pré-Rompimento da barragem (ADP; PETROBRAS, 2015) para os setores Abrolhos, Foz do Rio Doce e APA/RVS Costa das Algas. A variação espaço-temporal durante todo o período de monitoramento para este indicador mostrou condições mais degradadas durante os períodos chuvosos, com exceção do Setor Abrolhos, em que a ADP foi maior do que 75 % no período seco do Ano 3.

A atualização dos dados para o período chuvoso do Ano 5 (10-22 e 01-23) mostrou a continuidade do padrão observado para o setor Foz do Rio Doce quando comparado ao período chuvoso do Ano 4, com valores de ADP maiores do que 25 %. Este resultado sugere uma melhora da qualidade, principalmente considerando os períodos chuvosos do Ano 1 (ADP > 75 %) e do Ano 3 (ADP > 50 %), embora tenha ocorrido maior degradação em relação ao período seco anterior (04-22 a 08-22; ADP < 25 %). Conforme já discutido para a região, o ciclo temporal de aumento e diminuição das taxas de contaminação por Fe no sedimento da Foz do Rio Doce reflete os processos hidrodinâmicos e meteoceanográficos, em que os aportes externos decorrentes da vazão do Rio Doce são



mais expressivos nos períodos chuvosos, enquanto os eventos de ressuspensão de fundo e liberação de metais sedimento-água são mais significativos nos períodos secos (LONGHINI et al., 2022). Outro padrão observado para a região refere-se ao decréscimo dos níveis de metais no sedimento (incluindo o Fe) após eventos de vazão de inundação do Rio Doce, similar ao que ocorreu previamente à coleta de 01-23 (vazão maior que 4500 m<sup>3</sup>/s) e anteriormente nos períodos chuvosos do Ano 2 e do Ano 4. Para o setor APA Costas das Algas ocorreu uma redução da frequência de amostras com valores de Fe acima dos dados pré-rompimento da barragem (e.g., > 50 % ADP no período chuvoso do Ano 4; > 25 % ADP no período chuvoso do Ano 5). As taxas de incremento (número de vezes em que os valores ocorreram acima das concentrações Pré-Rompimento) foram inferiores a 2 em ambos os setores, indicando concentrações maiores, embora próximas àquelas registradas para o Fe no período Pré-Rompimento (e.g. média de 29.875,0 µg/g de Fe no período Pré-Rompimento e máxima de 38.868,5 µg/g de Fe na estação SDN30 para a campanha 10-22, resultando em 1,3 vezes de incremento).

### 3 REFERÊNCIAS

- ALZAGA, R.; MESAS, A.; ORTIZA, L.; BAYONA, J. M. Characterization of organic compounds in soil and water affected by pyrite tailing spillage. **Science of the Total Environment**, 242(1–3), 167–178, 1999.
- EVANGELISTA, H.; VALERIANO, C. M.; PARAVIDINI, G.; GONÇALVES JUNIOR, S.J.; SODRÉ, E.D.; NETO, C.C.A.; SANTOS, E.A.; NETO, N.M.; PEIXOTO, C.; LICINIO, M.V.V.J.; RIBEIRO, J.N.; FLORES, A.V.; PEREIRA, M.G.; BARBOSA, C.F.; BARCELLOS, J.R.C.; OLIVEIRA, B.V.X.; GUEBERT, F.; NEGRÃO, F.; ANJOS, M.J.; SANTOS, R.S.; SEOANE, J.C.; CORDEIRO, R.C.; HEILBRON, M. Using Nd-Sr isotopes in suspended sediments in the Abrolhos coral-reef (SW Atlantic, Brazil) to assess potential contamination from the 2015 Fundão dam collapse. **Science of the Total Environment**, 807, 151231, 2022.
- FIGUEIREDO, J. A.; COSTA, E.; MILÁN, E.; BARROSO, G. F.; NETO, R. R. Nutrientes limitantes e as relações orgânicas e inorgânicas entre o fósforo, nitrogênio e silício no sistema pelágico da BES e PNBC. *Geochimica Brasiliensis*, 30(2), 95-95, 2016.
- LONGHINI, C.M.; RODRIGUES, S.K.; COSTA, E.S.; DA SILVA, C.A.; CAGNIN, R.C.; GRIPP, M.; LEHRBACK, B.D.; MILL, G.N.; DE OLIVEIRA, E.M.C.; HERMOGENES, C. DE C.M.; RODRIGUES, D.G.F.; DAVID, A.M.; GRAMLICH, K.C.; BISI JÚNIOR, R. DA C.; GOMES, A.A.P.; DA SILVA FILHO, J.P.; ALMEIDA, J.F.; SOUZA, K.F. DE; LUZ JUNIOR, W.A.R.; POLEZE, L.M.B.; BARROS, R.R.; RIGO, D.; GHISOLFI, R.D.; NETO, R.R.; SÁ, F. Environmental quality assessment in a marine coastal area impacted by mining tailing using a geochemical multi-index and physical approach. **Science of the Total Environment**, 803, 149883, 2022.
- PETROBRAS, 2015a. Relatório Final do Projeto de Caracterização Ambiental Regional da Bacia do Espírito Santo e Parte Norte da Bacia de Campos (PCR-ES/AMBES). **Anexo II.2.3-2** – Metais biodisponíveis e totais, fósforo e enxofre nos sedimentos superficiais da Bacia do Espírito Santo e Porção Norte da Bacia de Campos.
- UFES (2017). Monitoramento da Influência da Pluma do Rio Doce após o rompimento da Barragem de Rejeitos em Mariana/MG-Novembro de 2015: Processamento, Interpretação e Consolidação de Dados. Relatório de Pesquisa. Departamento de Oceanografia, Centro de Ciências Humanas e Naturais, Universidade Federal do Espírito Santo.
- USEPA. (1996). Method 3540c: Soxhlet Extraction. In U.S. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/solidwaste/hazard/testmethods/sw846/pdfs/3540c.pdf>
- USEPA. (2007). Method 8270d: Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/Mass Spectrometry (GC/MS). In U.S. Environmental Protection Agency. <http://www.epa.gov/osw/hazard/testmethods/sw846/pdfs/8270d.pdf>