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

Material Suplementar Ambiente Dulcícola

Tema: Qualidade de Água e Sedimento

RT- 55/ OUT 26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2026

EQUIPE TÉCNICA

Profª. Drª. Vânya Mácia Durate Pasa (coordenadora)

Prof. Dr. Paulo Jorge Sanches Barbeira

Poliana Cardoso Lima

Luana Rocha do Carmo

Mariana Luíza Miranda Pereira

Pedro Henrique Paranhos de Medeiros

Izabella Cristina Gonçalves Silva

Yara Aparecida Melo

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 4

2 METODOLOGIA 6

2.1 COLETA 6

2.2 ANÁLISE 6

2.2.1 Metais em água 6

2.2.2 Metais em sedimento 7

2.2.3 Orgânicos em sedimento 7

2.3 INDICADORES 10

2.3.1 Metais em água (cwqi) 10

2.3.2 Metais em sedimentos (sqg-q) 11

2.3.3 Orgânicos em água (cwqi) 13

2.3.4 Orgânicos em sedimentos (sqg-q) 14

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 16

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 16

3.1 METAIS EM ÁGUA (CWQI) 17

3.2 METAIS EM SEDIMENTOS (SQG-Q) 20

3.3 ORGÂNICOS EM ÁGUA (CWQI) 23

3.4 ORGÂNICOS EM SEDIMENTO (SQG-Q) 25

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DEMONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 27

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 29

6 REFERÊNCIAS 29

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e a frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest-UFES) passaram por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento aos objetivos do Programa. Estas alterações foram orientadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) e aprovadas pelo Comitê Interfederativo (CIF), por meio de: (1) Ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição), (2) Proposta Técnica de continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o "Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES" e (3) Ofício SEI Nº 32/2024/CTBio/DIBIO/ICMBio, Nota Técnica nº 1/2024-CTBio/DIBIO/ICMBio e Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024.

As modificações implementadas encontram-se nos seguintes Materiais Suplementares, os quais contemplam todo o período de execução do PMBA/Fest-UFES: 1) MS – Malha amostral, que apresentam as estações amostrais executadas ao longo do tempo por todos os Anexos/Temas, separados por cada marco temporal histórico mencionado acima ("Ano 1", "Transição", "Novo Ciclo" e "Deliberação 803"); 2) Frequência amostral, o qual contempla o histórico da periodicidade amostral (seguindo os mesmos Anexos/Temas contemplados no item 1) e 3) MS – Mapas históricos das malhas amostrais, que apresenta os mapas das malhas amostrais (incluindo as estações) executadas por todos os Anexos/Temas.

Segue o detalhamento temporal, como forma de esclarecer a execução dentro dos marcos históricos: "Ano 1" (setembro de 2018 e setembro de 2019); "Transição" (outubro de 2019 e julho de 2022); "Novo Ciclo" (agosto de 2022 a setembro de 2024) e "Deliberação 803" (outubro de 2024 a março de 2026). O grupo da Ecotoxicologia é uma exceção a esta historicidade, pois iniciou a amostragem referente ao "Novo Ciclo" em janeiro de 2023 e segue com a "Deliberação 803", na periodicidade já informada.

Quadro 1: Histórico da nomenclatura da malha do dulcícola integrado. As estações em negrito são aquelas vigentes no âmbito da Deliberação 803/2024.

Setores	Nome da estação	Código Original	Código Atual (Deliberação 803/24*)	Abrangência Temporal
Lagoas	**Lagoa do Areal**	**E24**	**LAL 01**	**setembro/18 a março/26*** **
	Lagoa do Areal	E24L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Laguna Monsarás	E25a	N/A	outubro/18 a julho/22
	Laguna Monsarás	**E25**	**LMN 02R**	**outubro/18 a março/26*** **
	Laguna Monsarás	E25L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lagoa Cacimbas	**E27**	**E27**	**agosto/22 a março/26*** **
	Lagoa Cacimbas	E27L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lagoa Areão	E23	N/A	outubro/18 a setembro/19
Lagos	**Lago do Limão/Colatina- ES**	**E18**	**LLM 03R**	**outubro/18 a julho/22 outubro/24 a março/26*** **
	Lago Nova	**E19**	**LNV 02R**	**outubro/18 a março/26*** **
	Lago Nova	E19L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lago Juparanã	E20	N/A	outubro/18 a setembro/24
	Lago Juparanã	E20L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lago Palmas	E28	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Lago Palmas	E28L**	N/A	agosto/22 a setembro/24
Reservatórios	Calha Rio Doce – Reservatório UHE Aimorés/Aimorés-MG	ERA	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Calha Rio Doce – Reservatório UHE Aimorés/Aimorés-MG	**N/A**	**UHE AIM**	**outubro/24 a março/26*** **
	Reservatório de Mascarenhas	**ERM**	**UHE MAS**	**agosto/22 a março/26*** **
Calha	**Calha Rio Doce – Montante do reservatório UHE Mascarenhas/Baixo Guandu-ES**	**N/A**	**RDO 11**	**outubro/24 a março/26*** **
	Calha Rio Doce/Colatina-ES	**N/A**	**RDO 12**	**outubro/24 a março/26*** **
	Calha Rio Doce/Marilândia-ES	**N/A**	**RDO 14**	**outubro/24 a março/26*** **
	Calha Rio Doce/Linhares-ES	**E21**	**RDO 15**	**outubro/18 a março/26*** **
	Itapina	E0	N/A	outubro/18 a setembro/24
	Resplendor	E0a	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Povoação	E22	N/A	outubro/18 a julho/22
Foz	Calha Rio Doce/Foz – Regência-ES	E26f	N/A	agosto/22 a setembro/24
	Calha Rio Doce/Foz – Regência-ES	**E26**	**RDO 16**	**outubro/18 a março/26*** **
Tributários	**Rio Guandu/Trecho baixo**	**N/A**	**RGU 02**	**outubro/24 a março/26*** **
	Guandú	E17	N/A	outubro/18 a julho/22
	Rio Manhuaçu/Aimorés-MG	**N/A**	**RMH 01**	**outubro/24 a março/26*** **
	Rio Manhuaçu/Aimorés-MG	E2	N/A	agosto/22 a setembro/24
*** Vigência da Deliberação nº 803: a partir de outubro de 2024 (em curso)**				
**** Estações litorâneas que foram monitoradas pelos seguintes Temas: Mineralogia, Limnologia e Qualidade de água e do sedimento**				
***Março/2026 refere-se ao último período de dados coletados com resultados reportados no presente relatório.**				

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/Fest-UFES 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) e na Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024. 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-UFES a fim de determinar os indicadores.

2.1 COLETA

A coleta das amostras de água foi realizada por meio de uma garrafa de Niskin (2,8L), com montagem horizontal quando o corpo d´água apresentava correnteza ou baixa profundidade e na vertical nas demais condições. Nas estações amostrais fluviais a amostragem foi realizada superficialmente, no meio da calha do rio. Para lagos e reservatórios, a coleta de água foi realizada na superfície, nas profundidades de 1% de luz (até setembro/2024) e 1,0 m próximo ao fundo. Enquanto para lagoas e lagunas, a coleta de água foi realizada no meio da coluna d'água, até setembro/2024 e após esse período, a coleta passou a ser realizada na superfície. As amostras de água foram acondicionadas em frascos de polipropileno (1 L), previamente descontaminados. Os frascos com as amostras de água para determinação das concentrações de metal total foram armazenados refrigerados. As amostras para determinação da fração dissolvida de metais e de material particulado em suspensão (MPS) foram mantidas resfriadas até a filtração (membranas de acetato/éster de celulose 47 mm e 0,45 µm). Posteriormente, membrana e a fração dissolvida foram armazenadas refrigeradas até o momento das análises no Laboratório de Ensaio de Combustíveis – LEC da UFMG.

As coletas de sedimento de fundo foram realizadas com draga de van Veen nos rios e com draga do tipo Ekman, em lagos e reservatórios. Para lagoas e lagunas, por sua vez, a coleta de sedimento foi feita com amostrador Ekman, em solos lamosos e com draga de van Veen, em solos arenosos. Para evitar a contaminação da amostra para determinação de metais-traço foram coletadas alíquotas de sedimento úmido na parte central e superficial da amostra com colheres de plástico e acondicionadas em frascos de polipropileno (250 mL) com tampa, previamente descontaminados, em temperatura menor que zero grau.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Metais em água

As amostras de água coletadas nas estações foram analisadas, pela técnica de Espectrometria atômica com Plasma Indutivamente Acoplado com detecção por Espectrometria de Massas (ICP-MS), sob três aspectos: Metais Totais; Metais Dissolvidos; Metais no Material Particulado em Suspensão (MPS). Para

todas as amostras foram determinadas as concentrações, em µg L^{-1}, de 30 elementos: Al, As, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Hg, Ho, La, Lu, Mn, Nd, Ni, Pb, Pr, Sm, Sn, Th, Tm, U, V, Yb e Zn. Para tal utilizou-se equipamento ICP-MS da marca Agilent – Modelo 8800-QQQ. As curvas analíticas foram construídas usando-se materiais de referência rastreáveis e solventes de elevada pureza.

2.2.1.1 Metais traço totais

A fração de metais totais foi obtida pela digestão em micro-ondas da amostra adicionada de uma mistura de ácidos (HNO_3 e HCl) segundo norma EPA3515A.

2.2.1.2 Metais traço particulados

A fração de metais em MPS foi obtida pela digestão da membrana utilizada na filtração da amostra para a análise de metais dissolvidos, em micro-ondas da amostra adicionada de uma mistura de ácidos (HNO_3, HCl, HF e H_2O_2), seguida de uma neutralização do HF com solução saturada de ácido bórico. Este procedimento segue a norma EPA3052.

2.2.1.3 Metais traço dissolvidos

A fração de metais dissolvidos foi obtida no filtrado em membrana de 0,45 µm da amostra coletada. A análise foi feita de forma direta.

2.2.2 Metais em sedimento

As amostras de sedimentos coletadas nas estações foram analisadas, pela técnica de Espectrometria Atômica com Plasma Indutivamente Acoplado com detecção por Espectrometriade Massas (ICP-MS), sob o aspecto de Matais Totais.

A fração de metais totais foi obtida pela digestão em forno micro-ondas da amostra adicionada de uma mistura de ácidos (HNO_3, HCl, HF e H_2O_2), seguida de uma neutralização do HF com solução saturada de ácido bórico, conforme metodologia EPA 3052.

Para todas as amostras foram determinadas as concentrações, em ppm ou mg kg^{-1}, de 30 elementos: Al, As, Ba, Cd, Ce, Co, Cr, Cu, Dy, Er, Eu, Fe, Gd, Hg, Ho, La, Lu, Mn, Nd, Ni, Pb, Pr, Sm, Sn, Th, Tm, U, V, Yb e Zn. Para tal, utilizou-se equipamento ICP-MS da marca Agilent –Modelo 8800-QQQ. As curvas analíticas foram construídas usando-se materiais de referência rastreáveis e solventes de elevada pureza.

2.2.3 Orgânicos em sedimento

2.2.3.1 Bifenilos policlorados – PCBs

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a um detector de captura de elétrons (GC-ECD), conforme sugerido pela USEPA 8082A.

Metodologia de Preparo de Amostra

A metodologia de preparo de amostras para análise de PCBs baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), sendo este realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos presentes na amostra, entre cada batelada, a solução foi centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra). O processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/24 e, depois disso, em triplicata.

Metodologia de Análise

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise cromatográfica dos 7 analitos, um padrão interno e dois surrogates, necessitou-se de um tempo de eluição de duas horas por amostra. O tratamento de dados requereu a conferência manual da integração de cada um dos picos.

A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e as concentrações foram reportadas em μg kg^{-1}.

2.2.3.2 Pesticidas

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a um detector de captura de elétrons (GC-ECD), conforme sugerido pela USEPA 8082A.

Metodologia de Preparo de Amostra

A metodologia para análise de Pesticidas baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), o procedimento de extração foi realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos presentes na amostra, entre cada batelada, a solução é centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra). O processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/24 e, depois disso, em triplicata.

Metodologia de Análise

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise dos 11 analitos, um padrão interno e dois surrogates, necessitou-se um tempo de eluição de duas horas por amostra. O tratamento de dados requereu a conferência manual da integração de cada um dos picos.

A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e as concentrações foram reportadas em µg kg^{-1}.

2.2.3.3 Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos – HPAs

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (GC-MS), conforme sugerido pelo protocolo USEPA 8270D.

Metodologia de Preparo de Amostra

A metodologia para análise de HPA's baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), o procedimento de extração foi realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos presentes na amostra, entre cada batelada, a solução foi centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra), processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/2024 e, depois disso, em triplicata.

Metodologia de Análise

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise cromatográfica dos 16 analitos, os seis padrões internos e um surrogate, necessitou-se tem um tempo de eluição de uma hora por amostra, onde as áreas de cada pico foram quantificadas manualmente.

A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e os resultados foram reportados em µg kg^{-1}.

2.2.3.4 Fenóis

As amostras de sedimentos coletadas nas estações, previamente liofilizadas, foram submetidas a extração por Ultrassom, conforme sugerido pelo protocolo USEPA 3550C, e analisadas pela técnica de cromatografia gasosa acoplada a espectrometria de massas (GC-MS), conforme sugerido pelo protocolo USEPA 8270D.

Metodologia de Preparo de Amostra

A metodologia para análise de Fenóis baseou-se em um processo de extração por Ultrassom, em que foram utilizados 1 g da amostra liofilizada e masserada de sedimento, acrescido de aproximadamente 1 g de sulfato de sódio. A extração foi realizada por 15 minutos com acetona e n-hexano (1:1), o procedimento de extração foi realizado três vezes visando garantir solubilização completa dos analitos

presentes na amostra, entre cada batelada, a solução foi centrifugada por 10 minutos e o resíduo solubilizado recolhido. Para finalizar, o resíduo solubilizado passou então pelo processo de concentração, onde foi seco em nitrogênio (10 minutos/amostra), processo de extração durou em média duas horas e foi realizado em duplicata, até outubro/2024 e, depois disso, em triplicata.

Metodologia de Análise

Para o procedimento de análise cromatográfica, o extrato final foi solubilizado com n-hexano e para a análise cromatográfica dos 21 analitos, os 2 padrões internos e um surrogate, necessitou-se de um tempo de eluição de uma hora por amostra, onde as áreas de cada pico foram quantificadas manualmente.

A análise quantitativa foi feita segundo o método da curva analítica utilizando-se a razão entre as áreas do analito e do padrão interno apropriado, em função da concentração do analito, e as concentrações foram reportadas em μg kg^{-1}.

2.3 INDICADORES

2.3.1 Metais em água (CWQI)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade da água foi o *Canadian Water Quality Index* (CWQI) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA Crônico para metais dissolvidos.

O cálculo deste índice leva em consideração três aspectos:

- **Escopo (F1)**: que representa o percentual de parâmetros que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, pelo menos uma vez, durante um determinado período;

$$F1 = \left(\frac{\textbf{número de parâmetros não conformes}}{\textbf{número total de parâmetros}}\right) x\ 100$$

- **Frequência (F2)** que representa o percentual de ensaios que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, durante um determinado período;

$$F2 = \left(\frac{\textbf{número de ensaios não conformes}}{\textbf{número total de ensaios}}\right) x\ 100$$

- **Amplitude (F3)** que representa a quantidade de ensaios não conformes, calculado em três etapas:

$$excursion_i = \left(\frac{\textbf{valor do ensaio não conforme}}{\textbf{limite estabelecido}}\right) - 1$$

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^{n} excursion_i}{\textbf{número de ensaios}}$$

$$F3 = \frac{nse}{0,01nse + 0,01}$$

Uma vez obtidos os valores de F1, F2 e F3, o CWQI é calculado da seguinte forma:

$$CWQI = 100 - \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732}$$

Tabela 1: Classificação da qualidade das águas segundo o índice *CWQI*.

CWQI	**Classificação**	**Observação**
95 – 100	Excelente	ausência virtual de ameaça
80 – 94	Bom	pequeno grau de ameaça
65 – 79	Razoável	ameaças ocasionais
45 – 64	Marginal	ameaça frequente
0 – 44	Pobre	ambiente ameaçado

Tabela 2: Limites de concentração estabelecidos no NOAA Crônico para metais dissolvidos em águas, utilizados nos cálculos do *CWQI*.

Elemento	**Limite (µg/L)**	**Elemento**	**Limite (µg/L)**
Al	87	Mn	80
As	150	Ni	52
Ba	3,9	Pb	2,5
Cd	0,25	V	19
Co	3	Zn	120
Cu	9		
Fe	1000		
Hg	0,77	-	-

2.3.2 Metais em sedimentos (sqg-q)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade dos sedimentos foi o Sediment Quality Guideline Quotient (SQG-q) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA PEL para metais.

Na primeira etapa são calculados os valores do Effect Range Median (ERM) individualmente para cada metal ou composto orgânico, utilizando-se a concentração obtida experimentalmente em cada coleta e o valor limite estabelecido na legislação. No caso de concentrações obtidas abaixo do limite de quantificação, foi utilizado o valor do limite de quantificação de cada elemento no cálculo.

$$ERM_i = \frac{C_i}{PEL}$$

O valor do SQG-q é obtido pela média dos valores de ERM obtidos para cada elemento:

$$SQG - q = \frac{\sum ERM_i}{n}$$

A qualidade do sedimento é mensurada segundo a classificação apresentada na Tabela 3:

Tabela 3: Classificação dos sedimentos segundo o índice *SQG-q*.

SQG-q	Classificação	Cor
< 0,1	não impactado	verde
0,1 a 1,0	moderadamente impactado	amarelo
≥ 1,0	altamente impactado	vermelho

Tabela 4: Limites de concentração estabelecidos no NOAA PEL e os respectivos limites de quantificação para cada metal em sedimentos.

Elemento	Limite de Quantificação (mg/kg)	Limite NOAA PEL (mg/kg)
As	0,4	17
Cd	0,5	3,53
Cr	0,4	90
Cu	2,4	197
Hg	0,1	0,486
Ni	0,5	36
Pb	0,5	91,3
Zn	0,9	315

2.3.3 Orgânicos em água (cwqi)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade da água foi o Canadian Water Quality Index (*CWQI*) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA Crônico para compostos orgânicos.

O cálculo deste índice leva em consideração três aspectos:

- **Escopo (*F1*)** que representa o percentual de parâmetros que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, pelo menos uma vez, durante um determinado período;

$$F1 = \left(\frac{\textbf{número de parâmetros não conformes}}{\textbf{número total de parâmetros}}\right) x\ 100$$

- **Frequência (*F2*)** que representa o percentual de ensaios que ultrapassam os limites estabelecidos na legislação, durante um determinado período;

$$F2 = \left(\frac{\textbf{número de ensaios não conformes}}{\textbf{número total de ensaios}}\right) x\ 100$$

- **Amplitude (*F3*)** que representa a quantidade de ensaios não conformes, calculado em três etapas:

$$excursion_i = \left(\frac{\textbf{valor do ensaio não conforme}}{\textbf{limite estabelecido}}\right) - 1$$

$$nse = \frac{\sum_{i=1}^{n} excursion_i}{\textbf{número de ensaios}}$$

$$F3 = \frac{nse}{0,01nse + 0,01}$$

Uma vez obtidos os valores de *F1*, *F2* e *F3*, o *CWQI* é calculado da seguinte forma:

$$CWQI = 100 - \frac{\sqrt{F1^2 + F2^2 + F3^2}}{1,732}$$

Tabela 5: Classificação da qualidade das águas segundo o índice *CWQI*.

CWQI	Classificação	Observação
95 – 100	Excelente	ausência virtual de ameaça
80 – 94	Bom	pequeno grau de ameaça
65 – 79	Razoável	ameaças ocasionais
45 – 64	Marginal	ameaça frequente
0 – 44	Pobre	ambiente ameaçado

Tabela 6: Limites de concentração estabelecidos no NOAA Crônico para compostos orgânicos em águas, utilizados no cálculo do *CWQI*.

PCBs e Pesticidas	Limite (ng/L)	Hidrocarbonetos Poliaromáticos	Limite (ng/L)	Fenóis	Limite (µg/L)
PCBs Totais	14	Acenaftileno	4840000	2-Clorofenol	490
α-BHC	2200	Acenafteno	5800	2,4-Diclorofenol	160
β-BHC	2200	Antraceno	730	2,6-Diclorofenol	0,2
γ-BHC	80	Benzo(a)antraceno	27	2,4-Dimetilfenol	100
δ-BHC	2200	Benzo(a)pireno	14	2,4-Dinitrofenol	45
DDD	11	Benzo(b)fluoranteno	9070	Dinoseb	0,05
DDE	105000	Benzo(g,h,i) perileno	7640	Fenol	320
DDT	0,5	Fenantreno	6300	4-Nitrofenol	300
Dieldrin	56	Fluoranteno	40	Pentaclorofenol	15
Endrin	36	Fluoreno	3900	2,3,4,5-Tetraclorofenol	1
DDD+DDE+DDT	0,5	Indeno(1,2,3-cd) pireno	4310	2,3,4,6-Tetraclorofenol	20
-	-	Naftaleno	1100	2,4,5-Triclorofenol	63
-	-	Pireno	25	2,4,6-Triclorofenol	20

2.3.4 Orgânicos em sedimentos (sqg-q)

O indicador de poluição utilizado para verificar a qualidade dos sedimentos foi o Sediment Quality Guideline Quotient (SQG-q) considerando-se os limites estabelecidos no NOAA PEL para compostos orgânicos.

Na primeira etapa são calculados os valores do Effect Range Median (ERM) individualmente para cada metal ou composto orgânico, utilizando-se a concentração obtida experimentalmente em cada coleta e o valor limite estabelecido na legislação. No caso de concentrações obtidas abaixo do limite de quantificação, foi utilizado o valor do limite de quantificação de cada elemento no cálculo.

$$ERM_i = \frac{C_i}{PEL}$$

O valor do SQG-q é obtido pela média dos valores de ERM obtidos para cada elemento:

$$SQG - q = \frac{\sum ERM_i}{n}$$

A qualidade do sedimento é mensurada segundo a classificação apresentada naTabela 7.

Tabela 7: Classificação dos sedimentos segundo o índice *SQG-q*.

SQG-q	Classificação	Cor
< 0,1	não impactado	verde
0,1 a 1,0	moderadamente impactado	amarelo
≥ 1,0	altamente impactado	vermelho

Tabela 8: Limites de concentração estabelecidos no NOAA PEL e os respectivos limites de quantificação para cada composto orgânico em sedimentos, utilizados nos cálculos do índice *SQG-q*.

Elemento	Limite de Quantificação (µg/kg)	Limite NOAA PEL (µg/kg)
PCB	0,25	277
γ-BHC	0,01	1,38
DDD	0,01	8,51
DDE	0,01	6,75
DDT	0,01	4,77
Dieldrin	0,01	6,67
Endrin	0,01	62,4
Acenafteno	0,1	88,9
Acenaftileno	0,1	128
Antraceno	0,1	245
Benzo(a)antraceno	0,1	385
Benzo(a)pireno	0,2	782
Criseno	0,1	862
Dibenzo(a,h)antraceno	0,2	135
Fenantreno	0,2	515
Fluoranteno	0,2	2355
Fluoreno	0,1	144
Naftaleno	0,1	391
Pireno	0,2	875

2.4 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

De acordo com a Proposta Técnica do Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES, as seguintes exclusões ocorreram no escopo do tema:

- Isótopos e análise elementar no MPS;
- Todas as análises de orgânicos em água, a saber: éter-aminas, aminas, bifenilos policlorados (PCBs), pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), hidrocarbonetos alifáticos, esteróis e fenóis;
- Análises de lipídios totais, ácidos graxos, éter-aminas, aminas, esteróis e hidrocarbonetos alifáticos em sedimentos;
- Metais biodisponíveis e extrações sequenciais em sedimentos.

Durante o monitoramento do PMBA/Fest-UFES, constatou-se que os parâmetros e análises mencionados anteriormente não apresentavam correlação com o material ligado ao desastre (MLD). Diante disso, optou-se por excluí-los, com o objetivo de otimizar o processo analítico.

Além disso, a metodologia adotada para as análises das amostras de sedimento, referentes a bifenilos policlorados (PCBs), pesticidas, hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs) e fenóis, foi modificada a partir das coletas realizadas em agosto de 2022 (Novo Ciclo do PMBA). A extração por Soxhlet foi substituída pela extração por ultrassom, metodologia também prevista na norma USEPA 3550C.

Para o cálculo dos índices, a partir deste relatório, as estações da Laguna Monsarás (E25a, LMN 02RL, LMN 02R) passaram a adotar o padrão costeiro como referência, em função de sua reclassificação para a categoria de águas salobras, implicando na utilização de limites específicos associados a esse tipo de ambiente.

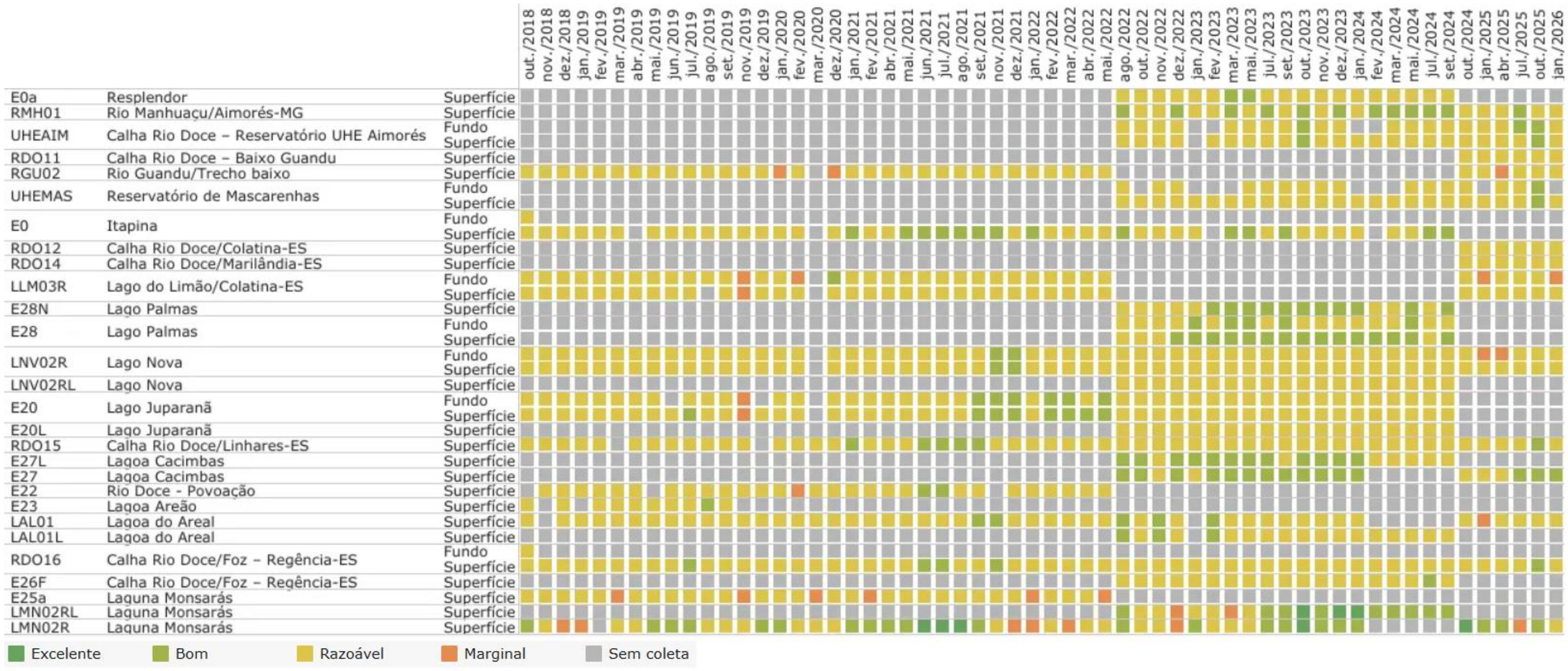
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest-UFES 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-UFES 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.

3.1 METAIS EM ÁGUA (CWQI)

Figura 1: Evolução dos índices de poluição CWQI para metais dissolvidos em água, calculados com os limites estabelecidos no NOAA Crônico, entre outubro de 2018 e janeiro de 2026, para diferentes pontos de coleta. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1, sendo que os períodos sem coleta podem estar relacionados à descontinuidade da estação ou à impossibilidade de realização das coletas. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19 e para as estações E20, E0a e E26F, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.



Os valores do índice CWQI para metais dissolvidos na água, obtidos ao longo das diferentes campanhas e setores do PMBA/Fest-UFES, estão ilustrados na Figura 1. Esses dados revelam a evolução da qualidade da água nos distintos ambientes dulcícolas avaliados. De modo geral, observa-se uma predominância de classificações consideradas razoáveis (65–79), exceto pelo destaque do lago Palmas (E28 e E28L) – Superfície e a lagoa Cacimbas (E27 e E27L) – Superfície, que apresentaram índices classificados como bons (80–94) durante a maior parte do período analisado, bem como da laguna Monsarás (LMN 02RL e LMN 02R) – Superfície que apesar de uma distribuição equilibrada entre os demais indicadores, apresentou pontos com qualidade de água excelentes (>94). Considerando todos os setores, a grande maioria dos pontos definidos com qualidade marginal, nos quais a ameaça a qualidade da água é considerada frequente, foram predominantemente identificados em períodos chuvosos. Observa-se que a estação chuvosa do Ano 2, em comparação com o período seco do ano anterior, bem como a do Ano 3, apresentou resultados mais desfavoráveis do que os períodos de seca para a maioria dos setores avaliados. Além dessa tendência geral, verificam-se variações pontuais ao longo do tempo. Destacam-se, por exemplo, a melhoria dos índices no período seco do Ano 6 para o rio Manhuaçu (RMH 01) e, no Ano 3, para as superfícies das estações de Povoação (E22), Linhares (RDO 15) e Itapina (E0), além de melhorias adicionais nesta última estação nos Anos 5 e 6. Entretanto, não se identifica um padrão sazonal consistente para todas as estações, uma vez que também são observadas melhorias pontuais durante períodos chuvosos em alguns corpos hídricos lênticos, como o Lago Nova (LNV 02R) no Ano 4 e a Lagoa Cacimbas (E27L) ao longo do Ano 6. Situação semelhante é observada nos reservatórios, onde a maioria dos pontos classificados com boa qualidade ocorreu em períodos chuvosos. Essas variações podem estar associadas, entre outros fatores, ao efeito de diluição promovido pelas cheias.

Os principais metais que contribuíram para a redução dos índices de qualidade da água na região estudada foram o bário e o alumínio, detectados acima dos valores de referência em 92,34% e 21,20% das amostras analisadas, respectivamente. Além desses, embora com menor frequência, também foram identificados teores superiores aos limites crônicos estabelecidos pelo NOAA para ferro (7,76% das amostras), manganês (3,48%), cobalto (1,49%), cobre (1,00%) e chumbo (0,70%). Para o cádmio, o limite estabelecido pela norma para água doce (0,25 µg/L) é inferior limite de Quantificação (LQ) do método analítico (0,5 µg/L). Assim, embora o elemento tenha sido incluído no cálculo do índice, não é possível determinar com precisão quantas amostras excederam o limite legal, pois resultados não detectados, podem ou não, corresponder a concentrações acima desse limite.

A presença de metais pesados na água representa um risco toxicológico significativo para os organismos vivos, devido à sua persistência no ambiente e à capacidade de bioacumulação ao longo da cadeia trófica (Oros, 2025). Além disso, diversos estudos abordam os efeitos ecotoxicológicos de metais pesados em organismos aquáticos, como algas e peixes. Dentre esses efeitos, destacam-se a capacidade do alumínio de induzir clorose, necrose, descolamento do córtex e amolecimento do talo em algas (Rybak et al., 2017); os danos histológicos às brânquias de crustáceos e peixes expostos a elevadas concentrações de manganês (Teixeira, 2020); e a inibição do crescimento de plantas aquáticas causada pelo chumbo (Zhan et al., 2018; Huang et al., 2018).

Analisando a variação temporal do indicador, no Ano 1, verificou-se uma predominância de índices classificados como razoáveis ao longo de todos os meses. No período chuvoso, o índice CWQI apresentou média de 72,12 ± 4,05, com variações entre 55,20 e 83,10. Os menores valores foram registrados entre dezembro de 2018 e março de 2019, quando a laguna Monsarás (LMN 02R e E25a) apresentou pontos com qualidade marginal (intervalo de 45–64). No período seco, os valores do CWQI oscilaram entre 66,70 e 92,60, com média de 74,78 ± 4,03. Nesse intervalo, foram observados índices pontuais classificados como bons nas superfícies dos setores rio Doce – Foz Regência (RDO 16) e lago Juparanã (E20), em julho de 2019 e na lagoa do Areão (E23), em agosto. Observou-se também uma elevação na qualidade da água na laguna Monsarás (LMN 02R) entre maio e julho do mesmo ano.

Durante a estação chuvosa do Ano 2, os índices oscilaram entre 61,90 e 88,40 (média de 70,68 ± 5,21), mantendo-se o predomínio de classificações razoáveis. No entanto, observa-se um aumento nos pontos de declínio dos parâmetros em relação ao mesmo período do Ano 1, com destaque para novembro de 2019. Nesse mês, três estações de monitoramento, lago do Limão (LLM 03R) e Juparanã (E20), em suas profundidades de superfície e fundo, e laguna Monsarás (E25a), apresentaram qualidade marginal. Cabe ressaltar que, em decorrência da pandemia de COVID-19, não foram obtidos dados referentes ao período seco do Ano 2 no âmbito do PMBA/Fest-UFES.

No Ano 3, os índices CWQI na estação chuvosa variaram entre 61,80 e 89,10, com média de 75,31 ± 5,32, enquanto na estiagem oscilaram de 65,20 a 100,00, com média mais elevada de 77,94 ± 6,45. Nesse período seco, a laguna Monsarás (LMN 02R) apresentou qualidade excelente, e observou-se uma tendência de melhoria na qualidade da água de superfície na calha do rio Doce (E0, RDO 15 e E22), evidenciada pela maior frequência de classificações boas. Esse comportamento pode

estar associado a não ocorrência do transporte de material inorgânico das margens para o leito, bem como à ressuspensão de sedimentos, fenômenos esses que podem ser induzidos pelas chuvas. No Ano 4, verificou-se um padrão distinto em alguns corpos hídricos, como os lagos Nova (LNV 02R) e Juparanã (E20) - Fundo, que apresentaram melhores condições no período chuvoso, possivelmente em função do efeito de diluição em ambientes lacustres. Nesse ano, o CWQI apresentou média de 74,70 ± 5,97 no período chuvoso, com variação entre 59,20 e 85,90, e de 76,30 ± 4,49 no período seco, com valores entre 64,00 e 89,40.

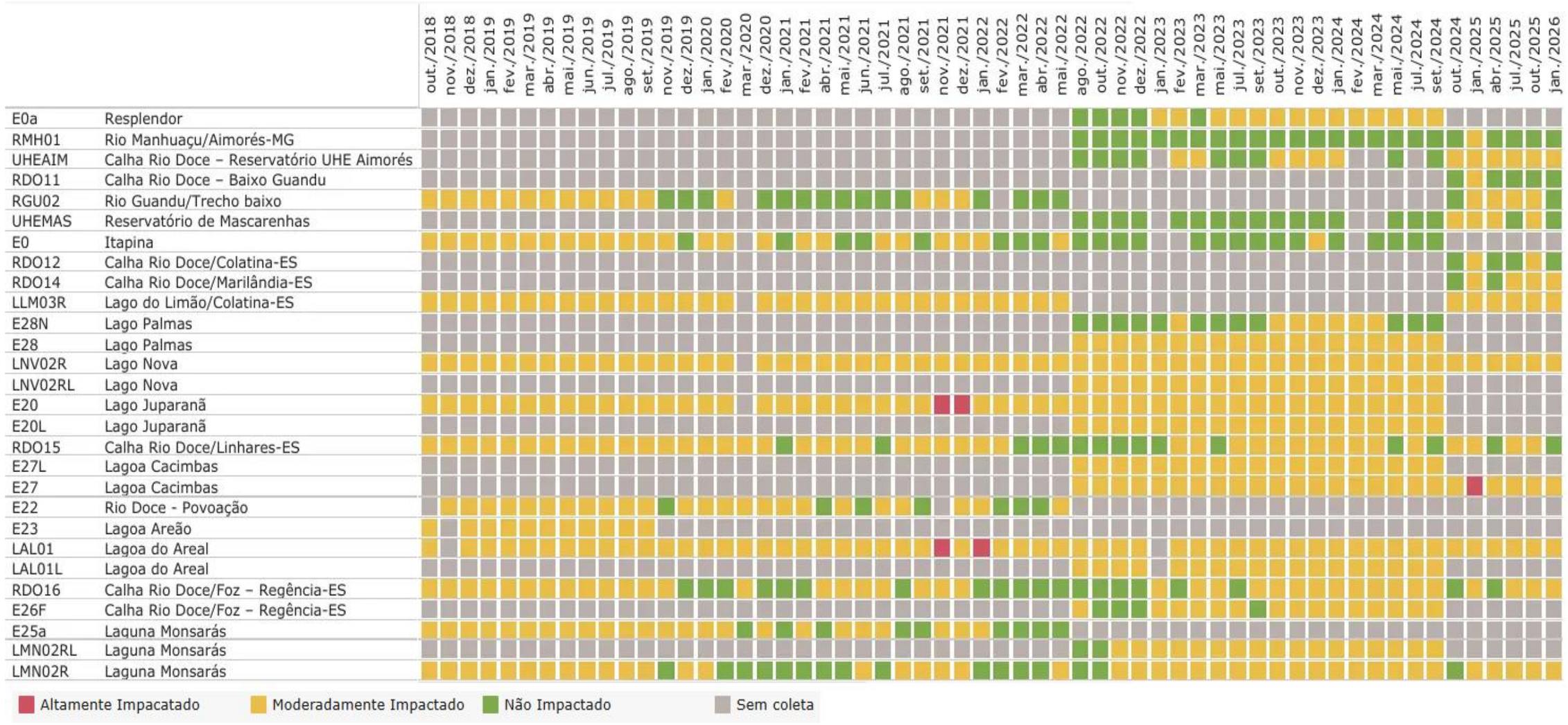
No Ano 5, o CWQI variou de 59,40 a 92,50 no período chuvoso, com média de 75,57 ± 4,96, e de 65,10 a 86,30 na estiagem, com média de 77,51 ± 4,08. Destacaram-se, nesse período, os pontos de superfície do lago Palmas (E28 e E28L) e da lagoa Cacimba (E27 e E27L), que apresentaram predominantemente índices classificados como bons. Em contrapartida, a laguna Monsarás (LMN 02R e LMN 02RL) apresentou desempenho inferior, sendo a única a registrar qualidade marginal. No Ano 6, os valores oscilaram entre 69,70 e 100,00 no período chuvoso (média de 77,59 ± 6,23) e entre 67,90 e 92,20 no período seco (média de 77,50 ± 4,21). Em relação ao ano anterior, observou-se melhora na qualidade da água do rio Manhuaçu (RMH 01), além da manutenção de índices bons nas superfícies do lago Palmas (E28 e E28L). Por outro lado, houve ocorrência de classificações razoáveis na lagoa Cacimba (E27L), especialmente durante a estiagem. Já a laguna Monsarás (LMN 02RL e LMN 02R) apresentou desempenho satisfatório ao longo de todo o ano.

Durante o Ano 7, além da predominância de classificações razoáveis, foram retomados pontos com qualidade marginal. A média do índice no período chuvoso foi de 73,95 ± 6,56, variando de 60,60 a 100,00 e no período seco, foi de 74,02 ± 6,07, com valores entre 56,6 e 83,3. A elevação dos índices de precipitação mensal em 2024, em relação a 2023, para o estado do Espírito Santo durante o período chuvoso (INCAPER, 2025), pode explicar a queda no índice CWQI, a qual pode estar associada à ressuspensão de sedimentos provocada pelas chuvas mais intensas, bem como a um maior transporte de material inorgânico das margens para o leito dos corpos hídricos. Para as estações E20, E0a e E26F, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024. Por fim, no Ano 8, a média do indicador foi de 75,59 ± 5,95, com valores variando entre 59,10 e 87,20. Destaca-se que, embora os reservatórios tenham apresentado inicialmente índices de boa qualidade da água, essa condição não se manteve ao longo do período. Ao final do estudo, observa-se o retorno da lagoa Cacimbas (E27) a classificações boas, enquanto, de modo geral, lagos, rios tributários e pontos da calha mantiveram predominância de classificações razoáveis.

Ao avaliar o impacto por setores com base na média do indicador ao longo dos oito anos, as lagoas apresentaram melhor qualidade da água (76,73 ± 8,84), seguidas por reservatórios (76,17 ± 3,09) e lagos (75,29 ± 4,31). Por outro lado, os pontos localizados na foz registraram a menor média do índice (73,90 ± 3,53). Entre os tributários, o rio Manhuaçu (RMH 01) destacou-se com os melhores índices, e, na calha do rio Doce, Itapina (E0) – Superfície, apresentou maior frequência de classificações boas. Quanto à profundidade, os lagos mostraram tendência pontual de melhor qualidade na superfície, ao passo que, nos reservatórios, não houve diferenças significativas entre superfície e fundo.

3.2 METAIS EM SEDIMENTOS (SQG-Q)

Figura 2: Evolução dos índices de poluição SQG-q para metais totais em sedimentos, calculados com os limites estabelecidos no NOAA PEL, entre outubro de 2018 e janeiro de 2026, para diferentes pontos de coleta. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1, sendo que os períodos sem coleta podem estar relacionados à descontinuidade da estação ou à impossibilidade de realização das coletas. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19 e para as estações E20, E0a e E26F, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.



Os resultados referentes aos indicadores de poluição por metais totais nos sedimentos, analisados em diferentes setores ao longo dos Anos do PMBA/Fest-UFES, estão representados na Figura 2. De forma geral, durante o período de monitoramento, predominaram índices de impacto moderado (0,1–1,0), seguidos por uma quantidade expressiva de índices não impactados (<0,1) e poucos casos de impacto elevado (>1,0). Os episódios mais críticos, caracterizados por condições de ameaça severa, concentraram-se, exclusivamente, durante os períodos chuvosos, sendo no lago Juparanã (E20) e a lagoa do Areal (LAL 01) no Ano 4 e na lagoa Cacimbas (E27), no ano 7. Esse comportamento evidencia a influência sazonal sobre o indicador, que apresentou majoritariamente, médias ligeiramente mais elevadas nos períodos chuvosos em comparação aos secos ao longo dos anos avaliados. Os valores mais elevados do índice SQG-q nesses pontos estão associados ao aumento das concentrações de arsênio, cromo, níquel e mercúrio observadas nesses períodos. A ocorrência desses metais nos sedimentos contribui para a predominância de índices classificados como moderadamente impactados ao longo de todo o período, embora, na maioria dos casos, em níveis menos intensos. Nesse contexto, o arsênio destacou-se por exceder o limite PEL do NOAA em 14,32% das amostras, seguido pelo cromo (8,08%), níquel (4,90%) e mercúrio (1,35%).

Quanto à variação temporal, no primeiro ano de estudo, os sedimentos de todos os setores foram classificados como moderadamente impactados. Durante o período chuvoso, os índices variaram de 0,12 a 0,87, com média de 0,34 ± 0,21. Já no período seco, os valores oscilaram entre 0,11 e 0,79, apresentando média de 0,32 ± 0,18. No segundo ano, cujos dados abrangem apenas os meses de novembro de 2019 a março de 2020 (período chuvoso), observou-se a manutenção da predominância da classificação moderadamente impactado, com índices entre 0,07 e 0,83 e média de 0,24 ± 0,20. Contudo, alguns pontos apresentaram boa qualidade ambiental, sendo classificados como não impactados. Essa condição pode estar associada à lixiviação de metais induzida pelas chuvas, especialmente em ambientes como o rio Doce, o rio Guandu (RGU 02) e a laguna Monsarás (LMN 02R), onde o arraste de materiais ricos em minerais pode ter contribuído para a melhoria da qualidade dos sedimentos. Não há reporte de resultados entre os meses de abril e novembro de 2020, devido as coletas terem sido interrompidas por conta da pandemia da COVID-19.

No Ano 3 do programa PMBA/Fest-UFES, os sedimentos foram predominantemente classificados como moderadamente impactados, com valores de SQG-q variando entre 0,07 e 0,77 (média de 0,24 ± 0,21) no período chuvoso, e entre 0,07 e 0,76 (média de 0,21 ± 0,17) no período seco. Apesar dessa classificação geral, observou-se uma redução gradual do impacto nos sedimentos ao longo do tempo, especialmente para os pontos na calha do rio Doce, no rio Guandu (RGU 02) e na laguna Monsarás (LMN 02R e E25a). Essa tendência de melhora nos índices de qualidade pode estar relacionada ao processo contínuo de arraste e lixiviação dos metais presentes nos sedimentos, promovido pelas chuvas e pela dinâmica hidrológica local.

No Ano 4 do monitoramento, os valores do indicador SQG-q variaram entre 0,07 e 1,50 no período chuvoso, com média de 0,34 ± 0,34, e entre 0,06 e 0,86 no período seco, com média de 0,19 ± 0,17. Observa-se um padrão semelhante ao identificado no Ano 3, com predominância de classificação moderadamente impactada. No entanto, conforme já mencionado, durante o período chuvoso, algumas regiões apresentaram níveis mais severos de impacto, elevando os índices para a categoria altamente impactado. Os limites de concentração estabelecidos pelo NOAA PEL em água doce para os elementos arsênio, cromo e níquel são de 17 mg/kg, 90 mg/kg e 36 mg/kg, respectivamente. Na lagoa do Areal (LAL 01), nesses períodos altamente impactados, foram registrados valores de até 144,37 mg/kg para arsênio e 209,17 mg/kg para cromo. Já no lago Juparanã (E20), as concentrações chegaram a de 29,46 mg/kg para arsênio, 204,49 mg/kg para cromo e 94,67 mg/kg para níquel. Esse fenômeno pode estar relacionado ao intenso volume de chuvas, que promove a ressuspensão de material do fundo ou a transferência de sedimentos das margens para o corpo hídrico, contribuindo para o aumento das concentrações de metais nos sedimentos.

No Ano 5, o período chuvoso apresentou predominantemente, uma combinação de índices não impactados em reservatórios e rios, e moderadamente impactados em lagos e lagoas. Uma exceção foi observada no lago Palmas (E28N), que manteve classificação não impactada. Ao comparar os dados entre os regimes hidrológicos, observa-se que ambos os períodos apresentaram uma média comum de 0,19 ± 0,14, sendo que o período chuvoso variou de 0,06 a 0,76, e o seco foi de 0,06 a 0,70, indicando baixa variação nos níveis de impacto ao longo desse ano. No Ano 6, os valores do índice

SQG-q variaram entre 0,07 e 0,71 no período chuvoso, com média de 0,24 ± 0,15, e entre 0,07 e 0,42 no período seco, com média de 0,17 ± 0,09. A redução do impacto negativo na qualidade dos sedimentos durante o período de estiagem foi especialmente evidente em locais como o reservatório de Aimorés (UHE AIM), o rio Doce – Linhares (RDO 15) e o lago Palmas (E28L), que apresentaram melhora nos índices ao longo do Ano 6.

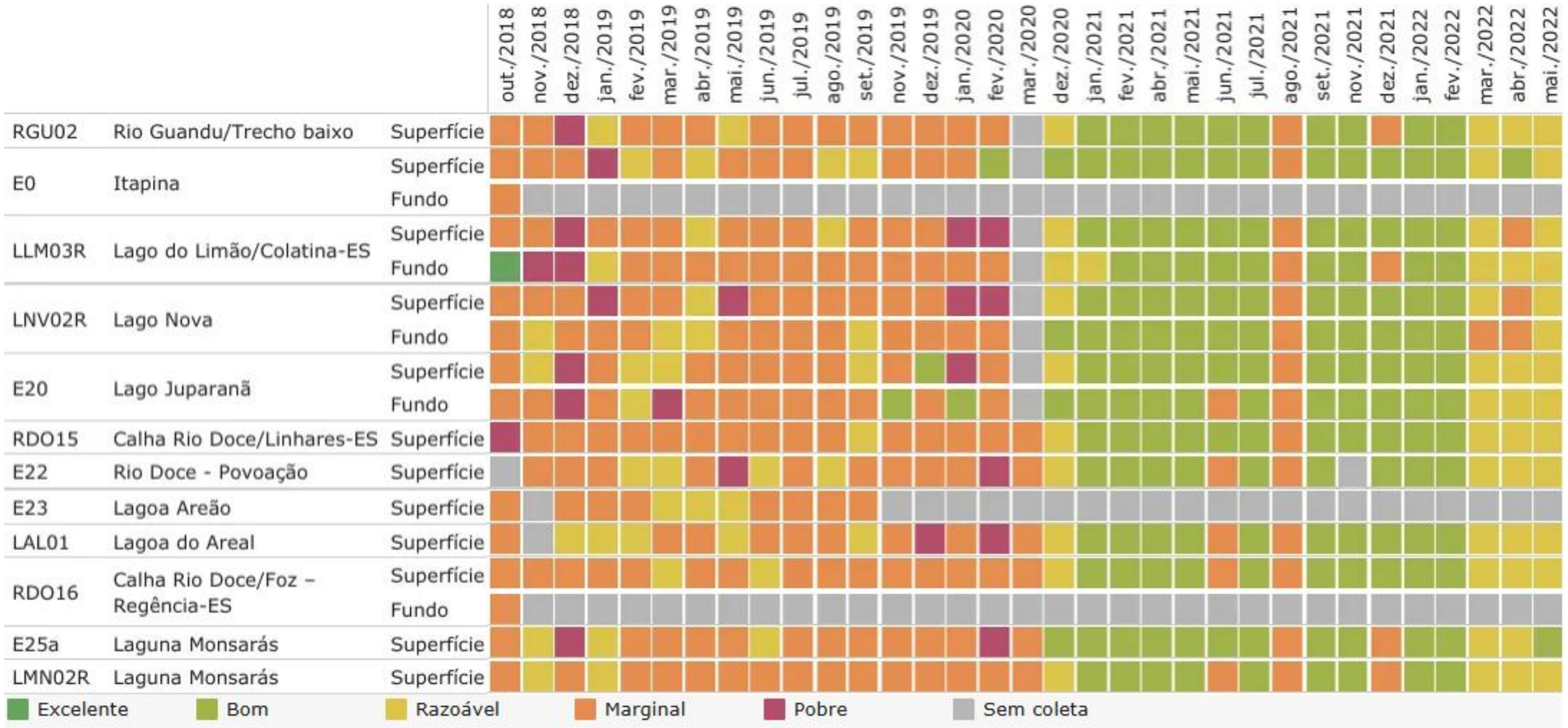
Esse comportamento parecia sugerir uma possível estabilização ou recuperação gradual da qualidade sedimentar nesses ambientes. Entretanto, no período chuvoso do Ano 7, observou-se um retorno da classificação moderadamente impactada para o reservatório Aimorés (UHE AIM) e para a estação Linhares (RDO 15), da calha do rio doce. Como ponto de declínio, destacou-se ainda, a lagoa Cacimbas (E27), a qual apresentou uma qualidade altamente impactada após um longo período de índices moderadamente impactados, bem como o reservatório Mascarenhas (UHE MAS) e o rio Manhuaçu (RMH 01), com resultados nunca impactados até então. Para o ponto E27, além do arsênio e do cromo, também foi identificado mercúrio, em teor 22% superior ao estabelecido na legislação. O índice SQG-q variou de 0,07 a 1,70, com média de 0,37 ± 0,34 para o período chuvoso, enquanto no período seco, os resultados variaram de 0,07 a 0,98, com média de 0,23 ± 0,24. Em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024, após outubro/2024, não foram realizadas coletas para as estações E20, E0a e E26F. No período chuvoso do Ano 8, observou-se a manutenção das condições registradas na estiagem do ano anterior para a maioria dos pontos estudados. A média do índice foi de 0,24 ± 0,18, com variações entre 0,08 e 0,60. Destaca-se a consistência de bons índices nos sedimentos do rio Manhuaçu (RMH 01) e na calha, em Baixo Guandu (RDO 11). Na análise por setores, levando em consideração apenas esse último período, com exceção dos tributários, predominantemente não impactados, todos os demais, apresentaram classificação moderadamente impactada.

Considerando a média do indicador ao longo dos oito anos de estudo, observa-se que os ambientes lóticos (tributários, calha e foz) apresentaram, de modo geral, melhor qualidade sedimentar em comparação aos ambientes lênticos (reservatórios, lagos e lagoas). Entre os ambientes lóticos, os tributários destacaram-se com os melhores valores médios (0,10 ± 0,05), seguidos pela foz (0,12 ± 0,04) e pela calha do rio Doce (0,13 ± 0,05). Em contraste, as lagoas apresentaram os maiores índices do indicador (0,36 ± 0,26), refletindo pior qualidade sedimentar. Dentre os pontos avaliados, o rio Manhuaçu (RMH 01) evidenciou os melhores índices ao longo do período analisado, enquanto a lagoa do Areal (LAL 01) apresentou a pior condição sedimentar. Essas diferenças podem ser explicadas pelos processos hidrodinâmicos característicos de cada ambiente. Em sistemas lóticos, o fluxo contínuo da água favorece o transporte de partículas, enquanto eventos de maior vazão atuam como mecanismos naturais de remoção de contaminantes. Por outro lado, ambientes lênticos, devido à sua baixa circulação hídrica, tendem a apresentar maior deposição e acúmulo de sedimentos finos e contaminantes, o que contribui para a degradação da qualidade sedimentar ao longo do tempo.

Diante dos resultados apresentados, pode-se afirmar que a presença de metais, especialmente arsênio, cromo e níquel, tem exercido uma influência negativa persistente sobre a qualidade dos sedimentos estudados, evidenciada pela predominância de índices moderadamente impactados ao longo dos anos.

3.3 ORGÂNICOS EM ÁGUA (CWQI)

Figura 3: Evolução dos índices de poluição CWQI para compostos orgânicos em água, calculados com os limites estabelecidos no NOAA Crônico, entre outubro de 2018 e maio de 2022, para diferentes pontos de coleta. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1, sendo que os períodos sem coleta podem estar relacionados à descontinuidade da estação ou à impossibilidade de realização das coletas. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19.



A Figura 3 ilustra a evolução do índice de poluição CWQI para compostos orgânicos em água, considerando os diferentes setores abrangidos pelo PMBA/Fest-UFES entre os Anos 1 e 4. De forma geral, os resultados revelam uma variabilidade nos valores do indicador, porém é possível identificar dois padrões distintos ao longo do período analisado: até o Ano 2, predominam classificações marginais (45–64), enquanto a partir do Ano 3, observa-se uma prevalência de classificações boas (80–94). Essa variação nos resultados pode estar associada tanto a fatores antrópicos, como alterações no uso e ocupação do solo, quanto ao número elevado de analitos considerados na composição do índice, o que contribui para a sensibilidade e complexidade da avaliação.

No Ano 1, foi registrado um único ponto com qualidade de água classificada como excelente (95–100) em todo o período do estudo, localizado no lago do Limão (LLM 03R) – Fundo, no mês de outubro de 2018. Durante o período chuvoso, os valores do índice CWQI variaram entre 42,20 e 100,00, com média de 54,29 ± 10,62. No período seco, os indicadores oscilaram entre 41,70 e 79,50, com média de 56,93 ± 9,57. O comportamento observado no período chuvoso do Ano 2 foi semelhante, com valores entre 43,20 e 87,20 e média de 53,15 ± 10,03. Para esses dois primeiros anos, ao comparar os resultados em função do regime de chuvas, nota-se uma maior concentração de classificações pobres (<45) nos períodos de maior precipitação, o que pode estar relacionado ao arraste de poluentes pelas águas pluviais para os diferentes ambientes aquáticos. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19.

Especialmente nos dois primeiros anos do estudo, evidencia-se a influência significativa dos contaminantes orgânicos na qualidade da água. Compostos fenólicos, como 2,3,4,5-tetraclorofenol, 2,6-diclorofenol e dinoseb, foram detectados em concentrações superiores aos limites de referência estabelecidos pelo NOAA para exposição crônica em todas as amostras analisadas. Adicionalmente, pesticidas como o DDT e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPAs), incluindo benzo[a]pireno e pireno, excederam os valores de referência em 50,22%, 21,81% e 16,41% das amostras, respectivamente. Outros compostos orgânicos também foram identificados acima dos limites estabelecidos pelo NOAA, como o pentaclorofenol e o 2,3,4,6-tetraclorofenol, presentes em 7,52% e 3,76% das amostras. De forma geral, esses contaminantes destacam-se como os principais responsáveis pela redução dos índices de qualidade da água (CWQI) observada ao longo do estudo, indicando a persistência de pressões antrópicas e a necessidade de ações contínuas de controle e monitoramento.

Contaminantes orgânicos podem provocar efeitos adversos em variados grupos de organismos aquáticos e considerando que esses compostos tendem a se acumular nos tecidos biológicos e a sofrer biomagnificação ao longo da cadeia trófica, é esperado que os predadores situados no topo da cadeia sejam, geralmente, os mais impactados pela exposição (Cavalcanti, 2020). A toxicidade de pesticidas em organismos vivos aquáticos, por exemplo, tem sido amplamente investigada e entre os resultados constatou-se que a exposição a esses compostos pode resultar em um aumento severo na biomassa de algas (Mustafa, et al., 2024) e em condições de exposição crônica, provocar impactos letais em peixes, bem como uma série de efeitos adversos, incluindo anormalidades no desenvolvimento, carcinogenicidade e mutagênese nesses organismos (Rohani, 2023).

A melhoria geral na qualidade da água observada nos Anos 3 e 4 do programa PMBA/Fest-UFES pode estar associada às restrições impostas pela pandemia da COVID-19, que resultaram na redução ou paralisação de atividades agrícolas e industriais, fontes potenciais de poluentes como PCBs, HPAs e fenóis (Medeiros & Vasconcellos, 2023; Sisinno *et al.*, 2003). No Ano 3, os valores médios do índice CWQI foram de 82,95 ± 4,95 no período chuvoso e 78,21 ± 14,68 no período seco, indicando uma tendência positiva. No entanto, destaca-se uma interrupção nessa evolução no mês de agosto de 2021, quando todos os setores analisados apresentaram classificação marginal, sugerindo uma possível influência pontual de fatores externos ou eventos específicos que comprometeram temporariamente a qualidade da água.

No Ano 4, os valores do índice CWQI variaram entre 50,20 e 86,00 no período chuvoso, com média de 78,83 ± 8,02, e entre 62,90 e 82,00 no período seco, com média de 73,71 ± 5,20. Nos três últimos meses de monitoramento, a partir de março de 2022, houve uma predominância de classificações razoáveis (65–79), contrastando com os resultados mais positivos observados anteriormente. Essa piora observada nos valores do CWQI pode estar associada ao contexto de flexibilização das restrições impostas pela pandemia de COVID-19 e o retorno progressivo à normalidade de atividades produtivas, fortalecendo ainda mais a relação do índice com atividades antrópicas. Com o início do Novo Ciclo do PMBA/Fest-UFES, a partir de agosto de 2022, as análises referentes ao índice CWQI - orgânicos foram descontinuadas, não havendo atualização dos resultados desse parâmetro.

3.4 ORGÂNICOS EM SEDIMENTO (SQG-Q)

Figura 4: Evolução dos índices de poluição SQG-q para compostos orgânicos em sedimentos, calculados com os limites estabelecidos no NOAA PEL, entre outubro de 2018 e janeiro de 2026, para diferentes pontos de coleta. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1, sendo que os períodos sem coleta podem estar relacionados à descontinuidade da estação ou à impossibilidade de realização das coletas. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19 e para as estações E20, E0a e E26F, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.



A Figura 4 apresenta a evolução dos índices de poluição SQG-q para compostos orgânicos em sedimentos ao longo do estudo. No Ano 1 do programa PMBA/Fest-UFES, os valores médios foram bastante semelhantes entre os períodos avaliados. No período chuvoso, a média foi de 0,09 ± 0,09, com variação de 0,005 a 0,33, enquanto no período seco os valores variaram de 0,003 a 0,34, resultando em média de 0,10 ± 0,09. Esses resultados indicam um equilíbrio entre as classes moderadamente impactada (0,1–1,0) e não impactada (<0,1), padrão especialmente evidente nos pontos do lago do Limão (LLM 03R), lago Juparanã (E20) e laguna Monsarás (E25a), onde se observa igual número de registros com qualidade sedimentar não impactada e impactada ao longo do primeiro ano do estudo. Ainda assim, é possível determinar uma predominância da classificação não impactado, visto que cerca de 59,57% dos pontos amostrados apresentaram bons resultados, destacando-se os setores da calha do rio Doce (E0, RDO 15, E22, RDO 16), do rio Guandu (RGU 02) e da laguna Monsarás (LMN 02R). Em contraste, as lagoas Areão (E23) e Areal (LAL 01) apresentaram maior frequência de classificações moderadamente impactadas. No período chuvoso do Ano 2, observou-se uma melhora significativa na qualidade dos sedimentos, com todos os setores classificados como não impactados. Os indicadores variaram de 0,002 a 0,04, com média de 0,01 ± 0,02. Essa melhoria pode estar associada à lixiviação e solubilização dos contaminantes orgânicos, promovidas pelo aumento do aporte hídrico decorrente das chuvas. Entre os meses de abril e novembro/2020 as coletas foram interrompidas devido a pandemia da COVID-19.

Nos Anos 3 e 4, observou-se uma predominância de índices não impactados durante o período chuvoso, com valores variando de 0,002 a 0,12 e média de 0,03 ± 0,02 no Ano 3, e de 0,001 a 0,15 com média de 0,01 ± 0,03 no Ano 4. Apesar dessa tendência positiva, o período seco do Ano 3 apresentou deterioração da qualidade dos sedimentos em alguns pontos, com variações entre 0,005 e 0,30 e média de 0,08 ± 0,06. Destacam-se os setores do lago Nova (LNV 02R) e do lago Juparanã (E20), onde houve predominância de índices moderadamente impactados. O período seco do Ano 4 também foi marcado por uma mescla de classificações moderadamente e não impactadas, com valores entre 0,014 e 2,44 e média de 0,15 ± 0,37. Os dados sugerem que, durante esses períodos chuvosos, a solubilização e transporte dos poluentes orgânicos, pode ter promovido uma melhoria temporária na qualidade dos sedimentos. Além disso, a redução das atividades industriais e agrícolas durante a pandemia da COVID-19 também pode ter contribuído para a diminuição da entrada de contaminantes nesses ecossistemas.

Ainda no Ano 4, destaca-se a ocorrência de um índice altamente impactado na calha do rio Doce, em Resplendor (E0a), atribuída principalmente às elevadas concentrações de ɣ-BHC que atingiu 60,20 µg/kg, valor significativamente superior ao limite de tolerância de 1,38 µg/kg estabelecido pelo NOAA PEL. Além disso, foram detectadas concentrações elevadas de dicloro-difenil-tricloroetano (DDT), pesticida organoclorado, chegando a 7,05 µg/kg, também acima do limite de 4,45 µg/kg. De forma geral, os índices moderadamente impactados observados ao longo do programa PMBA/Fest-UFES podem ser atribuídos, em grande parte, a esses compostos. Historicamente, o DDT foi amplamente utilizado como inseticida em atividades agrícolas no Brasil. No caso do BHC, além de seu uso como pesticida, ele também pode ser gerado como resíduo de diversos processos industriais, contribuindo para sua presença nos sedimentos.

Nos Anos 5 e 6, foram identificados diversos pontos com classificação moderadamente impactada, possivelmente em decorrência da retomada das atividades industriais e agrícolas após a fase mais crítica da pandemia da COVID-19. No Ano 5, os valores do índice SQG-q variaram de 0,01 a 0,71, com média de 0,16 ± 0,15 no período chuvoso, e de 0,01 a 0,47, com média de 0,08 ± 0,10 no período seco. Durante o período chuvoso, destacaram-se como áreas impactadas as estações do rio Doce – Foz (E26F e RDO 16), lago Nova (LNV 02R e LNV 02RL), lago Palmas (E28) e laguna Monsarás (LMN 02R e LMN 02RL). No ano 6, os indicadores do período chuvoso variaram entre 0,03 e 0,64, com média de 0,13 ± 0,13. Já no período seco, observou-se uma redução nos valores, com média de 0,05 ± 0,09, variando de 0,001 a 0,68. Para esses dois anos, ao contrário do que foi visto para os Anos 3 e 4, vale destacar uma tendência de melhora no indicador nos períodos secos em comparação com os chuvosos para quase totalidade dos setores.

No Ano 7, o índice SQG-q apresentou média de 0,02 ± 0,02 no período chuvoso, com valores variando entre 0,001 e 0,08, e média de 0,01 ± 0,01 no período seco, com variações de 0,001 a 0,07. Observa-se, pela primeira vez no estudo, a totalidade dos pontos classificados como não impactados, consolidando a tendência de conservação da qualidade dos sedimentos verificada desde janeiro de 2024, quando a maioria dos ambientes passou a ser enquadrada nessa categoria. Cabe salientar que,

para as estações E20, E0a e E26F, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.

Por fim, no período chuvoso do Ano 8, o índice variou de 0,001 a 0,77, com média de 0,13 ± 0,20, condizendo com a retomada de pontos moderadamente impactados. Fazendo a análise por setores, a qualidade sedimentar voltou a apresentar índices comprometidos em pelo menos uma estação em todos os setores, com exceção da foz, onde o único ponto analisado, Regência (RDO 16), manteve a classificação não impactado durante todo o período.

Entre os setores avaliados, considerando a média do indicador ao longo dos oito anos de estudo, observa-se que os reservatórios (0,06 ± 0,12), seguidos dos pontos localizados na foz do rio Doce (0,07 ± 0,09) e dos rios tributários (0,07 ± 0,11), apresentaram, de modo geral, melhor qualidade sedimentar, enquanto os lagos, mostraram uma média superior entre os setores, 0,11 ± 0,14, refletindo uma pior qualidade. Dentre as estações avaliadas, o ponto da calha localizado em Colatina (RDO 12) apresentou a menor média ao longo do estudo (0,03 ± 0,03), apresentando todos os pontos com classificação não impactado, enquanto o ponto localizado em Resplendor (E0a), também da calha, apresentou a pior condição sedimentar, com média de 0,24 ± 0,54.

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

Ao longo dos anos de execução do PMBA/Fest-UFES, foram obtidos resultados consistentes, que evidenciam que a bacia do rio Doce apresenta impactos significativos. Esses impactos decorrem tanto da presença de poluentes orgânicos quanto de contaminantes inorgânicos, cujas concentrações continuam acima dos limites estabelecidos por agências internacionais, como os parâmetros de referência do NOAA para exposição crônica e PEL (*Probable Effect Level*).

Durante os anos de execução do PMBA/Fest-UFES, a análise dos índices CWQI para metais permitiu classificar, de forma geral, as águas dos ambientes dulcícolas como de qualidade razoável, ou seja, com a identificação de ameaças ocasionais, com exceção das superfícies do lago Palmas (E28 e E28L), da lagoa Cacimbas (E27 e E27L) e da laguna Monsarás (LMN 02RL), que mantiveram índices bons na maior parte do período analisado. Destaca-se a presença recorrente de bário, detectado em concentrações persistentemente elevadas em todos os ambientes monitorados, bem como do alumínio, ambos excedendo os limites estabelecidos pelo NOAA, o que contribuiu significativamente para a redução dos índices de qualidade CWQI. Os resultados mais recentes reforçam que, embora sejam identificados pontos com qualidade boa, a condição dos contaminantes metálicos em água, continua sendo uma preocupação relevante, visto que os índices ainda não se encontram estabilizados em patamares considerados sem a ausência de ameaças. Isso é evidenciado, no período chuvoso do Ano 8, pelo predomínio de índices razoáveis e pela retomada do índice marginal para o lago do Limão (LLM 03R) – Fundo.

Ainda sob a perspectiva dos contaminantes inorgânicos, a análise dos resultados do índice SQG-q para poluição sedimentar evidenciou a predominância de classificações moderadamente impactadas, seguidas por um número expressivo de registros classificados como não impactados. Contudo, ao longo do período de estudo, destacaram-se pontos com classificação altamente impactada, no lago Juparanã (E20), na lagoa do Areal (LAL 01) e na lagoa Cacimbas (E27). Nesses locais, foram observadas concentrações elevadas de arsênio, atingindo valores até dez vezes superiores aos limites estabelecidos pelo NOAA, o que ressalta a necessidade de investigações mais aprofundadas e da adoção de medidas de mitigação, em função da elevada toxicidade desse elemento. Para fins comparativos, observa-se uma tendência de melhoria na qualidade sedimentar em ambientes lóticos em relação aos lênticos ao longo do estudo. De forma semelhante ao observado para a água, os resultados mais recentes para os sedimentos indicam a persistência de condições ambientais ainda instáveis e predominantemente impactadas por compostos inorgânicos, evidenciando a necessidade de monitoramento contínuo e ações de gestão ambiental.

No que diz respeito aos contaminantes orgânicos em água, o índice CWQI apresentou alta variabilidade ao longo dos Anos 1 a 4 do programa PMBA/Fest-UFES, com dois períodos distintos: até o Ano 2, predominou a classificação marginal, enquanto a partir do Ano 3, observou-se uma prevalência de classificações boas. Durante esse intervalo, foram detectadas concentrações de compostos fenólicos, pesticidas e hidrocarbonetos policíclicos aromáticos (HPA's) acima dos limites estabelecidos pelo NOAA para exposição crônica. No entanto, houve uma redução significativa desses contaminantes durante o período da pandemia da COVID-19, reforçando a correlação direta entre a presença de poluentes orgânicos e a intensidade das atividades humanas.

A evolução dos índices de poluição SQG-q para compostos orgânicos, como pesticidas e HPA's, indica, ao longo do estudo, uma influência relativamente menor desses contaminantes nos sedimentos, quando comparada à contaminação observada para a água. No entanto, foram detectadas substâncias orgânicas cujo uso comercial é proibido, como o hexaclorociclohexano (γ-BHC) e o DDT, o que pode estar associado a fontes históricas de contaminação ligadas a atividades agrícolas e industriais. A partir de janeiro de 2024, observou-se uma tendência positiva, com a maioria dos setores sendo classificados como não impactados. Contudo, foram registradas exceções em maio de 2024 e durante o período chuvoso do Ano 8, quando alguns pontos específicos voltaram a ser enquadrados como moderadamente impactados. Esse comportamento pode evidenciar ações antrópicas pontuais, ou ainda uma variabilidade temporal dos índices, indicando incertezas quanto à sua manutenção e reforçando a necessidade de monitoramento contínuo e da implementação de ações de controle direcionadas.

De forma geral, os resultados reforçam que os contaminantes inorgânicos e orgânicos não devem ser negligenciados, uma vez que sua presença e toxicidade representam riscos significativos à biota aquática. A complexidade do monitoramento é ampliada pelo comportamento heterogêneo dos pontos amostrais, influenciado por fatores como arraste de materiais, ressuspensão de sedimentos e variações nos níveis de precipitação. Diante desse cenário, acredita-se que as áreas mais críticas e altamente impactadas devem ser priorizadas para intervenções específicas, com foco

na melhoria da qualidade da água por meio da aplicação de tecnologias avançadas, como ultrafiltração por membranas, adsorção seletiva, entre outras soluções que podem contribuir para a mitigação dos impactos ambientais na bacia do rio Doce.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todas as metas propostas para o tema Qualidade de água e sedimento foram cumpridas.

6 REFERÊNCIAS

CAVALCANTI, R.M. (2020). *Contaminantes orgânicos em ambientes aquáticos*. Imprensa universitária, UFC.

HUANG, D., QIN, X., PENG, Z., LIU, Y., GONGA, X., ZENG, G., HUANG, C., CHENG, M., XUE, W., WANG, X., HU, Z. (2018). Nanoscale zero-valent iron assisted phytoremediation of Pb in sediment: Impacts on metal accumulation and antioxidative system of Lolium perenne. *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.153, p.229–237. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2018.01.060

INCAPER (2025). Precipitação Observada - mensal e anual. *Instituto Capixaba de Pesquisa Assistência Técnica e Extensão Rural.* Disponível em:< https://meteorologia.incaper.es.gov.br/monitora_agro_sat_prec >. Acesso em: 11 ago. 2025.

MEDEIROS, A. A.; VASCONCELLOS, M. da P. (2023). Ambiente, saúde e covid-19: da crise global à existência sustentável. *Saúde de Sociedade*, 1. https://doi.org/10.1590/S0104-12902023220601pt

MUSTAFA, S.A.; AL-RUDAINY, A.J; SALMAN, N. M.(2024). Effect of environmental pollutants on fish health: An overview. *The Egyptian Journal of Aquatic Research*, v. 50, p. 225 – 233.

OROS, A. (2025). Bioaccumulation and Trophic Transfer of Heavy Metals in Marine Fish: Ecological and Ecosystem-Level Impacts, *Journal Xenobiotcs*, v, 15 (2). https://doi.org/10.3390/jox15020059

ROHANI, M.F. (2023). Pesticides toxicity in fish: Histopathological and hemato-biochemical aspects – A review. *Emerging Contaminants*, v. 9(3), p. 1–15. https://doi.org/10.1016/j.emcon.2023.100234

RYBAKA, M., KOŁODZIEJCZYKB, A., JONIAKA, T., RATAJCZAKC, I., GĄBKAD, M. (2017). Bioaccumulation and toxicity studies of macroalgae (Charophyceae) treated with aluminium: Experimental studies in the context of lake restoration, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v. 145, p. 359–366. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.07.056

SISINNO, C. L. S.; NETTO, A. D. P.; REGO, E. C. P.; LIMA, G. S. V. (2003). Hidrocarbonetos policíclicos aromáticos em resíduos sólidos industriais: uma avaliação preliminar do risco potencial de

contaminação ambiental e humana em áreas de disposição de resíduos. *Caderno Saúde Plública*, 19 (2). https://doi.org/10.1590/S0102-311X2003000200035

TEIXEIRA, M. V; Efeito Tóxico Agudo do Manganês em Formas Jovens do Camarão Marinha (litopenaeus Vannamei) e da Tilápia (oreochromis Micóticus). 2020. Dissertação. Zootecnia – Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2020.

U.S. EPA. 1996. "Method 3550C (SW-846): Soxhlet Extraction," Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. "Method 3630C (SW-846): Silica Gel Cleanup," Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. “Method 3052 (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices”. Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. “Method 3052 (SW-846): Microwave Assisted Acid Digestion of Siliceous and Organically Based Matrices” Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. 1996. “Method 3510C (SW-846): Separatory Funnel Liquid-Liquid Extraction” Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. 2007. "Method 3550C (SW-846): Ultrasonic Extraction," Washington, DC.

U.S. EPA. 2007. "Method 8041A (SW-846): Phenols by Gas Chromatography," Washington, DC.

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. 2007. “Method 8082A (SW-846): Polychlorinated Biphenyls (PCBs) by Gas Chromatography” Revision 1. Washington, DC.

U.S. EPA. 2014. "Method 8270E (SW-846): Semivolatile Organic Compounds by Gas Chromatography/ Mass Spectrometry (GC/MS)," Washington, DC.

ZHAN, J., LI, T., ZHANG, X., YU, H., ZHAO, L. (2018). Rhizosphere characteristics of phytostabilizer Athyrium wardii (Hook.) involved in Cd and Pb accumulation, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, v.148, p. 892–900. https://doi.org/10.1016/j.ecoenv.2017.11.070