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: Limnologia

RT-55/OUT 26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2026

EQUIPE TÉCNICA

Gilberto Fonseca Barroso (coordenador)

Eline Nayara Dantas da Costa

Roger Carvalho da Silva

Fernando Henrique Lemos

Júlia de Almeida Leite

Felicidade Porto Lobianco

Debora Gonçalves Barbosa

Emanuele Correa Santos

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 4

2 METODOLOGIA 6

2.1 COLETA 6

2.2 ANÁLISE 8

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 11

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 11

3.1 CLARIDADE DA ÁGUA 12

3.2 ACIDEZ/ ALCALINIDADE 14

3.3 ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA DOS ECOSSISTEMAS LACUSTRES 16

3.4 CONDIÇÃO OXIDANTE/REDUTORA DA COLUNA D'ÁGUA 17

3.5 FLUXOS DE NUTRIENTES 19

3.6 ESTADO TRÓFICO 21

3.7 TESTEMUNHO DE SEDIMENTOS EM LAGOS E LAGOAS 22

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 39

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 41

6 REFERÊNCIAS 41

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

De agosto de 2022 até setembro de 2024 as amostragens foram realizadas na malha amostral com cinco estações na calha fluvial do rio Doce (E0a, E0, E21, E26 e E26f), no rio tributário (rio Manhuaçu, E2), em três lagos, com profundidade média superior a 3,0 m (Lagos Nova – E19, Juparanã – E20 e Palmas E28) e em três lagoas, com profundidade média inferior a 3,0 m (Lagoas Areal - E24, Monsarás – E25 e Cacimbas E27). Também, foram estabelecidas estações amostrais nas represas Aimorés – ERA e Mascarenhas – ERM com localização na região mais próxima das barragens, respeitando a zona de segurança para navegação nos reservatórios. Não há amostragem na zona litorânea das represas.

A estação amostral do rio Guandú (E17) havia sido descontinuada devido aos elevados valores de material particulado em suspensão e turbidez que dificultam o uso dessa estação como ambiente fluvial de referência. Em substituição foi incluído o rio Manhuaçu (E2). Na calha fluvial do rio Doce as estações amostrais haviam sido ampliadas para cinco, sendo implementada uma estação à montante da represa de Aimorés (rio Doce em Resplendor, MG - E0a) para servir como referência ao material carreado pelo rio antes da potencial retenção de materiais pelas represas (Aimorés e Mascarenhas). À jusante das barragens, o monitoramento foi desenvolvido na estação de Itapina, Colatina/ES - E0, que serviu como comparação para as condições da estação de Resplendor. A próxima estação à jusante é Linhares – E21, que é monitorada desde outubro de 2018, servindo como referência para estimativa dos fluxos hidrológicos de sedimentos, nutrientes e metais. A estação E22, intermediária entre Linhares – E21 e Regência – E26, havia sido descontinuada devido às dificuldades de acessibilidade durante o período de baixa vazão fluvial e os impedimentos de navegação, devido aos extensos bancos de areia na calha do rio Doce. A estação de Regência – E26 continua em monitoramento desde outubro de 2018. Uma nova estação amostral foi estabelecida em área de remanso próximo da desembocadura do rio Doce no mar (E26F). Essa estação está sujeita à intrusão da cunha salina e, portanto, foi considerada um importante sítio para dissolução e precipitação de elementos químicos dissolvidos na água, além de possibilitar a deposição de sedimentos finos.

Em relação aos ecossistemas lacustres, devido a impedimentos para acesso à propriedade, a estação da Lagoa Areão - E23 havia sido descontinuada a partir de setembro de 2019. Em substituição a Lagoa

Areão, foi inserida a Lagoa Cacimbas (E27), localizada a cerca de 5 km a oeste da Vila de Regência. A Laguna Monsarás é monitorada desde outubro de 2018, porém, a estação E25a no canal de conexão entre as Lagoas do Martins e Monsarás foi descontinuada. Quanto aos lagos, a partir de agosto de 2022 a estação do Lago Limão– E18 foi descontinuada e substituída pela estação E28 no Lago Palmas que, também, foi descontinuado a partir de outubro de 2024. O Lago Palmas, embora também tenha conexão fluvial com o rio Doce por córrego de drenagem, é bastante profundo ($Z_{máx}$ = 50,0m e $Z_{méd}$ = 21,4m) e, portanto, representa um importante ecossistema de referência, sobretudo pela considerável extensão da coluna d'água e condições favoráveis para deposição de sedimentos no fundo da bacia lacustre (Barroso *et al.*, 2014).

De agosto de 2022 a setembro de 2024 a zona litorânea dos lagos e lagoas vinha sendo amostrada em profundidade de meia água, bem como o compartimento de sedimentos. A amostragem na zona litorânea deve-se as condições de menor profundidade, coluna d'água potencialmente toda iluminada e proximidade do sedimento, promovendo um ambiente físico e químico distinto para as comunidades de macrófitas aquáticas, perifíton e zooplâncton.

A partir de outubro de 2024 as amostragens foram realizadas na malha amostral referente a Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024, com pontos de coleta distribuídos em seis setores: Tributários - rio Manhuaçu (RMH 01), rio Guandú (RGU 02); Calha do rio Doce – Baixo Guandú (RDO 11), Itapina - Colatina (RDO 12), Marilândia (RDO 14); Linhares (RDO 15); Foz do rio Doce – Regência (RDO 16); Reservatórios - Reservatório de Aimorés (UHE AIM) e Reservatório de Mascarenhas (UHE MAS); Lagos - Lago do Limão (LLM 03R), Lago Nova (LNV 02R); Lagoas - Lagoa do Areal (LAL 01), Laguna Monsarás (LMN 02R) e Lagoa Cacimbas (E27). É importante ressaltar que nessa fase do monitoramento as estações E0a, E26F, E20, E20L, E28, E28L, assim como, a região litorânea (L) dos lagos e lagoas foram descontinuadas. A estação E27 permaneceu com essa nomenclatura por compatibilidade de coordenadas entre as malhas do Novo Ciclo e a malha do período referente a Deliberação CIF nº 803.

As amostras de água foram coletadas com garrafa conversível de Niskin (2,8 L), montada na posição horizontal nas amostragens em sistema fluviais e na vertical em sistemas lacustres. Nos lagos a amostragem é realizada em três profundidades: subsuperfície, 1% da radiação fotossintética ativa – RFA e a um metro do fundo. O sedimento é coletado com draga de Ekman, em ecossistemas lacustres com sedimento lamoso, e draga de Van Veen em sedimentos arenoso nos ambientes fluviais e na Laguna de Monsarás. Nas amostragens da Calha do rio Doce, durante as condições de elevada vazão fluvial, têm sido utilizados amostradores com pesos extras para minimizar a deriva dos equipamentos pela correnteza.

Em cada amostragem foram feitos registros *in situ* de parâmetros físicos (temperatura em ºC e turbidez em UNT) e físico-químicos (pH, condutividade elétrica em µS/cm, oxigênio dissolvido em mg/L e potencial de oxiredução em mV) da coluna d'água com a sonda YSI Exo-2 previamente calibrada. O registro *in situ* do pH e condutividade elétrica (µS/cm) do sedimento foi feito com sondas portáteis

Hanna Instruments, imediatamente à coleta do sedimento e na camada superficial do sedimento com a menor interferência possível na amostra.

Nos ecossistemas lacustres foi registrada a transparência da coluna d'água (m) com o disco de Secchi e a profundidade de 1% de radiação fotossintética ativa (RFA) determinada pelo produto da transparência pelo coeficiente de 2,7 conforme Cole (1994).

Ao final do dia de amostragem, as amostras, devidamente acondicionadas em frascaria própria e previamente descontaminada e etiquetada, são transportadas em *coolers* com gelo para o Laboratório de Limnologia e Planejamento Amostral – LimnoLab da Universidade Federal do Espírito Santo em Vitória (ES), onde são processadas.

Em agosto de 2019 (período seco Ano 1), foram feitas coletas de testemunhos de sedimento em cada um dos lagos e lagoas. As amostragens foram feitas com o coletor *hammer* corer Uwitec com tubos de 120 cm de comprimento e 8 cm de diâmetro interno (Figura 1A). Os testemunhos de sedimento foram fatiados ainda em campo com intervalos de 1,0 cm de 0 a 10 cm de profundidade, a cada 2,0 cm entre 10 e 30 cm e a cada 5 cm a partir de 30 cm.

Figura 1: Coleta e processamento dos testemunhos de sedimento nos lagos e lagoas do Baixo Rio Doce. A) coleta com o amostrador Uwitec hammer corer; B) fracionamento de testemunho de sedimento do Lago Nova; C e D) fracionamento de testemunho de sedimento do Lago Juparanã.



2.2 ANÁLISE

Para as amostras da coluna d'água, foram considerados os seguintes parâmetros: material particulado em suspensão - MPS em mg/L determinado pelo método gravimétrico com filtração da água em

membranas de acetato de celulose com porosidade de 0,45 µm (APHA, 2005); alcalinidade total em mg de $CaCO_3$/L por titulação com H_2SO_4 diluído (APHA, 2005), *Clorofila-a* em µg/L por fluorimetria, após filtração em filtros de fibra de vido 0,7 µm e extração em acetona 90% (APHA, 2005); fósforo total e nitrogênio total em µg/L após digestão simultânea com persulfato de potássio e determinação de fosfato e nitrito, respectivamente (APHA, 2005); nutrientes inorgânicos dissolvidos silicato (reação silicomolibdico), fosfato (reação fosfomolibdico), nitrato (redução em coluna de cádmio), nitrito (reação diazotização) e íon amônio (reação salicilato) foram determinados em µg/L por espectrofotometria em sistema de análise segmentada em fluxo contínuo SEAL AutoAnalyzer3 High Resolution - AA3HR Seal Analytics (APHA, 2017).

O Índice de Estado Trófico dos rios e ecossistemas lacustres é composto pelo IET para o fósforo – IET(PT) e IET para a *Clorofila-a* – IET(CL), modificados por Lamparelli (2004), sendo estabelecidos para ambientes lóticos, determinados segundo as equações:

- Rios:

$$IET\ (CL) = 10\ x\ \left(6 - \left(\frac{-0{,}7 - 0{,}6\ x\ (in\ CL)}{In\ 2}\right)\right) - 20 \qquad Equação\ 1$$

$$IET\ (PT) = 10\ x\ \left(6 - \left(\frac{-0{,}42 - 0{,}36\ x\ (in\ CL)}{In\ 2}\right)\right) - 20 \qquad Equação\ 2$$

- Reservatórios:

$$IET\ (CL) = 10\ x\ \left(6 - \left(\frac{-0{,}92 - 0{,}34\ x\ (in\ CL)}{In\ 2}\right)\right) \qquad Equação\ 3$$

$$IET\ (PT) = 10\ x\ \left(6 - \left(\frac{-1{,}77 - 0{,}42\ x\ (in\ PT)}{In\ 2}\right)\right) \qquad Equação\ 4$$

Onde, PT é a concentração de fósforo total medida à superfície da água, em µg/L; CL é concentração de *Clorofila-a* medida à superfície da água, em µg/L; ln: logaritmo natural. Nos meses em que estejam disponíveis dados de ambas variáveis, o resultado será a média aritmética simples dos índices relativos ao fósforo total e a *Clorofila-a* (equação 5):

$$IET = \frac{[IET\ (PT) + IET\ (CL)]}{2} \qquad Equação\ 5$$

Na interpretação dos resultados, os pontos serão classificados conforme os resultados obtidos para o IET anual. Assim, para cada ponto, serão utilizadas as médias geométricas das concentrações de fósforo total e Clorofila-*a* para cálculo do IET(PT) e IET(CL) anual, sendo o IET final resultante da média aritmética simples dos índices anuais relativos ao fósforo total e a clorofila-*a*. Desta forma, os ecossistemas lacustres serão posteriormente classificados de acordo com Índice de Carlson (1977)

(modificado) para rios e reservatórios nas classes IET≤47 (ultraoligotrófico); 47<IET≤ 52(oligotrófico); 52 <IET ≤ 59 (mesotrófico); 59 < IET ≤ 63 (eutrófico); 63 <IET≤ 67(supereutrófico) e IET>67 (hipereutrófico).

A Resistência Térmica Relativa Integrada (RTRi) dos lagos e lagoas foi calculada por meio da equação 6 (Song *et al.*, 2013):

$$RTRi = \sum \frac{(d2 - d1)\ x\ 10^6}{8} \qquad Equação\ 6$$

Onde, d1: densidade da água no estrato 1 (mais superficial); d2: densidade da água no estrato 2 (mais profundo); 8: representa a diferença de densidade da água nas temperaturas de 4ºC (i.e., densidade máxima da água) e 5ºC, ou seja 0,000008g/cm^3. Assim, o padrão térmico foi classificado seguindo as categorias: desestratificado (RTRi < 10), moderadamente estratificado (RTRi: 10 a 100) e fortemente estratificado (RTRi > 100). Os dados foram transformados em Log para melhor visualização gráfica entre os ambientes.

Para calcular o fluxo de nutrientes do rio Doce é utilizada a vazão diária (m^3/s) da estação RDO 15. As medições de vazão foram realizadas em transecto transversal à calha fluvial, com ADCP acoplado à embarcação. No início e no final de cada transecto, foi registrada a altura do nível da água do rio por meio do linígrafo fundeado, para medição de nível e computo da curva de permanência da vazão fluvial. Os dados serão processados no software WinRiver II da RD Instruments.

O fluxo de nutrientes (t/d) foi calculado por meio do produto entre a vazão e as concentrações (µg/L) de Ptotal, ortofosfato, Ntotal, Nitrito, Nitrato, Amônio e silicato (mg/L; Equação 7). Onde Q é a vazão em m^3/s e Ci é concentração em mg/L.

$$F = \left(\frac{(Q * Ci * 86400)}{1{,}000{,}000}\right) \qquad Equação\ 7$$

No sedimento foram determinados os parâmetros físicos densidade (kg/m^3), granulometria (classes de cascalho < 2,0 mm, areia de 0,06 a 2,0 mm e lama < 0,06 mm), fração orgânica (%) por perda por ignição (500 ºC por 4 horas) (Håkanson & Jansson, 1983) e hidroquímicos fósforo total (µg/g) por digestão com persultafo de potássio, fosfato na água intersticial em (µg/L) (reação fosfomolibdico) e extração sequencial de fósforo (mg/g) em P-trocável, P-amorfo, P-cristalino P-hidroxiapatita, P-carbonático, P-detrital e P-orgânico, conforme método espectrofotométrico descrito por Anschutz & Deborde (2016).

Para análise dos testemunhos de sedimento dos ambientes lacustres, foram analisadas a granulometria em %, a mineralogia em %, a matéria orgânica em % e o conteúdo de metais em mg/kg no perfil de sedimento, assim como a datação baseada nas taxas de sedimentação no perfil de sedimento.

O índice de Enriquecimento (IE) foi usado para avaliar a contribuição de cargas de sedimento natural/antrópica e suas distribuições. Para cada metal, o IF foi calculado pela equação 8:

$$IE = \frac{(M/Y)\ amostra}{(M/Y)\ background} \qquad Equação\ 8$$

Onde, (M/Y) *amostra* é a razão entre a concentração de um dado metal na amostra e a concentração de do metal de referência; (*M/Y*) *background* é a razão entre a concentração do metal em avaliação e a concentração do metal normalizador na concentração de referência da crosta terrestre. O cobalto foi utilizado como metal normalizador neste estudo, pois não foram observadas expressivas variações nos testemunhos entre os ecossistemas lacustres. A normalização com cobalto no cálculo do índice de enriquecimento tem sido utilizada como referência para avaliação da origem antropogênica de metais traço em sedimentos de ecossistemas aquáticos (Sakan *et al.* 2015). Para o cálculo do IE, o valor de referência utilizado foi o da porção superior da crosta terrestre em Wedepohl (1995). Posteriormente, foram atribuídas categorias para os índices de enriquecimento descritos por Birch (2003), onde (IE<1) - sem enriquecimento; (IE: 1-3) - baixo enriquecimento; (IE: 3 – 5) - enriquecimento moderado; (IE: 5 – 10) enriquecimento moderadamente severo; (IE: 10 – 25) - enriquecimento severo.

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Não houve alterações metodológicas.

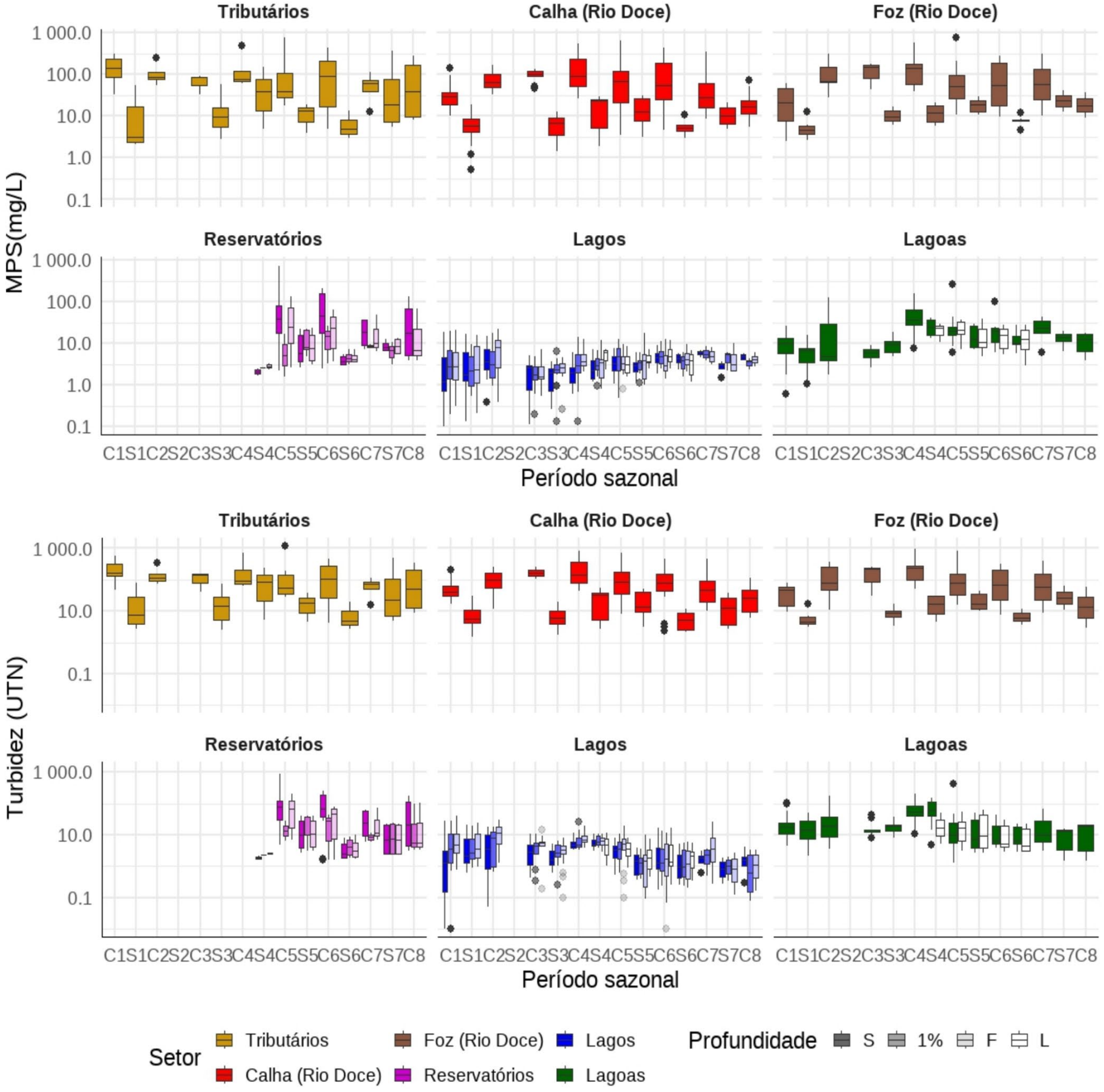
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

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 area 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 CLARIDADE DA ÁGUA

Figura 2: Gráficos boxplots do indicador claridade da água com a variação sazonal e anual do log material particulado em suspensão – MPS (mg/L) e Turbidez (UNT) nos setores: Tributários, Calha do rio Doce, Foz do rio Doce, Reservatórios, Lagos e Lagoas. Profundidades para reservatório e lagos: S= superfície; 1% = 1% de Radiação Fotossintética Ativa; e F= Fundo. Profundidade para lagos e lagoas: L= Litoral. Período amostral de outubro/2018 a janeiro/2026. C1 e S1 = Períodos chuvoso e seco do Ano 1 (outubro 2018 a setembro de 2019); C2 e S2 = Períodos chuvoso e seco do Ano 2 (outubro 2019 a setembro de 2020); C3 e S3 = Períodos chuvoso e seco do Ano 3 (outubro 2020 a setembro de 2021); C4 e S4 = Períodos chuvoso e seco do Ano 4 (outubro 2021 a setembro de 2022); C5 e S5 = Períodos chuvoso e seco do Ano 5 (outubro 2022 a setembro de 2023); C6 e S6= Períodos chuvoso e seco do Ano 6 (outubro 2023 a setembro de 2024), C7 e S7= Períodos chuvoso e seco do Ano 7 (outubro de 2024 a setembro de 2025) e C8 = Período chuvoso do Ano 8 (outubro de 2025 a janeiro de 2026). A lacuna de dados entre março/2020 e novembro/2020 é referente à interrupção do monitoramento em decorrência da pandemia da COVID-19. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1.



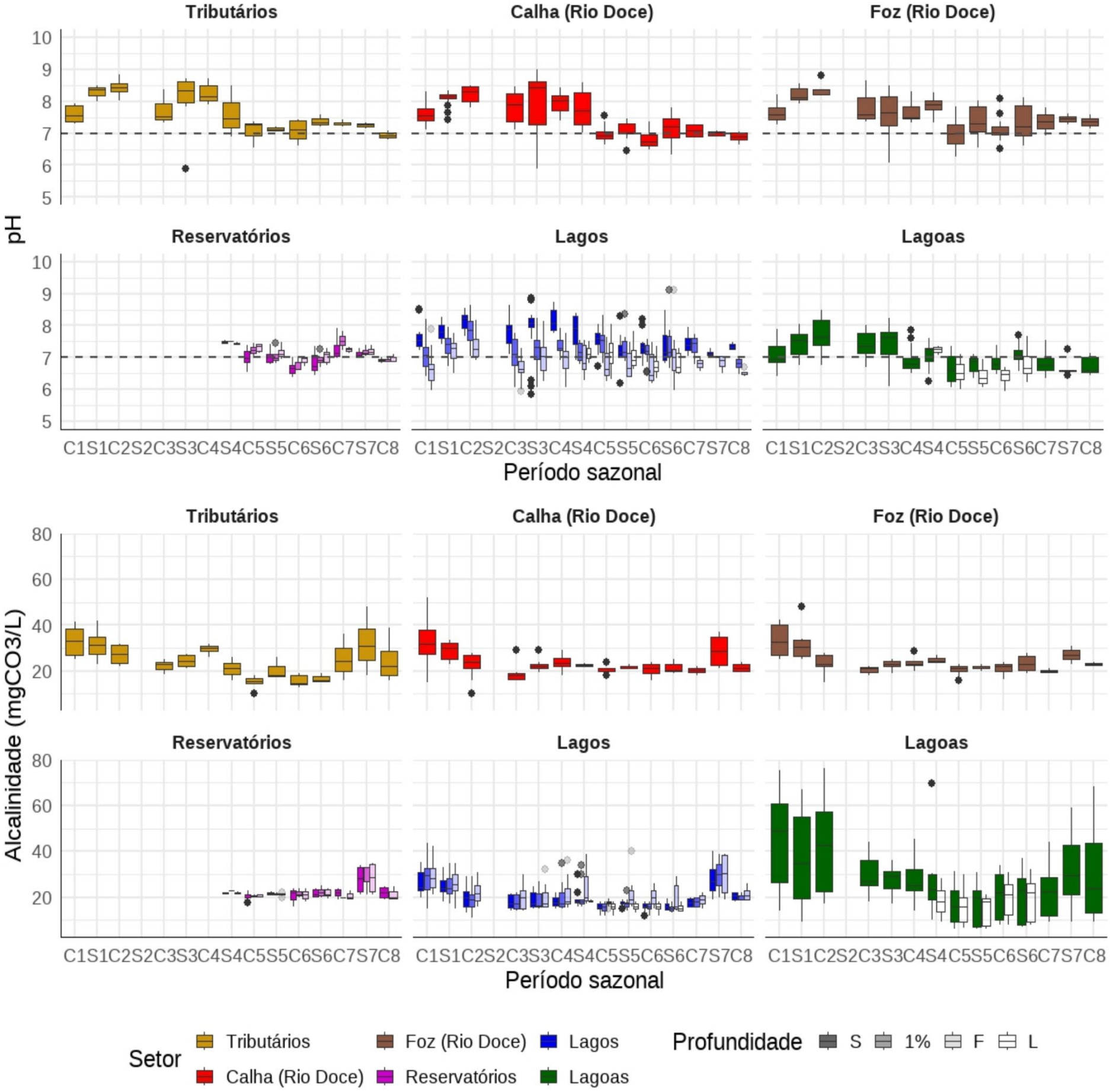
A variabilidade do indicador “claridade da água” é mais sazonal do que interanual, porém no setor Foz, o MPS e a turbidez foram significativamente diferenciados entre os anos (Kruskall-Wallis, p<0,05) (Figura 2). Nos setores Lagos, Reservatórios, Calha do rio Doce e Foz, observou-se que a turbidez vem apresentando tendência de redução desde o Ano 4, enquanto o MPS varia entre os anos de monitoramento sem um padrão definido. Isso porque, os padrões de variabilidade das concentrações de MPS e turbidez ao longo dos anos ocorre conforme a vazão do rio Doce. Nesse caso, o MPS e a turbidez apresentam forte correlação positiva com a vazão, ρ = 0,92 e 0,90, respectivamente (Spearman p<0,05). Nos Reservatórios, observa-se que maiores concentrações de MPS geralmente são encontradas na superfície e no fundo (Figura 2). Esse padrão ocorre devido à turbulência na coluna d’água e ao revolvimento do sedimento de fundo provocado pela drenagem pelas turbinas e vertedouro.

A variação temporal entre períodos secos e chuvosos indica que, em todos os setores, as concentrações de MPS e turbidez variam sazonalmente, com as maiores concentrações ocorrendo no período chuvoso, quando comparadas as do período seco (Mann-Whitney, p<0,05) (Figura 2), servindo como referência para o transporte fluvial de materiais para o oceano costeiro e ecossistemas lacustres das planícies fluviais e costeiras. Mesmo com tendência de redução nos valores de turbidez, exceto no setor Lagos, ainda são detectadas turbidez acima do limite máximo admissível de 100 UNT para águas de Classe 2 (Conselho Nacional do Meio Ambiente na Resolução CONAMA nº 357/2005), sobretudo, nos períodos chuvosos do Ano 7 e do Ano 8 (C8). Principalmente nos setores Calha e Foz do rio Doce, durante o período chuvoso, a turbidez excede o limite de 100 UNT para águas de Classe 2 (CONAMA, 357/2005). Por exemplo, tal fato ocorreu nos períodos chuvosos dos Anos 7 e 8 (C7 e C8, respectivamente). Assim, no setor Calha do rio Doce, em C7 foram observados máximos de turbidez de 463,9 e 118,8 UTN nas estações amostrais RDO 15 e RDO 14, respectivamente. Da mesma forma, em C8 a estação RDO 15 ultrapassou o limite do CONAMA com uma turbidez de 113,68 UTN. No setor Foz do rio Doce, apenas em C7 a estação RDO 16 apresentou 410,4 UTN. O material ressuspendido na área da plataforma continental interna, defronte à foz do rio Doce, pode adentrar no setor fluvial inferior da Calha do rio Doce, durante o período de baixa vazão fluvial e maré enchente, influenciando a estação RDO 15.

No setor Tributários (área não impactada) foram observadas variações da claridade da água com diferenças estatísticas (Kruskall-Wallis, p<0,05), sem um padrão bem definido entre os anos de monitoramento (Figura 2). No entanto, cabe ressaltar, que as medianas de MPS e turbidez são superiores às áreas impactadas (Calha e Foz do rio Doce), refletindo a degradação ambiental das bacias hidrográficas.

3.2 ACIDEZ/ ALCALINIDADE

Figura 3: Gráficos Boxplots do indicador acidez/alcalinidade, com a variação sazonal e anual do Potencial hidrogeniônico – pH e Alcalinidade Total (mg $CaCCO_3$ mg/L) da água nos setores: Tributários; Calha do rio Doce, Foz do rio Doce, Reservatórios, Lagos e Lagoas. Profundidades para reservatório e lagos: S= superfície; 1% = 1% de Radiação Fotossintética Ativa; e F= Fundo. Profundidade para lagos e lagoas: L= Litoral. Período amostral outubro/2018 a janeiro/2026. C1 e S1 = Períodos chuvoso e seco do Ano 1 (outubro 2018 a setembro de 2019); C2 e S2 = Períodos chuvoso e seco do Ano 2 (outubro 2019 a setembro de 2020); C3 e S3 = Períodos chuvoso e seco do Ano 3 (outubro 2020 a setembro de 2021); C4 e S4 = Períodos chuvoso e seco do Ano 4 (outubro 2021 a setembro de 2022); C5 e S5 = Períodos chuvoso e seco do Ano 5 (outubro 2022 a setembro de 2023); C6 e S6= Períodos chuvoso e seco do Ano 6 (outubro 2023 a setembro de 2024) C7 e S7= Períodos chuvoso e seco do Ano 7 (outubro de 2024 a setembro de 2025) e C8 = Período chuvoso do Ano 8 (outubro de 2025 a janeiro de 2026). A lacuna de dados entre março/2020 e novembro/2020 é referente à interrupção do monitoramento em decorrência da pandemia da COVID-19. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1.



De uma forma geral, o pH dos setores Reservatórios, Lagos, Lagoas, Calha e Foz do rio Doce permanece próximo à neutralidade (Figura 3). Porém, observa-se uma tendência a redução do pH para condições levemente ácidas em relação ao Ano 1 de monitoramento, com diferenças significativas entre os anos (Kruskal–Wallis, $p < 0,05$). Também, observou-se uma redução das concentrações de alcalinidade com diferenças significativas entre os anos (Kruskal–Wallis, $p < 0,05$) do Ano 1 até o período chuvoso do Ano 7 (C7). Porém, tanto no período seco do ano 7 (S7), quanto no período chuvoso do Ano 8 (C8) houve um incremento do pH no setor Foz do rio Doce.

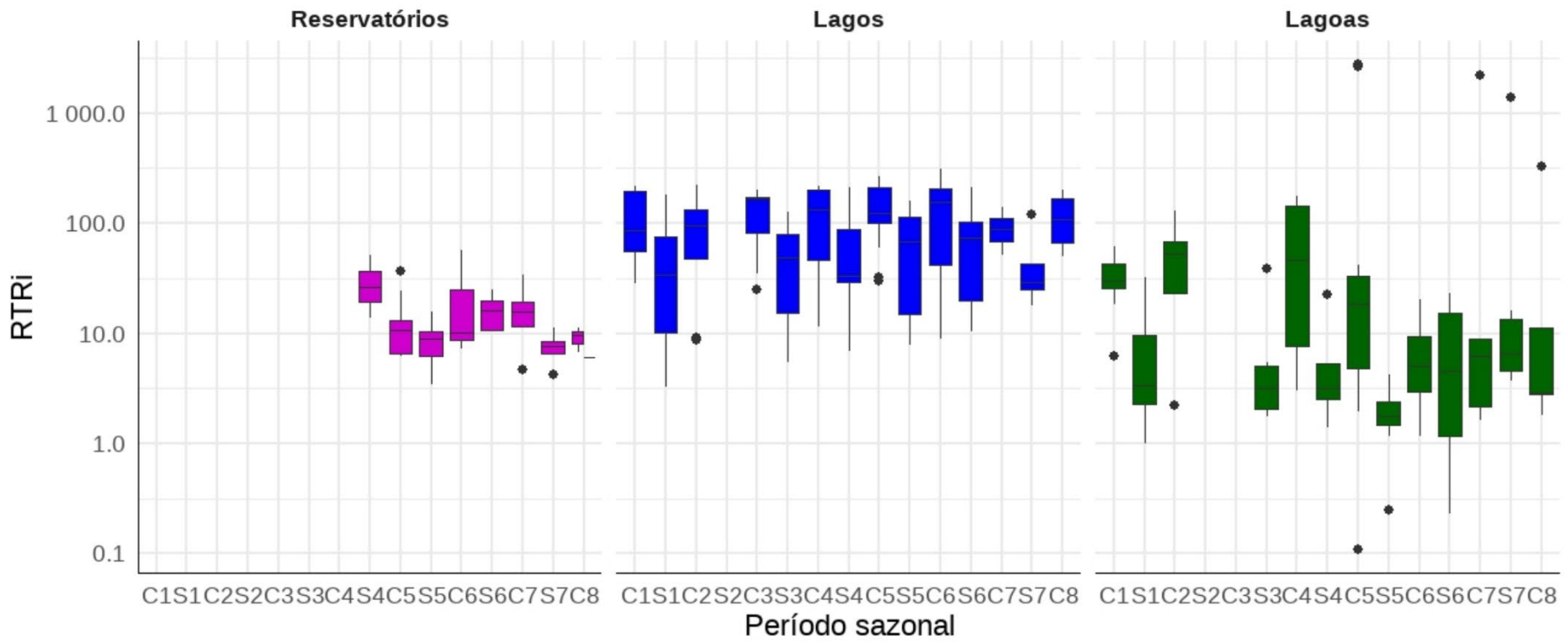
O pH está relacionado a disponibilidade de H^+, enquanto a alcalinidade reflete a capacidade tampão do ambiente (Wetzel e Likens, 2000). Apesar de estarem intrinsicamente relacionados, o pH e a alcalinidade podem receber influências diferentes (Shashi *et al.*, 2009). Isso se justifica devido ao processo respiratório de bactérias heterotróficas no fundo da coluna d'água, onde também ocorre a redução do CO_2 em CH_4 e do SO_4^- em H_2S e S^0 (Wetzel e Likens, 2000). Os processos de redução liberam compostos alcalinizantes que incrementam a alcalinidade, apesar do pH tendendo a condições ligeiramente ácidas. A redução do pH na Calha e Foz do rio Doce pode estar associada período de latência do sistema tampão do sistema carbonato (pH e Alcalinidade) em rios afetados por aporte de rejeitos de mineração. Nesses rios, a latência do sistema tampão indica condições inicialmente neutras que podem persistir por meses ou anos, precedendo de condições de acidez no sistema com o passar dos anos. Em ambientes com elevadas concentrações de ferro reduzido dissolvido, processos de oxidação, hidrólise e precipitação podem intensificar a acidificação da água (Nordstrom *et al.*, 2015). Isso porque, em águas com pH entre 6 e 9, a maioria dos metais-traço apresenta baixa solubilidade e tende a precipitar para os sedimentos, enquanto metais e metaloides aniônicos permanecem mais solúveis devido à sua carga negativa. Dessa forma, variações no pH influenciam diretamente a mobilidade e a disponibilidade desses elementos no sistema aquático (Nordstrom *et al.*, 2015).

No setor Lagos, ressalta-se a condição de maior acidez no fundo da coluna d'água (Figura 3) onde o pH é mais baixo e as pressões parciais de CO_2 são mais elevadas, sobretudo, durante o período de estratificação térmica com o predomínio de retenção de carbono inorgânico (Costa *et al.*, 2026). No setor Tributários (áreas não impactadas) o rio Guandú (E17/RGU02) o pH (mediana de 8,02±0,46) encontra-se predominantemente mais alcalino do que o rio Manhuaçu (E2/RMH 01 com mediana de 7,31±0,19) e do que nos setores impactados (Calha do rio Doce e Foz com medianas de 7,5±0,35 e 7,56±0,44, respectivamente). Nos tributários, apenas no rio Guandu foram observadas diferenças significativas entre os anos (Kruskal–Wallis, $p<0,05$).

Com relação a variabilidade sazonal, nos setores Calha do rio Doce e Reservatórios, o pH foi significativamente diferente entre os períodos secos e chuvosos (Mann-Whitney, $p<0,05$) (Figura 3). Com relação a alcalinidade, foram observadas diferenças significantes entre os períodos secos e chuvosos (Mann-Whitney, $p<0,05$) nos setores Calha e Foz do rio Doce, Lagos e Reservatórios. As diferenças sazonais observadas refletem alterações no balanço hidrológico e nos processos biogeoquímicos da bacia. Embora ocorra a ausência de um padrão sazonal consistente, a resposta ácido–base do rio Doce varia conforme as condições hidrológicas e biogeoquímicas anuais (Figura 3) que determinam o escoamento, o transporte de íons, sedimentos e matéria orgânica para os ecossistemas aquáticos, modificando a hidroquímica e o equilíbrio do sistema carbonato.

3.3 ESTRATIFICAÇÃO TÉRMICA DOS ECOSSISTEMAS LACUSTRES

Figura 4: Gráficos Boxplots do indicador Estratificação Térmica dos ecossistemas Lacustres, com a variação sazonal e anual da Resistência térmica relativa integrada – RTRi (Log10) da água nos setores: Reservatórios, Lagos e Lagoas. Período amostral de outubro/2018 a janeiro/2026. C1 e S1 = Períodos chuvoso e seco do Ano 1 (outubro 2018 a setembro de 2019); C2 e S2 = Períodos chuvoso e seco do Ano 2 (outubro 2019 a setembro de 2020); C3 e S3 = Períodos chuvoso e seco do Ano 3 (outubro 2020 a setembro de 2021); C4 e S4 = Períodos chuvoso e seco do Ano 4 (outubro 2021 a setembro de 2022); C5 e S5 = Períodos chuvoso e seco do Ano 5 (outubro 2022 a setembro de 2023); C6 e S6= Períodos chuvoso e seco do Ano 6 (outubro 2023 a setembro de 2024), C7 e S7= Períodos chuvoso e seco do Ano 7 (outubro de 2024 a setembro de 2025) e C8 = Período chuvoso do Ano 8 (outubro de 2025 a janeiro de 2026). A lacuna de dados entre março/2020 e novembro/2020 é referente à interrupção do monitoramento em decorrência da pandemia da COVID-19. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1.



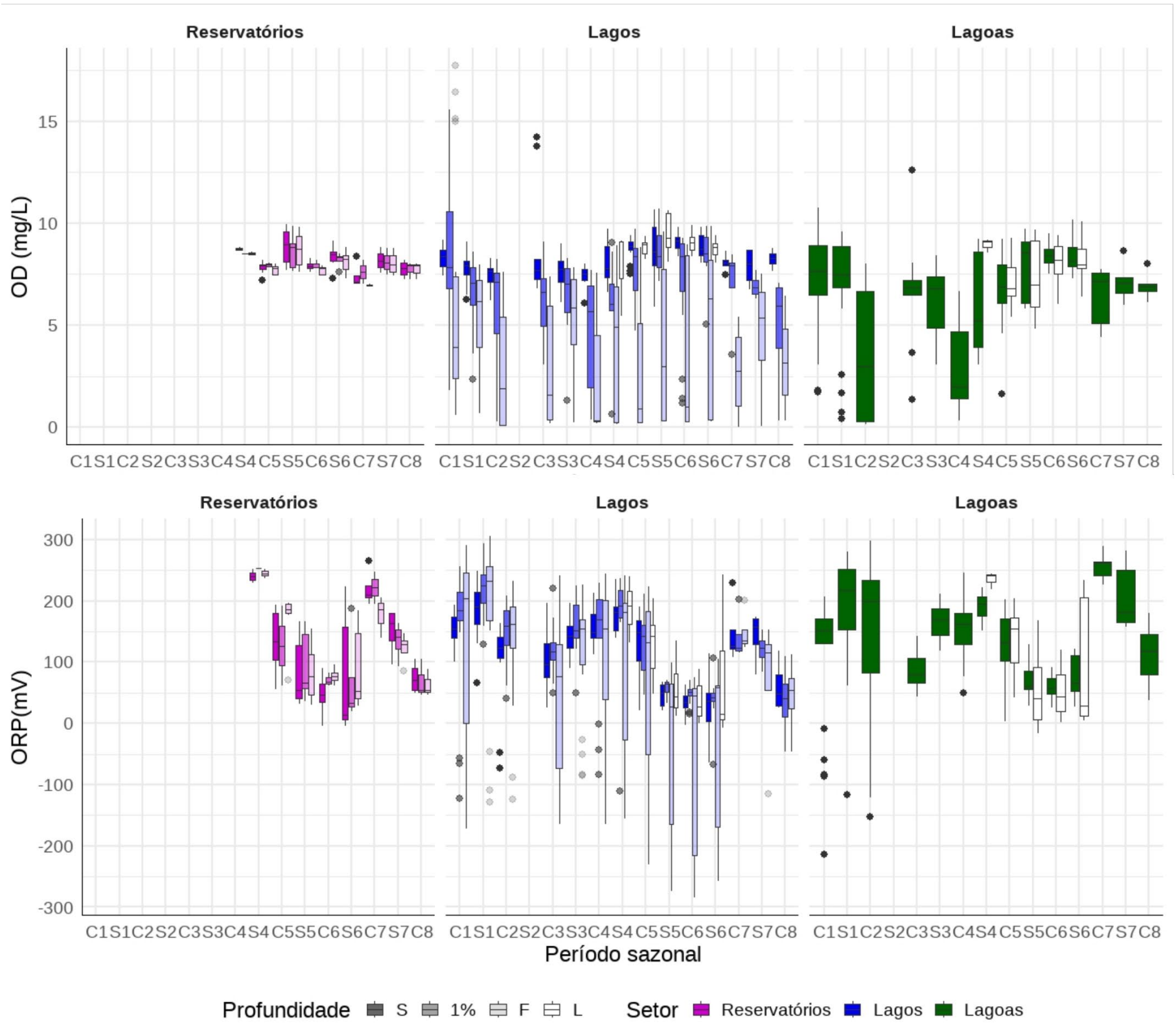
Apesar de não ter sido identificada uma tendência ao longo dos anos, foram observadas diferenças significativas entre os anos para o indicador Estratificação Térmica com RTRi nos setores Lagos e Lagoas (Kruskal–Wallis, $p < 0,05$) (Figura 4). Nos Reservatórios (RTRi médio =14,61±11,65), diferentemente do setor Lagos, a drenagem de água pelo fundo, via turbinas e vertedouros, promove maior turbulência na coluna d'água e o revolvimento do sedimento. A condição de desestratificação térmica da coluna d'água deve-se ao baixo tempo de retenção da água nos reservatórios, sobretudo, em Mascarenhas (UHE MAS) que é um reservatório do tipo fio d'água com correntes longitudinais rápidas (Straskraba & Tundisi, 2000). Esse processo reduz a estabilidade térmica, resultando em sistemas predominantemente desestratificados. As lagoas, por sua vez, por serem rasas ($Z_{méd} < 3,0$ m), são mais suscetíveis à ação do vento, que intensifica a mistura e a turbulência na coluna d'água. Porém, na Laguna Monsarás (LMN 02R), a estratificação pode ser provocada pela salinidade, com a formação de camadas d'água com diferentes densidades, em decorrência da sua conexão intermitente com o oceano. Em contraste, os lagos, por serem mais profundos, apresentam-se predominantemente fortemente estratificados (RTRi > 100) durante da estação do verão, o que é pouco alterado ao longo dos anos.

Com relação a variabilidade temporal, nos setores Lagos e Lagoas, foram observadas diferenças significativas entre as estações secas (RTRi mediano= 42,27 para Lagos e 3,26 para Lagoas) e chuvosas (RTRi mediano= 120,6 para Lagos e 9,45 para Lagoas) (Mann-Whitney, $p<0,05$), predominando a condição de estratificação no período chuvoso e desestratificação no período seco (Figura 4). Esse padrão de variabilidade do RTRi permaneceu entre o Ano 7 (C7e S7) e período chuvoso do Ano 8 (C8). Os valores mais elevados de RTRi dos lagos ocorrem no período chuvoso, com a camada superficial, o epilímnio, e a camada mais profunda, o hipolímnio, mais fria e com condições hipóxicas ou anóxicas, portanto, menor Potencial redox. Durante o período seco a coluna d'água apresenta instabilidade térmica com tendência para mistura entre as camadas superiores e inferiores e, portanto, as trocas de oxigênio entre superfície e fundo (Bozelli *et al.*, 1992; Wetzel, 2001; Gonçalves *et al.*, 2016; Costa *et al*., 2026).

Considerando que o Lago Nova (LNV 02R) foi impactado com a intrusão de material ligado ao desastre - MLD (Miller *et al.*, 2023), a elevada estabilidade térmica favorece condições de hipolímnio hipóxico/anóxico com condições predominantemente redutoras. Desse modo, a solubilidade de formas reduzidas de nutrientes e metais é favorecida como, por exemplo, as concentrações de fosfato, nitrato e amônio.

3.4 CONDIÇÃO OXIDANTE/REDUTORA DA COLUNA D'ÁGUA

Figura 5: Gráficos Boxplots do indicador Condição oxidante/redutora da coluna d'água, com a variação sazonal e anual do Potencial redox - ORP (mV) e Oxigênio dissolvido – OD (mg/L) nos setores: Reservatórios, Lagos e Lagoas. Profundidades para reservatório e lagos: S= superfície; 1% = 1% de Radiação Fotossintética Ativa; e F= Fundo. Profundidade para lagos e lagoas: L= Litoral. Período amostral de outubro/2018 a janeiro/2026. C1 e S1 = Períodos chuvoso e seco do Ano 1 (outubro 2018 a setembro de 2019); C2 e S2 = Períodos chuvoso e seco do Ano 2 (outubro 2019 a setembro de 2020); C3 e S3 = Períodos chuvoso e seco do Ano 3 (outubro 2020 a setembro de 2021); C4 e S4 = Períodos chuvoso e seco do Ano 4 (outubro 2021 a setembro de 2022); C5 e S5 = Períodos chuvoso e seco do Ano 5 (outubro 2022 a setembro de 2023); C6 e S6= Períodos chuvoso e seco do Ano 6 (outubro 2023 a setembro de 2024), C7 e S7= Períodos chuvoso e seco do Ano 7 (outubro de 2024 a setembro de 2025) e C8 = Período chuvoso do Ano 8 (outubro de 2025 a janeiro de 2026). A lacuna de dados entre março/2020 e novembro/2020 é referente à interrupção do monitoramento em decorrência da pandemia da COVID-19. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1.



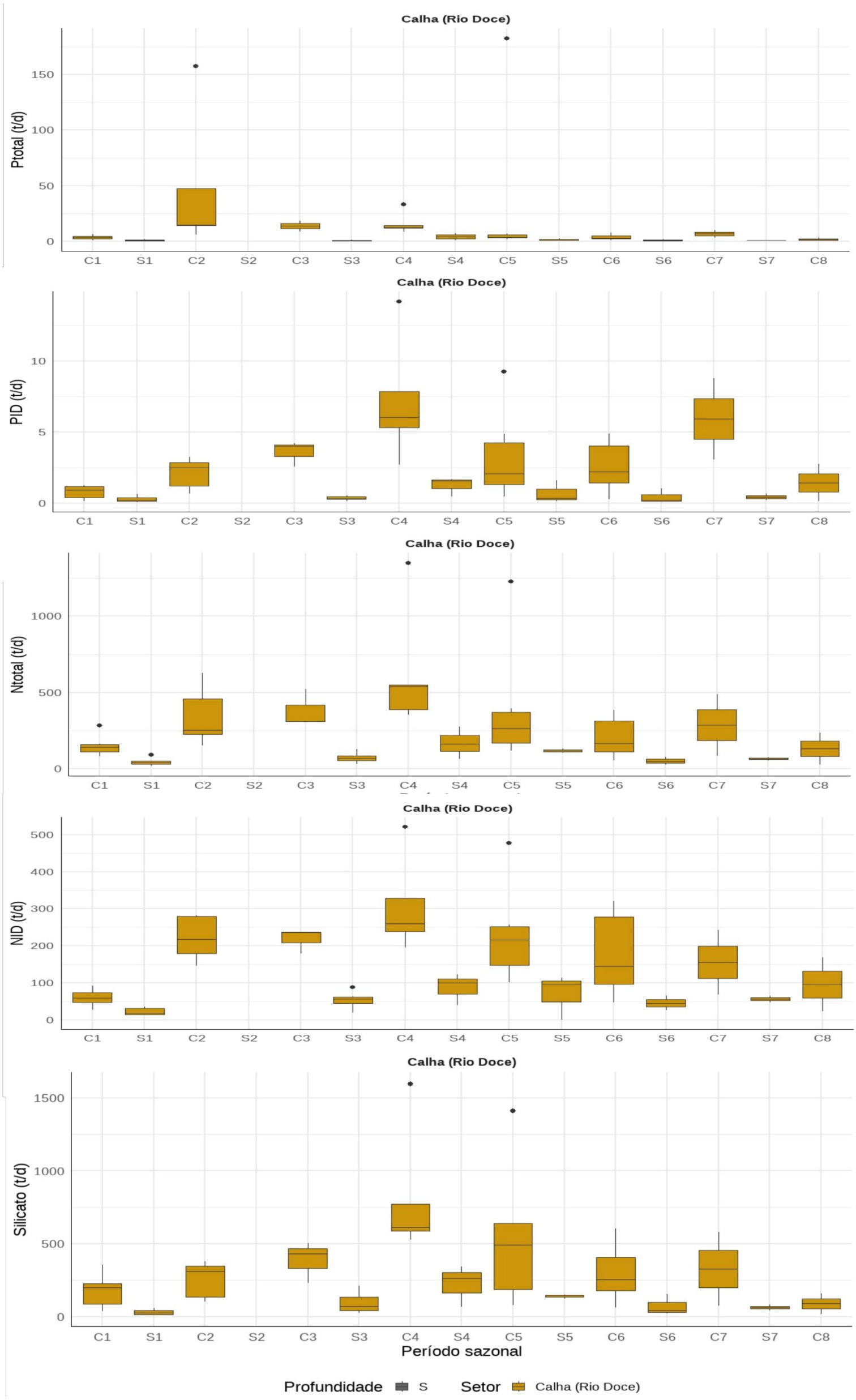
Nos últimos anos monitoramento (Anos 7 e 8), entre os períodos C7, S7 e C8, o oxigênio dissolvido (OD) se manteve acima de 5 mg L^{-1} nos setores Reservatórios e Lagoas (Figura 5). Com relação ao setor Lagos, o OD diminui com a profundidade: enquanto o OD da superfície varia em torno de 7 mgL^{-1} o fundo apresenta anoxia. Apesar de eventuais eventos de anoxia entre os períodos C7, S7 e C8, tanto no fundo do Lago Nova (LNV 02R), como também, nas profundidades de 1% e fundo do Lago do Limão (LLM 03R), os Lagos foram considerados predominantemente bem oxigenados com média de 6,35±2,9 mg L^{-1}.

No último ano de monitoramento a tendência de persistência de valores negativos da ORP dos fundos dos lagos não foi observada, em decorrência da alteração da malha amostral. De uma maneira geral, em todos os setores os valores de potencial redox (ORP) se mantiveram predominantemente positivos (condição oxidante), com eventuais condições redutoras (ORP negativo) no fundo do Lago Nova (LNV 02R) que é considerado área impactada, como também nas profundidades de 1% e fundo do Lago do Limão (LLM 03R) (Figura 5). Sob condições redutoras ocorrem processos de dessorção de P, Fe, Al e Mn, com a difusão destes elementos do sedimento para o fundo da coluna d'água (Mortimer, 1942; Mia *et al.*, 2006; Reid *et al.*, 2023). A variabilidade das concentrações de OD e ORP diferem significativamente entre os anos (Kruskall-Wallis, $p<0,05$).

Com relação a variabilidade entre os períodos secos e chuvosos, nos setores Lagos e Lagoas foram observadas diferenças significativas no potencial de oxirredução, com menores valores durante o período chuvoso (teste de Mann–Whitney, $p < 0,05$) (Figura 5). Isso se deve a estratificação da coluna d'água dos ecossistemas lacustres e condições hipóxicas ou anóxicas decorrentes da remineralização da matéria orgânica (Mortimer, 1942). Com relação ao OD foram observadas diferenças significativas nos setores Reservatórios e Lagoas com concentrações maiores durante o período seco, respondendo significativamente à sazonalidade (teste de Mann–Whitney, $p < 0,05$). O indicador "Estratificação Térmica dos Ecossistemas Lacustres" revela, por meio do parâmetro resistência térmica relativa integrada (RTRi), uma menor estabilidade térmica durante os períodos secos. Esse padrão pode ser explicado pela menor estabilidade térmica dos ecossistemas lacustres, favorecendo a mistura da coluna d'água e a redistribuição do OD, além das temperaturas mais baixas no período seco, que aumentam a solubilidade do oxigênio na água (Costa *et al.*, 2026).

3.5 FLUXOS DE NUTRIENTES

Figura 6: Gráficos Boxplots do indicador do indicador fluxos de nutrientes, com a variação sazonal e anual do Fluxo de Fósforo total – Ptotal (t/d); Fluxo de Fósforo Inorgânico Dissolvido – PID (t/d); Fluxo de Nitrogênio Total – Ntotal (t/d); Fluxo de Nitrogênio Inorgânico Dissolvido – NID (t/d); e Fluxo de Silicato (t/d), da água no setor calha do rio Doce. Período amostral de outubro/2018 a janeiro/2026. C1 e S1 = Períodos chuvoso e seco do Ano 1 (outubro 2018 a setembro de 2019); C2 e S2 = Períodos chuvoso e seco do Ano 2 (outubro 2019 a setembro de 2020); C3 e S3 = Períodos chuvoso e seco do Ano 3 (outubro 2020 a setembro de 2021); C4 e S4 = Períodos chuvoso e seco do Ano 4 (outubro 2021 a setembro de 2022); C5 e S5 = Períodos chuvoso e seco do Ano 5 (outubro 2022 a setembro de 2023); C6 e S6= Períodos chuvoso e seco do Ano 6 (outubro 2023 a setembro de 2024), C7 e S7= Períodos chuvoso e seco do Ano 7 (outubro de 2024 a setembro de 2025) e C8 = Período chuvoso do Ano 8 (outubro de 2025 a janeiro de 2026). A lacuna de dados entre março/2020 e novembro/2020 é referente à interrupção do monitoramento em decorrência da pandemia da COVID-19. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1.



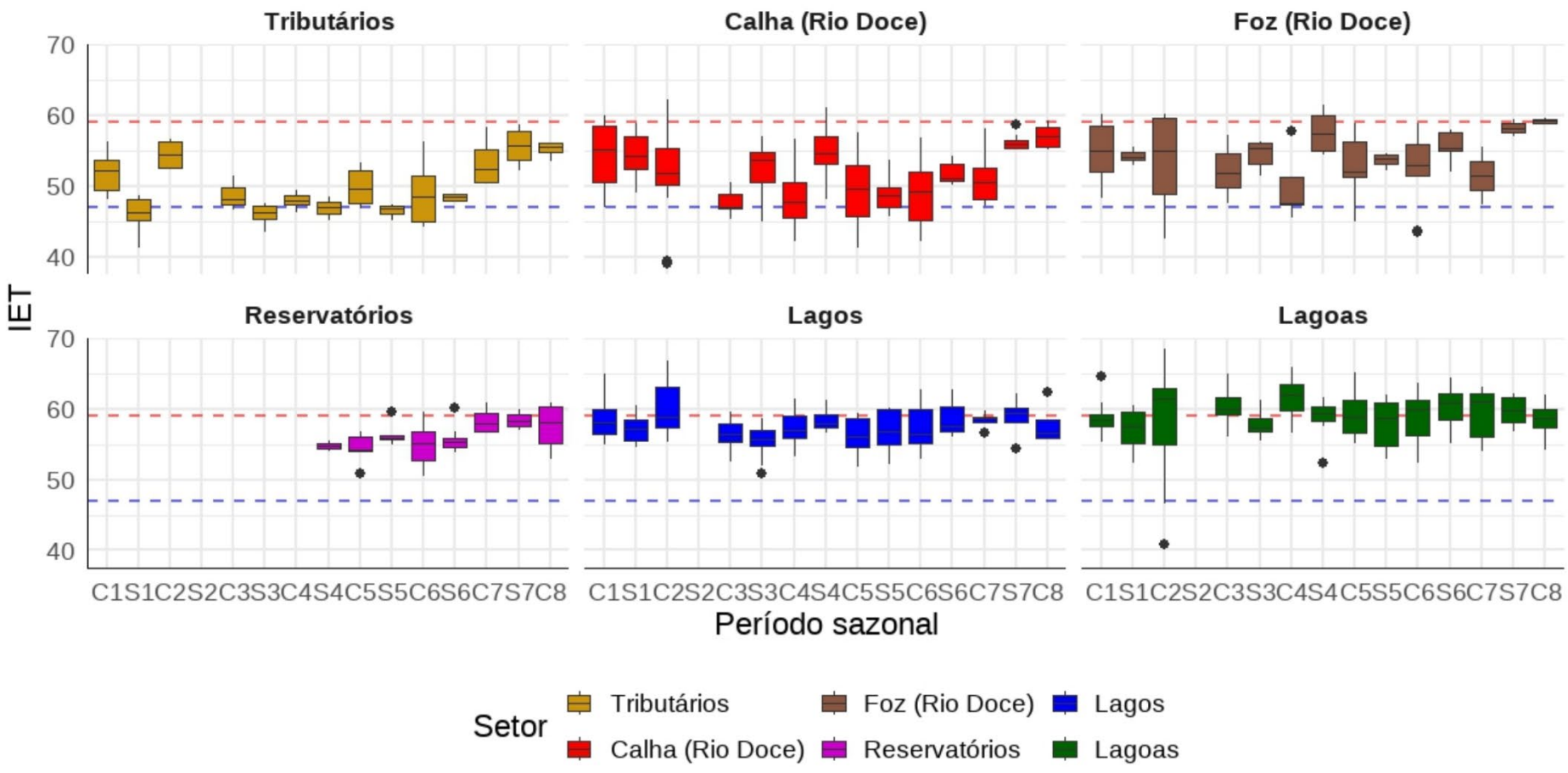
Entre os anos de monitoramento, foram observadas diferenças significativas entre os fluxos de P_{total}, PID, N_{total} e silicato (Kruskall-Wallis, $\rho<0,05$). A tendência de redução dos fluxos em relação ao Ano 4 de monitoramento persiste, pois, a sua variação reflete a oscilação da vazão fluvial média do rio Doce (Figura 6). Nesse caso, os fluxos mais expressivos continuam sendo os registrados nos Anos 2 (outubro de 2019 a setembro de 2020) e Ano 4 (outubro de 2021 a setembro de 2022), em decorrência das maiores vazões registradas (1.143,6±483,6 e 1.355,8±1.162,4 m^3/s para os Anos 2 e 4, respectivamente). O último semestre de monitoramento período chuvoso do Ano 8 (C8) apresentou tendência de redução dos fluxos em relação ao período chuvoso do Ano 7 (C7) (Figura 6).

As concentrações médias elevadas de nutrientes e as altas vazões resultaram em expressivos fluxos de nutrientes ao longo dos anos de monitoramento, como: fósforo total (P_{total} 11,3±31,4 t/d), fósforo inorgânico dissolvido - PID (2,2±2,7 t/d), nitrogênio total (N_{total} 230,7±257,5t/d), nitrogênio inorgânico dissolvido (NID 134,2± 116,2 t/d) e silício (Silicato 270,2,6±310,2 t/d) (Figura 6). A magnitude dos fluxos do rio Doce coloca esse sistema como significativamente ativo no transporte de materiais para o oceano costeiro (Souza *et al.*, 2003). Foram observadas correlações moderadas (Teste de Spearman) entre as concentrações de metais dissolvidos e nutrientes, destacando-se as correlações de Cr com NID (ρ = 0,53) e P_{total} (ρ = 0,59), de Zn com NID (ρ = 0,42) e P_{total} (ρ = 0,67), e Fe com SiO_4^- (ρ = 0,41). Essas correlações indicam que a dinâmica dos metais esteve associada às variações das concentrações de nutrientes, sugerindo a influência conjunta de processos hidrológicos, aporte de matéria orgânica e ressuspensão de sedimentos sobre a mobilidade e disponibilidade desses elementos no sistema aquático.

Em relação a variabilidade temporal, foi observado que os maiores fluxos diários de P_{total}, PID, N_{total}, NID e Silicato ocorrem nos períodos chuvosos (Mann Whitney - $p<0,05$) em comparação com os períodos secos (Figura 6). Os fluxos de nutrientes variam em função da vazão, uma vez que o aumento da descarga fluvial intensifica o carreamento de material dissolvido e particulado ao longo da bacia. O ciclo anual de vazão na bacia do rio Doce reflete o regime sazonal de chuvas e apresenta variabilidade pronunciada tanto em escala diária quanto mensal, com maiores vazões entre dezembro e fevereiro e as menores entre julho e outubro. Esse padrão é impulsionado pela elevada variabilidade pluviométrica característica do sudeste do Brasil onde precipitações intensas e eventos de cheia são influenciados pela Zona de Convergência do Atlântico Sul (ZCAS) e por sistemas frontais durante o verão (Vasconcellos & Cavalcanti, 2010). Oliveira & Quaresma (2017) destacaram que o rio Doce responde rapidamente a eventos de chuva intensa e de curta duração, sendo que a maior parte do transporte de sedimentos ocorre durante a estação chuvosa, com aproximadamente 94% da carga anual de sedimentos sendo transportada para a costa entre novembro e março, reforçando a influência da sazonalidade hidrológica sobre o transporte de sedimentos e nutrientes ao longo da bacia.

3.6 ESTADO TRÓFICO

Figura 7: Gráficos Boxplots do indicador biológico Estado Trófico: Índice de estado Trófico médio - IET médio na superfície dos tributários, calha e foz do rio Doce, reservatórios, lagos e no meio da coluna d'água para lagoas. Variação sazonal e anual do IET médio da água nos setores: Tributários, Calha do rio Doce, Foz do rio Doce, Reservatórios, Lagos e Lagoas. Período amostral de outubro/2018 a janeiro/2026. C1 e S1 = Períodos chuvoso e seco do Ano 1 (outubro 2018 a setembro de 2019); C2 e S2 = Períodos chuvoso e seco do Ano 2 (outubro 2019 a setembro de 2020); C3 e S3 = Períodos chuvoso e seco do Ano 3 (outubro 2020 a setembro de 2021); C4 e S4 = Períodos chuvoso e seco do Ano 4 (outubro 2021 a setembro de 2022); C5 e S5 = Períodos chuvoso e seco do Ano 5 (outubro 2022 a setembro de 2023); C6 e S6= Períodos chuvoso e seco do Ano 6 (outubro 2023 a setembro de 2024), C7 e S7= Períodos chuvoso e seco do Ano 7 (outubro de 2024 a setembro de 2025) e C8 = Período chuvoso do Ano 8 (outubro de 2025 a janeiro de 2026). A lacuna de dados entre março/2020 e novembro/2020 é referente à interrupção do monitoramento em decorrência da pandemia da COVID-19. A linha tracejada vermelha representa o limite eutrófico e a linha azul o estado oligotrófico. O tempo de monitoramento difere entre as estações, conforme o Quadro 1.



Entre os anos de monitoramento, foi constatado incremento do IET nos setores Reservatórios, Lagos e Lagoas, com diferenças estatisticamente significativas entre os anos (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$), sendo que as lagoas alcançaram condições hipereutróficas (IET > 63) (Figura 7). Em geral, a menor profundidade das lagoas possibilita a remobilização dos nutrientes do sedimento pela turbulência do vento e fraca estratificação térmica, tornando-as mais propensas a condições meso-eutróficas (Esteves, 1988; Bozelli *et al.*, 1992; Qin *et al.*, 2020). Lagos rasos tendem a apresentar elevada correlação entre as concentrações de pigmentos fotossintetizantes do fitoplâncton e nutrientes, com as maiores razões entre clorofila-*a* e N_{total} e P_{total} (Zhao *et al.*, 2023).

Nos setores Calha do rio Doce e Foz, o aumento do IET foi observado apenas no Ano 7 (C7 e S7) e no período chuvoso do Ano 8 (C8), alcançando condição eutrófica (Figura 7). Essa variabilidade possivelmente está relacionada ao incremento das concentrações de P_{total} e clorofila-a, associado às variações de vazão. Nesse período, a vazão média do rio Doce foi inferior (399 m³/s) em comparação aos demais períodos chuvosos ao longo dos anos de monitoramento (vazão média de 1.144 m³/s). O aporte de efluentes domésticos provenientes das áreas urbanas dos municípios de Baixo Guandu e Colatina, associado às condições de baixa vazão fluvial, pode ter favorecido os incrementos da biomassa fitoplanctônica e das concentrações de nitrogênio e fósforo no sistema fluvial. Apesar da variabilidade interanual e das diferenças significativas observadas (Kruskal-Wallis, $p < 0,05$), os setores Calha do rio Doce e Foz permaneceram predominantemente como mesotróficos ($52 \leq IET \leq 59$). Em relação a variabilidade temporal, exceto nos setores Lagos e Reservatórios, foram encontradas diferenças entre as estações secas e chuvosas com maiores valores de IET nos períodos considerados secos (Mann Whitney, $p<0,05$).

3.7 TESTEMUNHO DE SEDIMENTOS EM LAGOS E LAGOAS

Quadro 2: Estatística descritiva do indicador Testemunhos de Sedimento em Lagos e Lagoas (Parte 1) e Teste estatístico não paramétrico de Spearman (Parte 2) para granulometria, matéria orgânica (MO), composição mineralógica e conteúdo de metais nos sedimentos dos setores Lagos e Lagoas. Período amostral de outubro/2018 a setembro/2019. Granulometria - silte (%) e argila (%); matéria orgânica - MO (%); composição mineralógica - quartzo (%), muscovita (%), anatásio (%), caulinita (%), gibbsita (%), goethita (%), hematita (%), Mt/Mh (%) e Óxidos de Fe (%); conteúdo de metais - Al (mg/kg x 10^3), As (mg/kg), Ba(mg/kg), Cr (mg/kg), Cu (mg/kg), Fe(mg/kg x 10^3), La (mg/kg), Mn(mg/kg), Ni (mg/kg), Pb (mg/kg), V(mg/kg) e Zn (mg/kg). Em **negrito** estão indicadas as correlações fortes, com r>0,7.

Parte 1					
Lago Limão (E18)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
MO (%)	30	21,05	10,67	27,13	4,13
Quartzo (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Muscovita (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Anatásio (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Caulinita (%)	30	3,81	0,00	8,20	2,29
Gibbsita (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Goethita (%)	30	93,29	83,00	98,00	4,41
Hematita (%)	30	2,90	0,00	12,00	3,56
Mt/Mh (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Óxidos de Fe (%)	30	96,19	91,80	100,00	2,29
Silte (%)	29	69,70	0,00	89,42	29,15
Argila (%)	29	14,54	0,00	41,98	10,29
Al (mg/kgx10^3)	30	114,54	84,28	147,48	22,20
As (mg/kg)	30	6,63	5,48	8,83	0,69
Ba (mg/kg)	30	299,30	237,04	361,15	36,25
Cr (mg/kg)	30	42,12	15,07	61,03	9,96
Cu (mg/kg)	30	10,32	0,00	44,50	12,80
Fe (mg/kgx10^3)	30	66,72	19,81	102,75	17,56
La (mg/kg)	30	23,52	10,53	34,77	7,47
Mn (mg/kg)	30	337,00	210,91	422,40	50,89
Ni (mg/kg)	30	7,28	2,64	14,40	3,32
Pb (mg/kg)	30	23,37	13,77	30,13	4,31
V (mg/kg)	30	98,13	63,80	134,79	15,05
Zn (mg/kg)	30	56,56	27,65	80,86	15,36
Lago Nova (E19)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
MO (%)	34	21,61	9,04	28,25	5,24
Quartzo (%)	34	5,54	0,00	12,00	2,86
Muscovita (%)	34	0,90	0,00	2,00	0,81
Anatásio (%)	34	3,55	0,00	6,00	1,19
Caulinita (%)	34	81,36	76,00	86,00	2,72
Gibbsita (%)	34	2,38	1,50	4,00	0,62

Parte 1					
Lago Nova (E19)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
Goethita (%)	34	5,41	2,00	8,00	1,56
Hematita (%)	34	0,78	0,00	3,50	0,84
Mt/Mh (%)	34	0,00	0,00	0,00	0,00
Óxidos de Fe (%)	34	6,19	3,00	10,00	1,52
Silte (%)	23	85,41	75,05	91,76	5,33
Argila (%)	23	14,07	7,66	24,88	5,54
Al (mg/kgx10^3)	34	100,74	1,17	161,87	42,02
As (mg/kg)	34	7,87	4,20	11,80	1,32
Ba (mg/kg)	34	323,58	147,76	486,48	53,03
Cr (mg/kg)	34	45,74	34,02	60,39	5,14
Cu (mg/kg)	34	26,47	0,00	128,49	32,85
Fe (mg/kgx10^3)	34	104,99	51,60	143,27	23,44
La (mg/kg)	34	31,18	18,66	41,05	4,46
Mn (mg/kg)	34	696,97	394,98	1154,31	243,80
Ni (mg/kg)	34	16,54	6,89	36,70	7,55
Pb (mg/kg)	34	32,30	22,78	41,21	5,27
V (mg/kg)	34	99,05	69,13	131,06	16,49
Zn (mg/kg)	34	61,33	39,28	117,87	19,13
Lago Juparanã (E20)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
MO (%)	35	16,05	14,33	17,89	1,15
Quartzo (%)	35	5,47	3,00	11,00	1,96
Muscovita (%)	35	4,44	0,00	14,00	3,15
Anatásio (%)	35	3,97	2,00	5,50	0,78
Caulinita (%)	35	74,57	65,00	83,00	4,51
Gibbsita (%)	35	3,89	3,00	5,00	0,46
Goethita (%)	35	6,10	1,20	10,00	2,09
Hematita (%)	35	1,56	0,00	7,00	1,73
Mt/Mh (%)	35	0,00	0,00	0,00	0,00
Óxidos de Fe (%)	35	7,66	2,00	13,00	2,50
Silte (%)	29	82,73	77,98	91,22	3,37
Argila (%)	29	17,27	8,78	22,02	3,37
Al (mg/kgx10^3)	35	142,67	65,32	157,80	15,95
As (mg/kg)	35	12,25	3,24	21,66	5,56
Ba (mg/kg)	35	492,51	121,43	625,07	75,91
Cr (mg/kg)	35	69,95	50,37	134,52	21,72
Cu (mg/kg)	35	22,93	12,95	90,18	14,47
Fe (mg/kgx10^3)	34	78,95	32,83	97,25	11,39
La (mg/kg)	35	43,08	32,46	54,24	6,32
Mn(mg/kg)	35	934,34	626,77	1705,87	251,77

Parte 1					
Lago Juparanã (E20)					
Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros
Ni (mg/kg)	35	27,46	20,74	38,41	4,82
Pb (mg/kg)	35	39,37	32,58	49,41	3,73
V (mg/kg)	35	91,22	73,44	110,21	8,52
Zn (mg/kg)	35	83,94	51,28	122,33	16,52
Lagoa Areão (E23)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
MO (%)	28	12,64	0,83	16,56	4,86
Quartzo (%)	27	24,56	9,00	100,00	30,56
Muscovita (%)	28	7,47	0,00	18,00	4,81
Anatásio (%)	28	2,15	0,00	3,50	1,09
Caulinita (%)	28	53,50	0,00	74,00	24,82
Gibbsita (%)	28	3,46	0,00	6,00	2,08
Goethita (%)	28	4,78	0,00	8,00	2,44
Hematita (%)	28	1,39	0,00	3,31	1,28
Mt/Mh (%)	28	0,00	0,00	0,00	0,00
Óxidos de Fe (%)	28	6,17	0,00	9,50	3,21
Silte (%)	25	46,55	0,00	87,25	40,17
Argila (%)	25	11,02	0,00	43,07	11,77
Al (mg/kgx10^3)	28	119,81	10,23	177,72	48,95
As (mg/kg)	28	16,61	0,00	31,97	8,67
Ba (mg/kg)	28	515,54	284,45	611,71	84,75
Cr (mg/kg)	28	58,95	0,00	85,75	24,63
Cu (mg/kg)	28	20,13	0,00	34,97	6,93
Fe (mg/kgx10^3)	28	86,84	7,97	130,35	37,40
La (mg/kg)	28	37,96	1,64	55,10	16,54
Mn (mg/kg)	28	1314,22	264,58	2310,83	548,21
Ni (mg/kg)	28	26,72	0,00	52,15	13,75
Pb (mg/kg)	28	30,47	9,08	38,84	9,39
V (mg/kg)	28	68,64	5,25	90,43	27,02
Zn (mg/kg)	28	57,92	11,93	85,57	18,39
Lagoa Areal (E24)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
MO (%)	30	25,01	19,70	26,96	2,06
Quartzo (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Muscovita (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Anatásio (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Caulinita (%)	30	3,81	0,00	8,20	2,29
Gibbsita (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Goethita (%)	30	93,29	83,00	98,00	4,41
Hematita (%)	30	2,90	0,00	12,00	3,56

Parte 1					
Lagoa Areal (E24)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
Mt/Mh (%)	30	0,00	0,00	0,00	0,00
Óxidos de Fe (%)	30	96,19	91,80	100,00	2,29
Silte (%)	14	50,81	28,32	88,86	17,05
Argila (%)	14	48,61	10,38	71,42	17,08
Al (mg/kgx10^3)	30	39,00	18,82	52,11	8,93
As (mg/kg)	30	62,76	45,93	78,40	9,09
Ba (mg/kg)	30	166,81	133,36	196,14	14,66
Cr (mg/kg)	30	84,90	60,79	130,75	21,32
Cu (mg/kg)	30	12,13	0,00	50,13	12,13
Fe (mg/kgx10^3)	30	406,46	352,94	494,49	34,13
La (mg/kg)	30	2,30	0,00	12,78	3,52
Mn (mg/kg)	30	868,17	541,50	1607,82	195,94
Ni (mg/kg)	30	2,17	0,00	26,20	6,70
Pb (mg/kg)	30	10,98	6,90	16,97	2,48
V (mg/kg)	30	108,00	58,93	156,84	21,40
Zn (mg/kg)	30	55,57	36,46	84,08	12,94
Laguna Monsarás (E25)					
Parâmetros	N amostral	Média	Mínima	Máxima	Desvio Padrão
MO (%)	27	0,86	0,22	6,07	1,10
Quartzo (%)	27	99,19	88,00	100,00	2,95
Muscovita (%)	27	0,00	0,00	0,00	0,00
Anatásio (%)	27	0,00	0,00	0,00	0,00
Caulinita (%)	27	0,81	0,00	12,00	2,95
Gibbsita (%)	27	0,00	0,00	0,00	0,00
Goethita (%)	27	0,00	0,00	0,00	0,00
Hematita (%)	27	0,00	0,00	0,00	0,00
Mt/Mh (%)	27	0,00	0,00	0,00	0,00
Óxidos de Fe (%)	27	0,00	0,00	0,00	0,00
Silte (%)	14	50,81	28,32	88,86	17,05
Argila (%)	14	48,61	10,38	71,42	17,08
Al (mg/kgx10^3)	27	1,70	0,51	6,52	1,41
As (mg/kg)	27	1,56	0,00	12,17	3,25
Ba (mg/kg)	27	319,69	250,15	358,17	28,66
Cr (mg/kg)	27	1,03	0,00	27,85	5,36
Cu (mg/kg)	27	10,77	0,00	80,53	17,36
Fe (mg/kgx10^3)	27	10,38	2,37	43,45	9,73
La (mg/kg)	27	1,71	0,00	4,07	1,14
Mn (mg/kg)	27	150,85	50,36	624,46	124,93
Ni (mg/kg)	27	4,20	0,00	77,48	15,40
Pb (mg/kg)	27	8,89	6,07	17,25	2,38

Parte 1					
Laguna Monsarás (E25)					
Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros	Parâmetros
V (mg/kg)	27	10,38	3,58	31,87	5,74
Zn (mg/kg)	27	19,42	8,06	52,31	10,10

Parte 2

Lago Limão- E18

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
MO	1,00				-0,61		0,65	-0,42		0,61	0,49	**-0,82**	**-0,91**	-0,51	0,43	-0,55	0,64	-0,64	0,69	0,05	0,65	0,43	-0,17	0,56
Quartzo		1,00																						
Muscovita			1,00																					
Anatásio				1,00																				
Caulinita					1,00		-0,63	0,11		-1,00	-0,50	0,58	0,67	0,13	**-0,70**	0,08	-0,38	0,44	**-0,82**	-0,22	-0,69	-0,67	-0,05	**-0,79**
Gibbsita						1,00																		
Goethita							1,00	**-0,83**		0,63	0,36	-0,59	**-0,75**	-0,40	0,42	-0,30	0,54	-0,52	0,66	-0,12	0,59	0,49	-0,11	0,65
Hematita								1,00		-0,11	-0,11	0,40	0,48	0,49	0,00	0,40	-0,39	0,37	-0,22	0,37	-0,26	-0,10	0,20	-0,22
Mt/Mh									1,00															
Óxidos de Fe										1,00	0,50	-0,58	-0,67	-0,13	**0,70**	-0,08	0,38	-0,44	**0,82**	0,22	0,69	0,67	0,05	**0,79**
Silte											1,00	-0,24	-0,52	-0,13	0,25	0,00	0,11	-0,36	0,55	0,08	0,48	0,43	0,12	0,46
Argila												1,00	**0,80**	0,45	-0,47	0,55	-0,62	0,62	-0,53	0,10	-0,58	-0,33	0,19	-0,48
Al													1,00	0,40	-0,51	0,46	**-0,70**	0,65	**-0,75**	0,05	-0,67	-0,52	0,19	-0,67
As														1,00	0,18	0,60	-0,27	0,31	-0,06	0,40	-0,36	0,13	0,36	-0,01
Ba															1,00	0,07	0,41	-0,34	**0,81**	0,39	0,61	**0,83**	0,18	**0,81**
Cr																1,00	-0,21	0,16	0,05	0,23	0,02	0,29	**0,77**	0,13
Cu																	1,00	-0,47	0,59	0,13	0,62	0,53	-0,02	0,62
Fe																		1,00	-0,50	0,24	-0,56	-0,33	-0,05	-0,45
La																			1,00	0,33	**0,81**	**0,92**	0,23	**0,94**
Mn																				1,00	0,15	0,40	0,07	0,25
Ni																					1,00	**0,75**	0,23	**0,80**
Pb																						1,00	0,42	**0,93**
V																							1,00	0,25
Zn																								1,00

Lago Nova- E19

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
MO	1,00	0,15	-0,65	-0,14	0,18	-0,59	0,18	-0,02		0,15	0,63	-0,61	-0,67	0,18	-0,04	-0,15	**0,81**	**0,74**	0,07	**0,82**	0,57	-0,44	0,58	0,62
Quartzo		1,00	0,03	-0,09	-0,61	-0,37	-0,48	0,22		-0,37	0,19	0,02	-0,08	0,30	-0,09	-0,20	0,17	0,13	0,03	0,23	0,01	0,00	0,19	0,05
Muscovita			1,00	-0,02	-0,35	0,39	-0,06	-0,16		-0,17	-0,36	0,27	0,51	0,06	0,12	-0,01	-0,54	-0,50	-0,11	-0,49	-0,41	0,35	-0,33	-0,45
Anatásio				1,00	-0,36	0,16	0,12	-0,09		0,09	-0,12	0,06	0,11	-0,08	-0,11	-0,35	-0,15	-0,24	-0,07	-0,18	-0,19	0,10	-0,15	-0,15
Caulinita					1,00	-0,05	-0,04	-0,21		-0,15	-0,05	-0,11	-0,22	-0,19	0,07	0,32	0,13	0,24	0,15	0,06	0,12	-0,11	0,13	0,10
Gibbsita						1,00	-0,01	-0,01		0,01	-0,62	0,59	0,65	-0,14	0,02	0,00	-0,61	-0,65	-0,24	-0,62	-0,52	0,32	-0,56	-0,44
Goethita							1,00	-0,30		**0,84**	0,05	-0,11	-0,04	-0,02	0,04	0,12	0,33	0,07	0,10	0,18	0,41	-0,03	0,12	0,37
Hematita								1,00		0,20	0,36	-0,34	-0,18	-0,09	0,01	-0,17	-0,21	0,02	-0,41	0,16	-0,02	-0,44	-0,29	-0,38
Mt/Mh									1,00															
Óxidos de Fe										1,00	0,18	-0,24	-0,11	-0,09	0,08	0,09	0,23	0,09	-0,02	0,25	0,43	-0,18	0,01	0,20
Silte											1,00	**-0,93**	**-0,79**	-0,19	0,04	-0,45	0,57	0,70	-0,41	**0,82**	0,45	**-0,72**	0,17	0,16
Argila												1,00	**0,79**	0,23	-0,07	0,38	-0,51	**-0,74**	0,36	**-0,82**	-0,59	**0,78**	-0,18	0,01
Al													1,00	0,22	0,15	0,27	-0,59	**-0,74**	0,09	-0,65	-0,38	0,65	-0,39	-0,39
As														1,00	0,43	0,25	0,06	-0,11	0,27	0,24	0,22	0,42	0,16	0,17
Ba															1,00	0,38	0,01	-0,07	0,43	0,32	0,31	0,24	0,05	0,07

Parte 2

Lago Nova- E19

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Cr																1,00	0,02	-0,10	0,63	0,02	0,35	0,34	0,31	0,19
Cu																	1,00	**0,72**	0,24	**0,74**	0,68	-0,31	**0,70**	**0,72**
Fe																		1,00	0,07	**0,76**	0,57	-0,59	0,62	0,49
La																			1,00	0,17	0,41	0,47	0,62	0,49
Mn																				1,00	0,68	-0,49	0,53	0,50
Ni																					1,00	-0,24	0,56	0,50
Pb																						1,00	0,06	0,13
V																							1,00	**0,80**
Zn																								1,00

Lago Juparanã - E20

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
MO	1,00	0,09	-0,38	0,47	0,28	0,27	-0,11	0,00		-0,06	0,07	-0,07	-0,52	**-0,82**	-0,18	**-0,74**	-0,26	-0,65	0,26	-0,51	-0,63	-0,25	-0,50	-0,01
Quartzo		1,00	0,45	0,48	-0,69	0,32	-0,44	0,08		-0,23	-0,08	0,08	-0,39	-0,19	0,28	-0,04	0,04	-0,31	0,57	-0,51	0,14	0,45	0,15	0,39
Muscovita			1,00	0,23	**-0,80**	0,10	-0,09	-0,09		-0,10	-0,26	0,26	0,20	0,29	0,33	0,40	0,04	0,26	0,25	-0,13	0,40	0,48	0,40	0,18
Anatásio				1,00	-0,39	0,34	-0,31	-0,01		-0,22	0,00	0,00	-0,27	-0,53	0,06	-0,39	-0,12	-0,40	0,43	-0,68	-0,32	0,17	-0,12	0,10
Caulinita					1,00	-0,16	0,02	-0,18		-0,14	0,11	-0,11	-0,03	-0,11	-0,26	-0,19	-0,01	-0,18	-0,23	0,28	-0,30	-0,41	-0,22	-0,28
Gibbsita						1,00	-0,44	-0,17		-0,39	-0,02	0,02	-0,37	-0,24	0,31	-0,09	-0,08	-0,47	0,43	-0,35	0,02	0,17	0,07	0,22
Goethita							1,00	-0,01		0,68	0,19	-0,19	0,19	0,03	-0,35	-0,14	-0,22	0,27	-0,58	0,15	-0,10	-0,37	-0,27	-0,33
Hematita								1,00		0,65	-0,15	0,15	0,17	-0,11	-0,14	-0,10	0,33	0,26	-0,08	0,16	-0,08	0,01	-0,14	0,32
Mt/Mh									1,00															
Óxidos de Fe										1,00	0,01	-0,01	0,26	-0,07	-0,35	-0,19	0,10	0,36	-0,49	0,27	-0,15	-0,28	-0,31	0,05
Silte											1,00	-1,00	0,05	-0,13	-0,40	-0,19	-0,06	0,08	-0,25	-0,05	-0,03	-0,36	-0,22	0,07
Argila												1,00	-0,05	0,13	0,40	0,19	0,06	-0,08	0,25	0,05	0,03	0,36	0,22	-0,07
Al													1,00	0,50	0,08	0,36	-0,01	**0,72**	-0,43	0,62	0,26	-0,03	0,15	-0,11
As														1,00	0,35	**0,89**	0,28	0,64	-0,15	0,56	0,69	0,40	0,66	-0,01
Ba															1,00	0,51	-0,03	-0,03	0,65	0,03	0,37	**0,78**	0,68	0,25
Cr																1,00	0,32	0,46	0,08	0,47	**0,79**	0,57	**0,83**	0,10
Cu																	1,00	0,21	0,17	0,10	0,39	0,32	0,24	0,59
Fe																		1,00	-0,39	0,62	0,28	0,06	0,18	0,00
La																			1,00	-0,46	0,09	**0,72**	0,44	0,45
Mn																				1,00	0,21	-0,08	0,25	-0,13
Ni																					1,00	0,49	0,65	0,33
Pb																						1,00	**0,81**	0,55
V																							1,00	0,34
Zn																								1,00

Lagoa Areão - E23

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
MO	1,00	-0,59	0,09	**0,89**	**0,73**	0,09	0,59	0,51		**0,66**	0,49	0,58	0,60	0,12	0,05	0,19	-0,03	0,65	0,15	0,42	0,38	0,24	0,31	0,43
Quartzo		1,00	-0,11	-0,68	**-0,79**	-0,04	-0,22	-0,38		-0,42	-0,24	-0,34	-0,57	-0,06	-0,14	-0,09	0,25	-0,53	-0,10	-0,24	-0,08	-0,11	-0,38	-0,20
Muscovita			1,00	0,02	-0,05	**0,94**	0,55	0,24		0,39	-0,14	-0,38	0,10	**0,92**	**0,72**	**0,90**	0,38	0,41	**0,91**	0,65	**0,74**	**0,88**	0,58	0,62
Anatásio				1,00	**0,83**	0,03	0,49	0,52		0,61	0,56	0,70	0,69	0,03	0,10	0,09	-0,12	0,59	0,03	0,27	0,27	0,13	0,33	0,31

Parte 2

Lagoa Areão - E23

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Caulinita					1,00	-0,05	0,21	0,40		0,39	0,51	**0,76**	**0,80**	-0,12	0,16	0,00	-0,19	0,49	-0,03	0,20	0,06	0,03	0,40	0,18
Gibbsita						1,00	0,55	0,27		0,38	0,05	-0,28	0,14	**0,86**	**0,78**	**0,90**	0,42	0,36	**0,92**	0,62	**0,76**	**0,87**	0,64	0,64
Goethita							1,00	0,33		**0,75**	0,24	0,03	0,19	0,56	0,38	0,53	0,20	0,55	0,55	0,61	**0,74**	0,55	0,41	0,51
Hematita								1,00		**0,81**	0,40	0,31	0,44	0,23	0,17	0,39	0,13	0,58	0,32	-0,03	0,30	0,37	0,50	0,46
Mt/Mh									1,00															
Óxidos de Fe										1,00	0,35	0,19	0,36	0,41	0,26	0,48	0,11	0,63	0,45	0,33	0,56	0,47	0,40	0,61
Silte											1,00	0,64	0,46	-0,18	0,02	0,06	0,28	0,24	0,02	-0,11	0,16	0,10	0,61	0,16
Argila												1,00	0,67	-0,47	-0,22	-0,33	-0,12	0,24	-0,37	-0,15	-0,19	-0,26	0,26	-0,16
Al													1,00	0,00	0,31	0,08	-0,21	0,64	0,07	0,13	0,18	0,06	0,34	0,29
As														1,00	0,69	**0,89**	0,36	0,39	**0,91**	0,67	**0,77**	**0,87**	0,50	0,69
Ba															1,00	**0,75**	0,26	0,21	**0,79**	0,52	0,56	0,69	0,49	0,55
Cr																1,00	0,47	0,35	**0,97**	0,61	**0,79**	**0,98**	0,65	**0,73**
Cu																	1,00	0,03	0,50	0,20	0,33	0,57	0,48	0,29
Fe																		1,00	0,35	0,40	0,44	0,36	0,46	0,41
La																			1,00	0,63	**0,77**	**0,96**	0,64	**0,71**
Mn																				1,00	0,61	0,62	0,27	0,55
Ni																					1,00	**0,79**	0,55	**0,79**
Pb																						1,00	0,69	0,69
V																							1,00	0,47
Zn																								1,00

Lagoa Areal - E24

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
MO	1,00				0,40		-0,46	0,34		-0,40	-0,43	0,42	0,40	-0,44	0,50	-0,59	-0,24	-0,65	-0,60	0,10	-0,33	0,20	-0,27	0,33
Quartzo		1,00																						
Muscovita			1,00																					
Anatásio				1,00																				
Caulinita					1,00		-0,63	0,11		-1,00	-0,33	0,33	0,47	-0,69	0,56	**-0,72**	0,11	-0,59	-0,32	0,60	-0,27	0,48	-0,57	0,56
Gibbsita						1,00																		
Goethita							1,00	**-0,83**		0,63	0,10	-0,10	-0,36	0,47	-0,42	0,56	-0,12	0,53	0,50	-0,38	0,06	-0,39	0,33	-0,58
Hematita								1,00		-0,11	-0,08	0,08	0,14	-0,17	0,14	-0,25	0,14	-0,29	-0,42	0,08	0,09	0,14	-0,07	0,37
Mt/Mh									1,00															
Óxidos de Fe										1,00	0,33	-0,33	-0,47	0,69	-0,56	**0,72**	-0,11	0,59	0,32	-0,60	0,27	-0,48	0,57	-0,56
Silte											1,00	-1,00	0,29	0,34	0,15	0,60	0,27	0,16	0,10	-0,24	0,14	0,32	0,34	-0,07
Argila												1,00	-0,27	-0,34	-0,19	-0,57	-0,25	-0,18	-0,13	0,24	-0,14	-0,28	-0,33	0,09
Al													1,00	-0,55	0,32	-0,44	0,21	-0,65	-0,44	0,19	-0,31	0,38	-0,39	0,48
As														1,00	-0,52	**0,92**	-0,32	0,55	0,37	**-0,74**	0,13	-0,19	**0,95**	-0,51
Ba															1,00	-0,50	0,09	-0,36	-0,07	0,50	-0,06	0,37	-0,41	0,51
Cr																1,00	-0,11	0,57	0,45	-0,61	0,16	-0,12	**0,83**	-0,43
Cu																	1,00	-0,08	0,05	0,36	0,28	0,22	-0,38	0,37
Fe																		1,00	**0,76**	-0,22	0,24	-0,47	0,36	-0,57
La																			1,00	-0,08	0,15	-0,21	0,26	-0,32

Parte 2

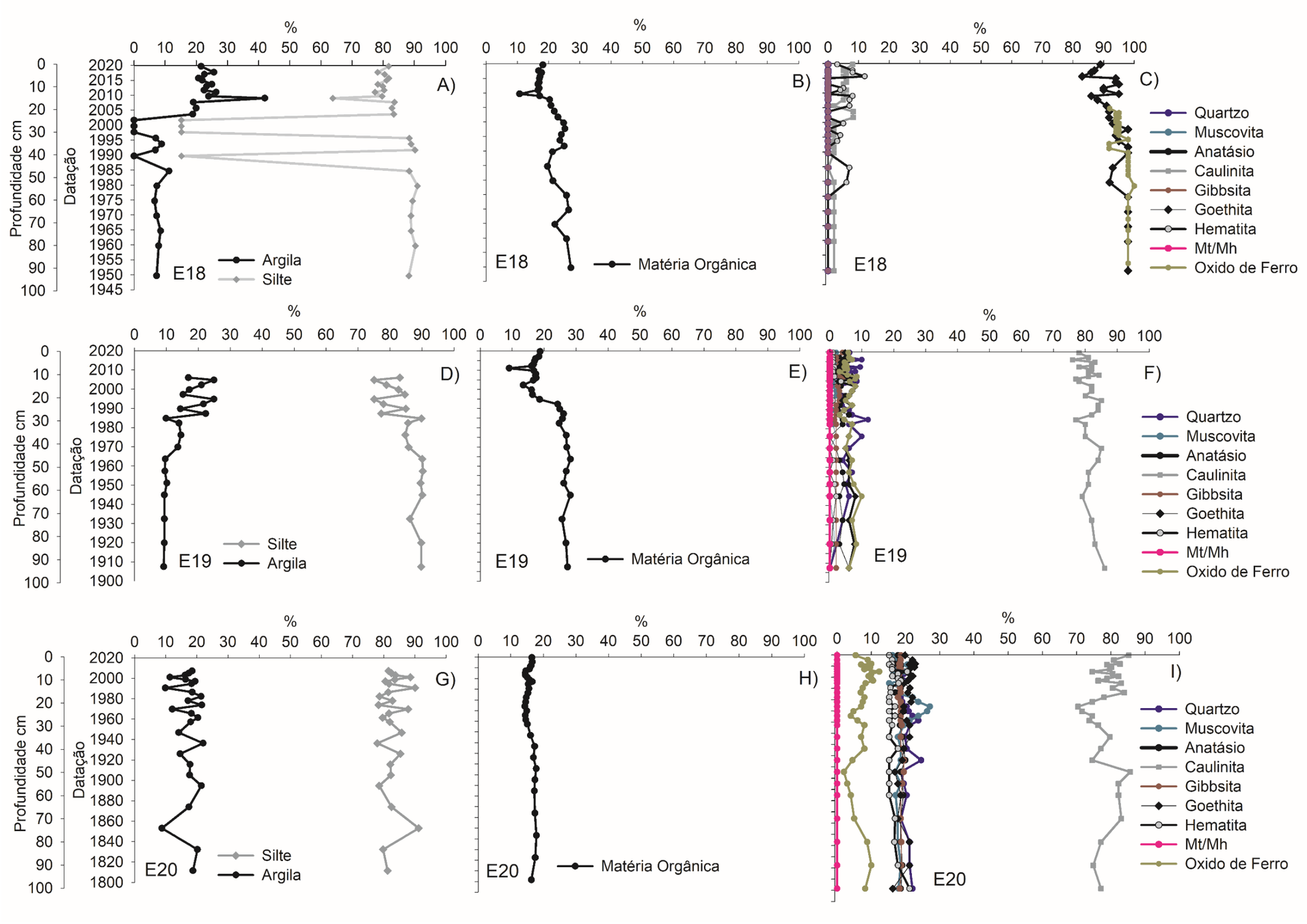
Lagoa Areal - E24

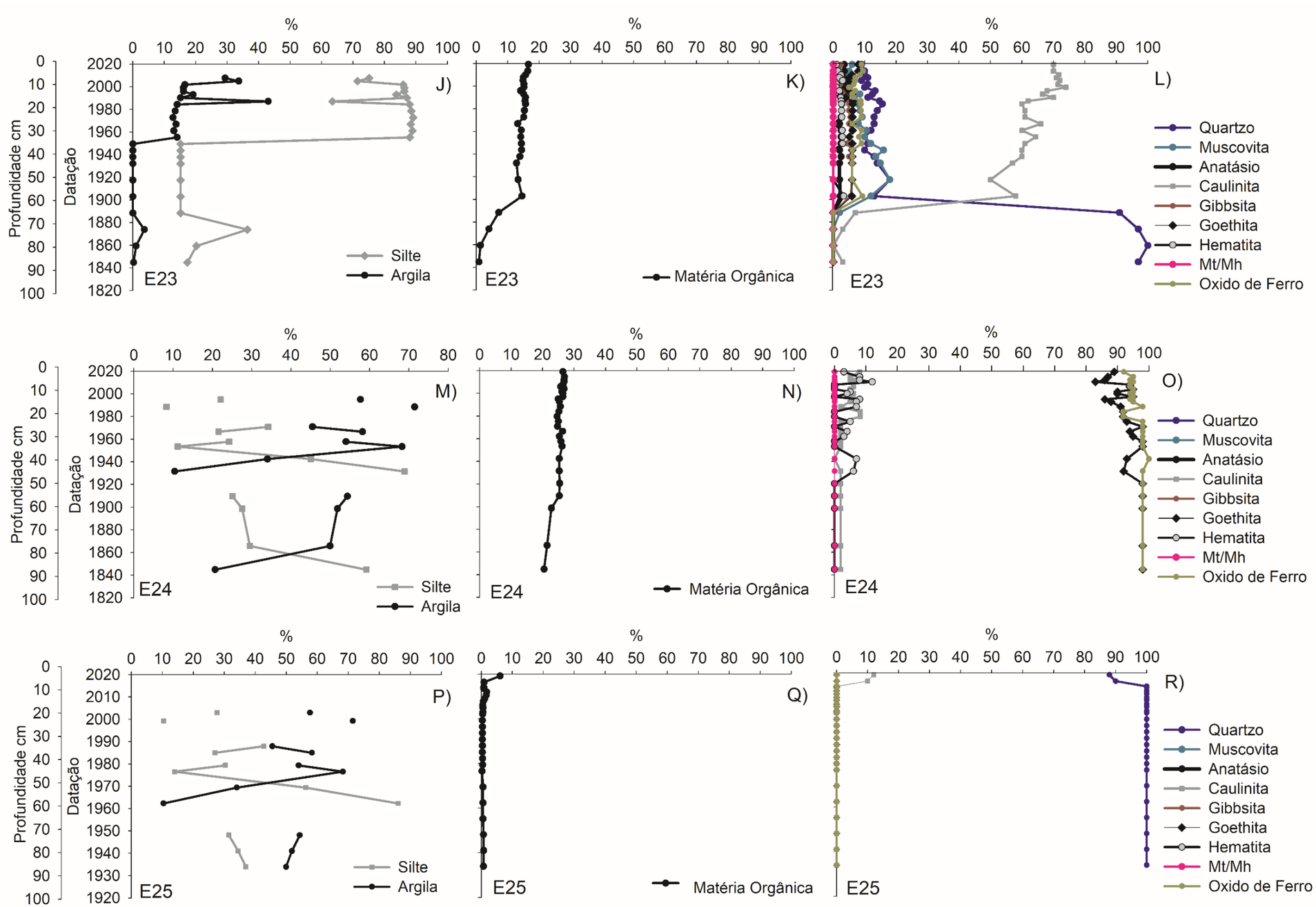
	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
Mn																				1,00	0,06	0,09	**-0,81**	0,38
Ni																					1,00	0,11	0,04	-0,01
Pb																						1,00	-0,05	**0,72**
V																							1,00	-0,36
Zn																								1,00

Laguna Monsarás - E25

	MO	Quartzo	Muscovita	Anatásio	Caulinita	Gibbsita	Goethita	Hematita	Mt/Mh	Óxidos de Fe	Silte	Argila	Al	As	Ba	Cr	Cu	Fe	La	Mn	Ni	Pb	V	Zn
MO	1,00	-0,40			0,40						0,63	-0,59	-0,17	0,69	0,21	0,33	0,51	0,21	0,30	0,19	-0,10	**0,71**	0,12	0,20
Quartzo	-0,40	1,00			-1,00								-0,04	-0,62	0,09	**-0,72**	-0,24	-0,16	0,12	-0,19	-0,37	-0,42	-0,12	-0,42
Muscovita			1,00																					
Anatásio				1,00																				
Caulinita					1,00								0,04	0,62	-0,09	**0,72**	0,24	0,16	-0,12	0,19	0,37	0,42	0,12	0,42
Gibbsita						1,00																		
Goethita							1,00																	
Hematita								1,00																
Mt/Mh									1,00															
Óxidos de Fe										1,00														
Silte											1,00	-1,00	-0,60		0,57		0,08	0,06	-0,34	0,16	-0,50	0,45	0,18	0,15
Argila												1,00	0,59		-0,50		-0,08	-0,15	0,33	-0,25	0,50	-0,45	-0,26	-0,24
Al													1,00	0,22	-0,54	0,05	-0,20	-0,15	0,17	-0,10	0,33	-0,25	-0,13	-0,07
As														1,00	-0,10	0,45	0,44	0,16	0,40	0,24	0,15	0,61	0,07	0,39
Ba															1,00	-0,30	0,19	-0,02	-0,02	0,00	-0,47	0,37	0,06	0,13
Cr																1,00	0,21	0,33	-0,28	0,33	0,55	0,33	0,33	0,33
Cu																	1,00	0,20	0,28	0,21	-0,06	0,42	0,11	0,40
Fe																		1,00	0,17	**0,93**	-0,03	0,47	**0,93**	0,53
La																			1,00	0,17	-0,32	0,24	0,00	0,32
Mn																				1,00	-0,04	0,42	**0,92**	0,53
Ni																					1,00	-0,16	-0,08	0,01
Pb																						1,00	0,39	0,46
V																							1,00	0,48
Zn																								1,00

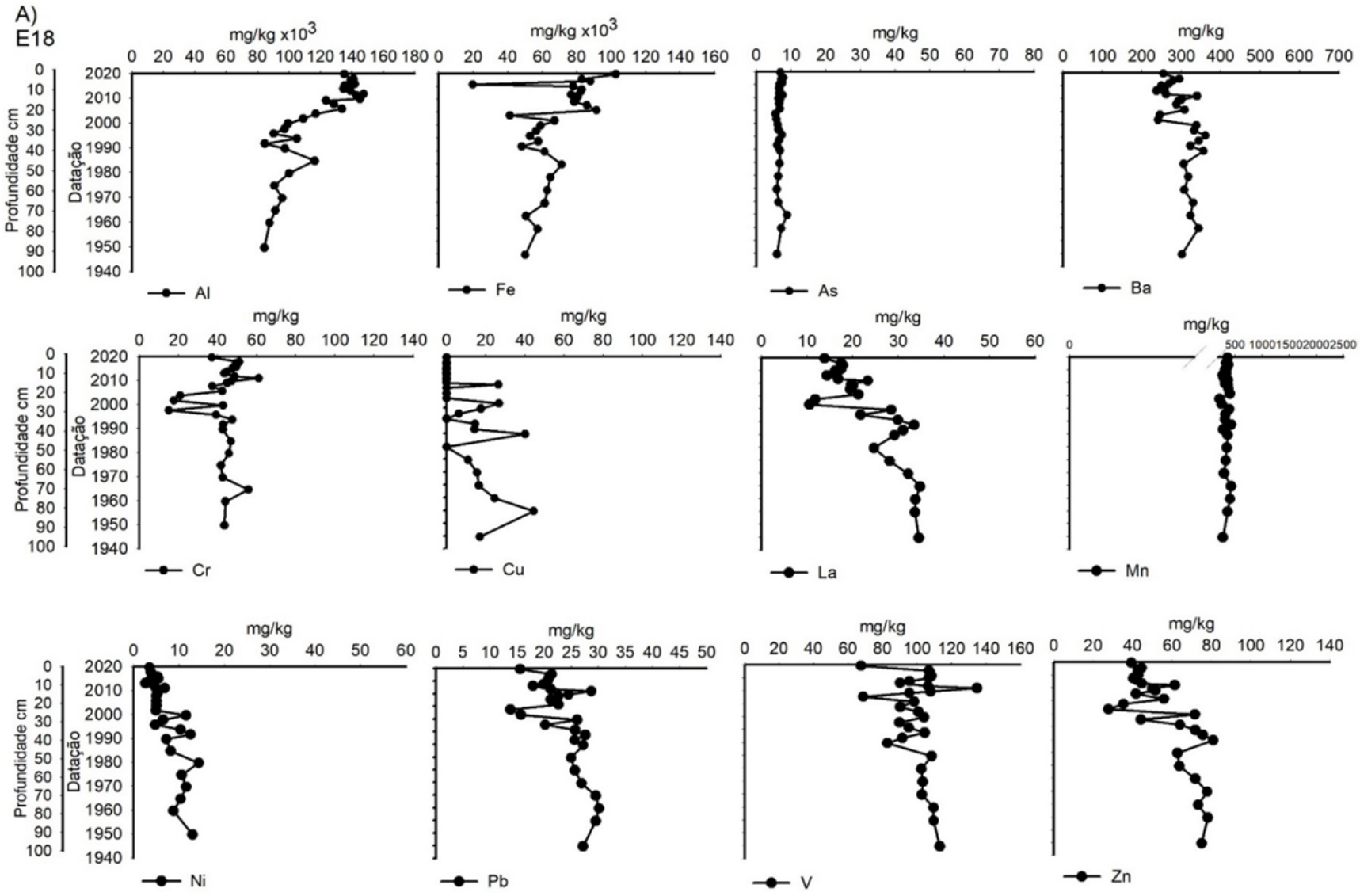
Figura 8: Gráficos de linha com resultados da perfilagem, do indicador Testemunho dos Sedimentos nos setores lagos e lagoas, com datação (ano), profundidade (m), granulometria (%), matéria orgânica (MO) (%) e composição mineralógica (%): A) granulometria, B) matéria orgânica e C) mineralogia do Lago Limão (E18); D) granulometria, E) matéria orgânica e F) mineralogia do Lago Nova (E19); G) granulometria, H) matéria orgânica e I) mineralogia do Lago Juparanã (E20); J) granulometria, K) matéria orgânica e L) mineralogia da Lagoa Areão (E23); M) granulometria, N) matéria orgânica e O) mineralogia da Lagoa Areal (E24); P) granulometria, Q) matéria orgânica e R) mineralogia da Laguna Monsarás (E25). Período amostral de outubro/2018 a setembro/2019.

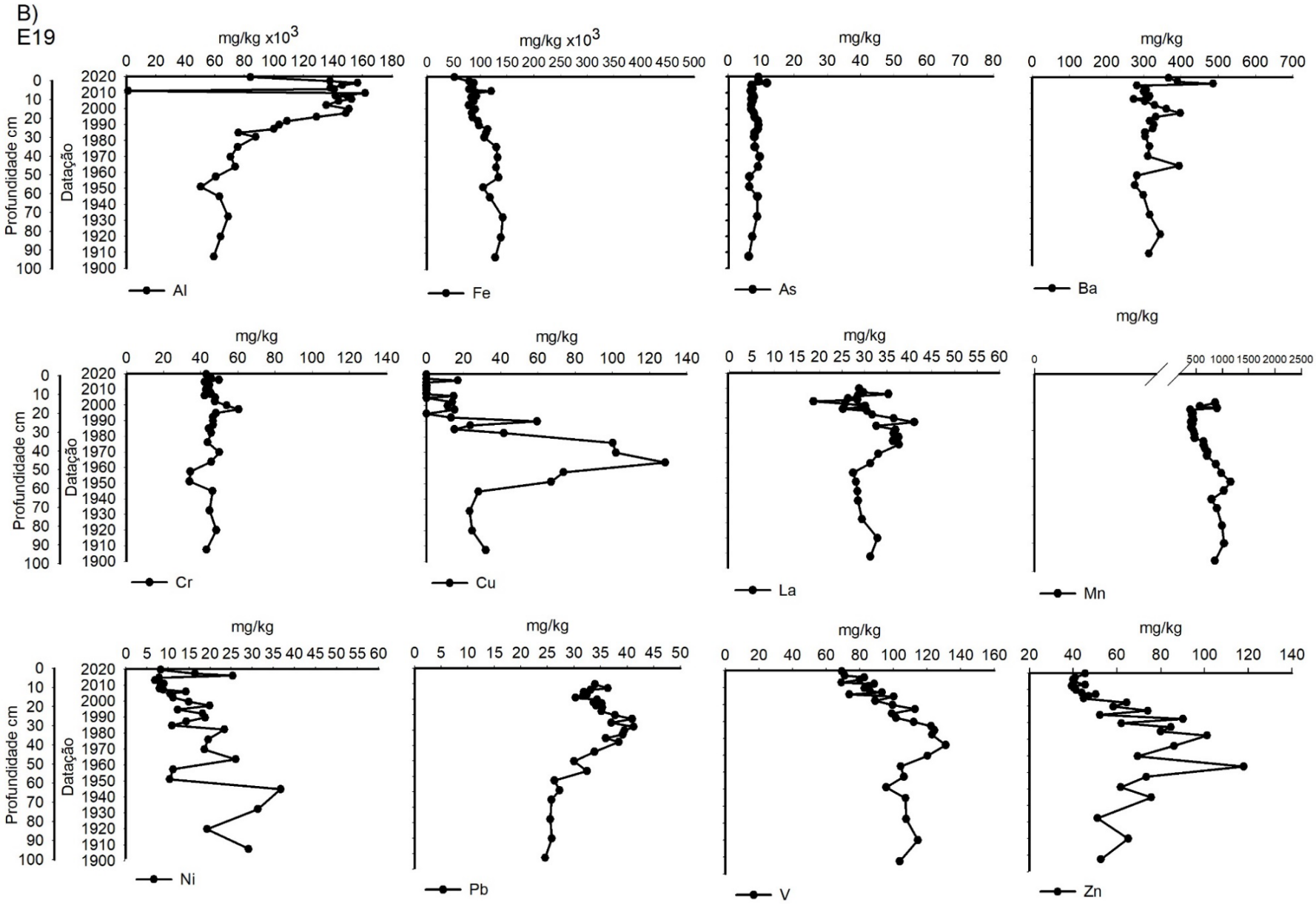




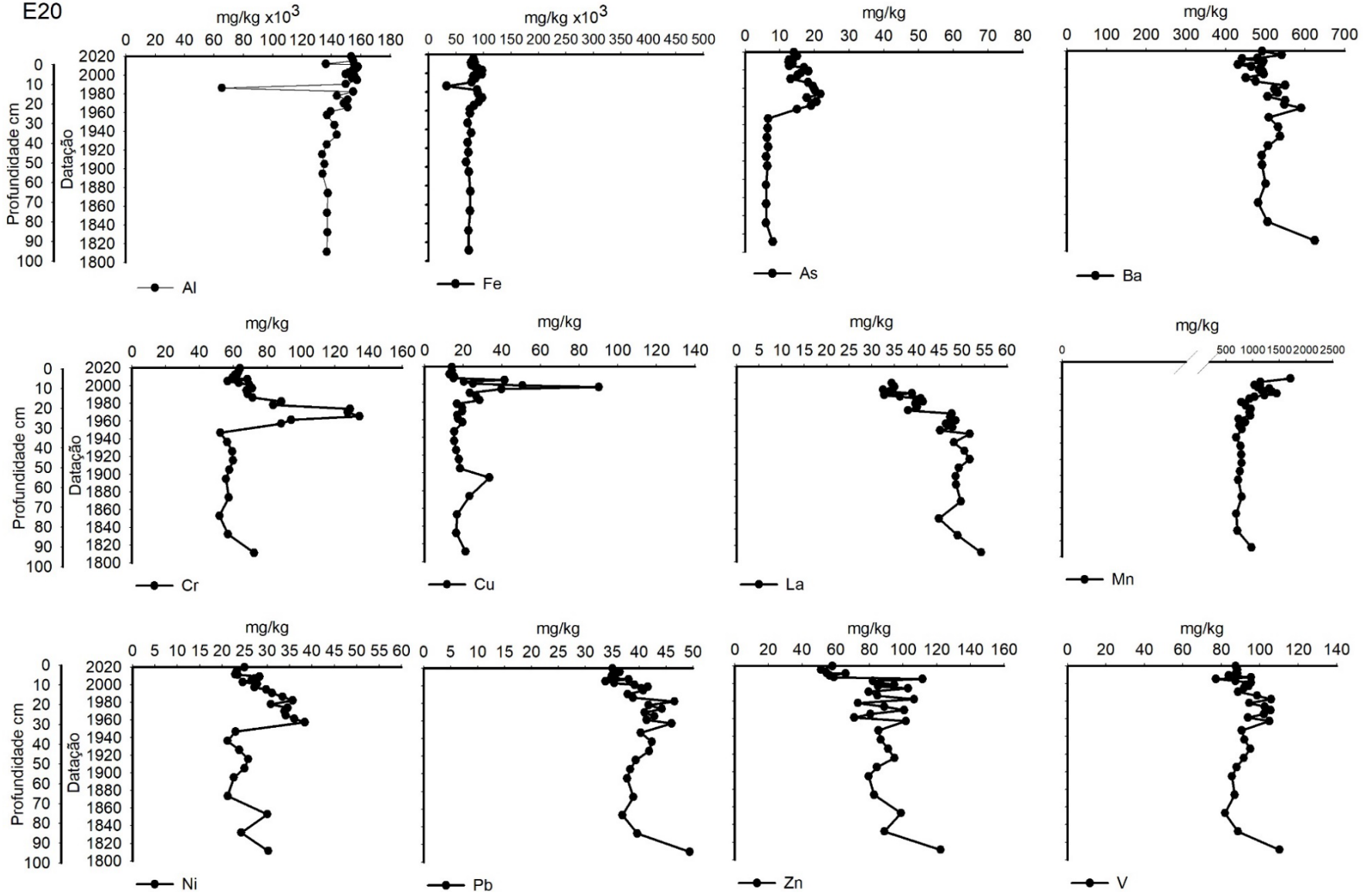
Com exceção do testemunho da Laguna Monsarás (E25), cuja composição é basicamente mineral, quartzo (Figura 8R), com conteúdo médio de matéria orgânica 0,86±1,08 % (Quadro 2- Parte 1), os demais testemunhos apresentaram composição orgânica, com conteúdo médio de matéria orgânica entre 12,64±4,67 a 25,01±2,06% (Quadro 2- Parte 1). A composição mineralógica predominante do sedimento é de caulinita, seguida por variações nos teores de gibbsita, goethita, anatásio, quartzo e muscovita (Quadro 2; Figura 8, F, I, L, O).

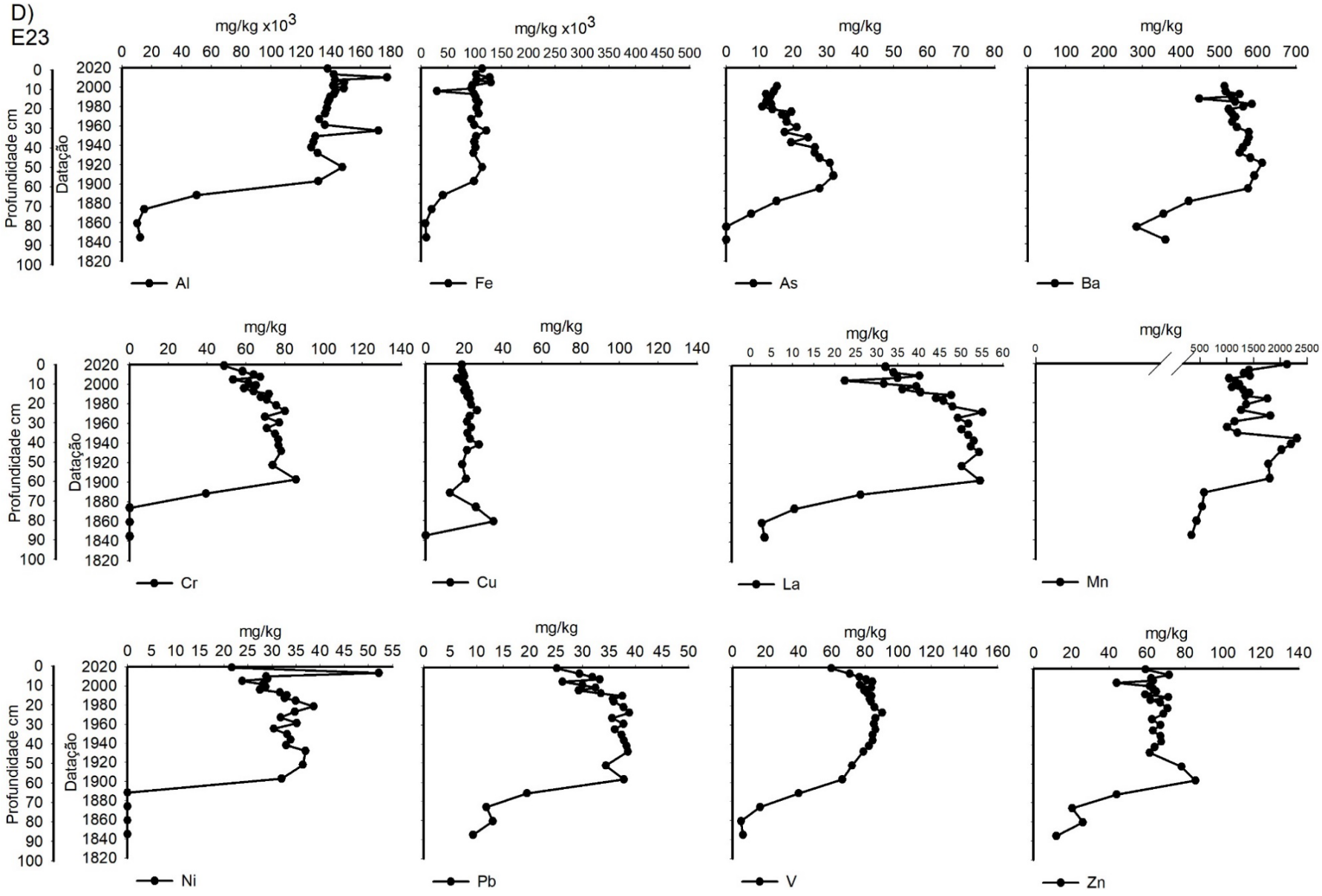
Figura 9: Gráficos de linha com datação (ano), profundidade (m), e conteúdo de metais em (mg/kg) do indicador Testemunho dos Sedimentos no setor lagos: A) Lago Limão (E18); B) Lago Nova (E19); C) Lago Juparanã (E20); e no setor das lagoas: D) Lagoa Areão (E23); E) Lagoa Areal (E24); F) Laguna Monsarás (E25) Período amostral de outubro/2018 a setembro/2019.

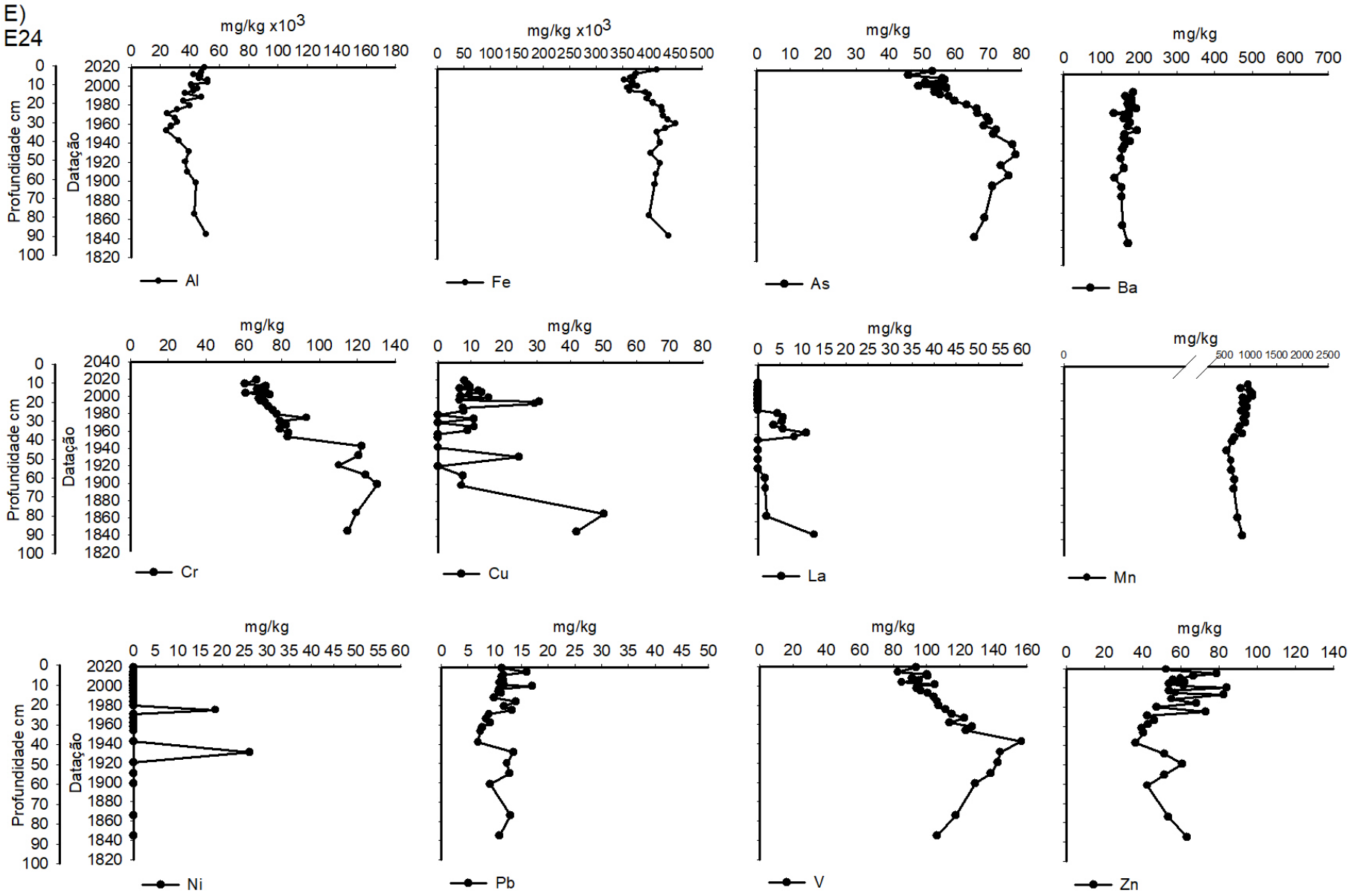



B)
E19
mg/kg x10^3
mg/kg
Profundidade cm
Datação
Al
Fe
As
Ba
Cr
Cu
La
Mn
Ni
Pb
V
Zn

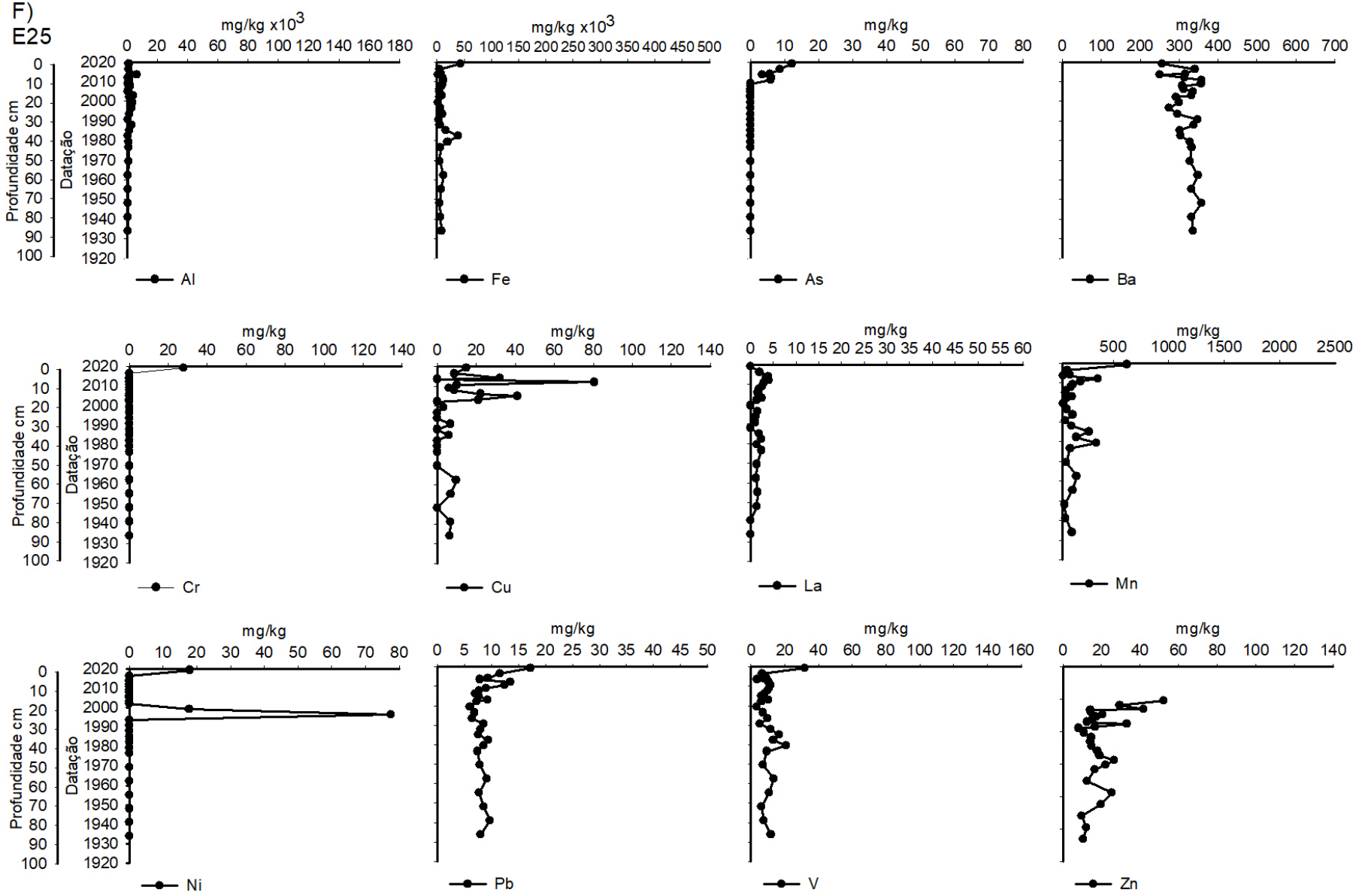
C)
E20


mg/kg x10^3
mg/kg
Profundidade cm
Datação
Al
Fe
As
Ba
Cr
Cu
La
Mn
Ni
Pb
Zn
V


D)
E23
Profundidade cm
Datação
Al
Fe
As
Ba
Cr
Cu
La
Mn
Ni
Pb
V
Zn
mg/kg x10³
mg/kg


E)
E24
Profundidade cm
Datação
mg/kg x10^3
Al
Fe
mg/kg
As
Ba
Cr
Cu
La
Mn
Ni
Pb
V
Zn

F)
E25


Profundidade cm
Datação
mg/kg x10^3
Al
Fe
mg/kg
As
Ba
Cr
Cu
La
Mn
Ni
Pb
V
Zn

As concentrações de Fe, Al, Mn, Ba e As nos testemunhos de sedimentos variaram entre $2,37x10^2$ a $4,94x10^4$, $5,10x10^2$ a $1,77x10^5$, 50,36 a $2,61x10^3$, $1,21x10^2$ a $6,25x10^2$ mg/kg e de 0 a 7,8x10, respectivamente (Quadro 2 – parte 1; Figura 9, A, B, C, D, E, F). A ordem decrescente de concentrações médias de metais nos testemunhos dos ecossistemas lacustres seguiu a seguinte sequência para Al = E20 > E18 > E23 > E19 > E24 > E25; Fe = E24 > E19 > E23 > E20 > E18 > E25; Mn = E23 > E20 > E24 > E19 > E18 > E25; e Ba = E23 > E20 > E19 > E25 > E18 > E24. As concentrações máximas de Fe, Al, Mn e Ba foram registradas nas estações E24, E23, E23 e E20, respectivamente.

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

Ao longo de anos de monitoramento do PMBA/Fest-UFES, o indicador ‘claridade da água’, representado pelos parâmetros MPS (mg/L) e turbidez (UNT), vem indicando de forma eficaz a influência da sazonalidade para as oscilações das concentrações de material particulado do rio Doce até o oceano costeiro, assim como a influência da sazonalidade para conectividade hidrológica lateral entre o rio Doce e os ecossistemas lacustres das planícies fluviais e costeira (Miller *et al.*, 2023). No contexto de desastres tecnológicos, como o que ocorreu em 2015 pelo rompimento da Barragem de Fundão (Mariana, MG), é importante destacar que o fluxo de material ligado ao desastre (MLD) apresenta impactos que vão além da fase aguda (observáveis apenas logo após o rompimento). Os efeitos crônicos podem se estender por tempo indeterminado e influenciar de forma contínua o sistema flúvio-lacustre-estuarino-marinho. Por exemplo, logo após o rompimento é prevista a redução do fluxo de MLD, sendo que, por muitos anos após o rompimento, é possível identificar pulsos na remobilização e exportação de sedimentos durante eventos de alta vazão fluvial (Hatje *et al.*, 2017; Magris *et al.*, 2019; Miller *et al.*, 2023). Nesse caso, por meio do monitoramento do indicador, nota-se aumento do aporte de material em suspensão ao longo dos anos de monitoramento. Os parâmetros do indicador claridade da água, turbidez e MPS, são significativamente correlacionados (Spearman, $p<0,05$), nesse caso, a turbidez média do rio Doce na estação RDO 15 (103,2±176,1 UNT com máxima de 850,0 UNT) nos últimos anos é superior ao limite máximo admissível para Classe 2 da Resolução CONAMA N; 357 de 2005, 100 UNT.

O indicador “acidez/alcalinidade”, monitorado pelos parâmetros pH e Alcalinidade total (mg $CaCO_3$/L), tem sido eficaz, revelando as alterações observadas ao longo dos anos, dentre as diferentes estações na Calha do rio Doce, assim como nos ecossistemas lacustres, principalmente no fundo da coluna d’água dos lagos. Por exemplo, em todos os ecossistemas aquáticos monitorados, foi percebida a redução da alcalinidade e, consequentemente, uma tendência a diminuição dos valores de pH ao longo dos anos. Nesse caso, alterações na capacidade de tamponamento da água implicam na especiação de metais como Fe (Langmuir, 1997) e semimetais como o As (Arsênio).

O indicador “estratificação térmica”, avaliado pelo Índice de Resistência Relativa Integrada (RTRi), tem se mostrado eficaz na mensuração da estabilidade térmica dos ecossistemas lacustres. Tal indicador

condiciona a dinâmica do oxigênio dissolvido (OD) e o potencial de oxirredução (ORP) (parâmetros agrupados pelo indicador “condição oxidante/redutora da coluna d’água”) conforme a sazonalidade ao longo dos anos de monitoramento. Valores elevados de RTRi são correlacionados com condições hipóxicas (<2,0 mg de oxigênio dissolvido/L) e anóxicas no fundo da coluna d’água e condições redutoras nos lagos Nova (Costa *et al.*, 2026) e Limão, respectivamente. Sob condições redutoras ocorrem processos de dessorção de P, Fe, Al e Mn com a difusão destes elementos do sedimento para o fundo da coluna d’água. Por exemplo, quando o fundo da coluna d’água apresenta condições redutoras (valores negativos de ORP), há um incremento da condutividade elétrica e concentração de NH_4^+ devido à predominância do processo de amonificação durante o período de estratificação. A forte estabilidade térmica da coluna d’água (RTRi > 100) durante o período chuvoso é característico dos lagos do Limão (LLM 03R), Nova (LNV 02R) e Palmas (E28).

O indicador “Estado Trófico” é descrito pelo índice de Estado Trófico – IET médio, calculado pelas concentrações de Ptotal (µg/L) e clorofila-a (µg/L). A partir desse indicador é possível constatar a variação do estado nutricional e de produtividade aquática, por meio da tipologia trófica, dos ecossistemas fluviais e lacustres da Bacia do Baixo rio Doce influenciados pela dinâmica das concentrações de nutrientes, sobretudo de P_{total}, em diferentes períodos sazonais. Este indicador tem ressaltado a evolução da qualidade de água ao longo do monitoramento. Por exemplo, nas estações da Calha do rio Doce, o IET tem aumentado entre os anos, provavelmente em decorrência dos incrementos de P_{total} e clorofila-*a*, que indica a biomassa do fitoplâncton. Assim, por meio do IET, identificou-se que os ecossistemas monitorados podem variar de oligotróficos (47<IET≤ 52), indicando um metabolismo mais equilibrado, a eutróficos (59<IET≤63), com o metabolismo intensificado e consequente decomposição da matéria orgânica, redução de oxigênio dissolvido e condições mais ácidas.

O indicador “fluxos de nutrientes” em t/d, calculado por meio das concentrações de N_{total}, NID, P_{total}, PID e silicato e a vazão fluvial na estação RDO 15 do rio Doce, mensura o transporte diário de materiais para o oceano costeiro e constitui um importante indicador da integridade geoquímica da bacia hidrográfica (Howarth, 2000; Meybeck & Vörösmarty, 2005; Meybeck, 2013;). Considerando que parte do rejeito de minério de Fe é composto por SIO_2 e éter-aminas, o fluxo fluvial para o oceano costeiro resulta no enriquecimento de nutrientes (Cagnin *et al.*, 2022). As éter-aminas são utilizadas na separação do quartzo pelo processo de flotação e sua dissociação tende ao enriquecimento de nitrogênio inorgânico dissolvido, incialmente na forma de íon amônio (NH_4^+) e posterior oxidação em nitrato (NO_3^-) (Santos *et al.*, 2019; Costa *et al.*, 2021). Assim, por meio desse indicador foi possível constatar o incremento do transporte de N_{total}, NID, P_{total}, PID e silicato ao longo dos anos de monitoramento.

Para o indicador “testemunho de sedimentos em lagos e lagoas”, as composições mineralógicas e as concentrações de metais constituem registros relevantes dos processos biogeoquímicos naturais e antropogênicos que ocorreram nos ecossistemas aquáticos e no seu entorno (Binford, 1983). Este indicador é referente apenas aos lagos e lagoas por serem ambientes mais favoráveis à sedimentação do que nos rios, onde o transporte fluvial promove a exportação do material particulado em suspensão.

A partir desse indicador foi possível conhecer o período da deposição sedimentar de 0,8 a 1,0 m de no fundo dos lagos que variou com datação inicial de 1811 a 1850 e final de 2019 a 2020. Além da datação, foi possível calcular o "Índice de Enriquecimento (IE)", usando o cobalto (Co) como valor de referência da geoquímica da porção superior da crosta terrestre. Esse índice revelou que ocorreu enriquecimento severo (IE > 10) de níquel (Ni) e arsênio (As) na Laguna Monsarás (E25) a partir de 1996 e 2011; de As e Fe na Lagoa Areal (E24) a partir dos anos de 1845 e 2019, respectivamente. No Lago Limão (E18) foi observado enriquecimento moderadamente severo (IE = 5 a 10) para As em 1998 e Fe em 2013; no Lago Nova (E19) para As (1987), Fe (2005) e Pb (2006); no Lago Juparanã (E20) para As (1957); na Lagoa Areão (E23) para As (1888); e na Lagoa Areal (E24) para Fe (anterior a 1845).

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Todos os itens previstos foram cumpridos para o Tema.

6 REFERÊNCIAS

Anschutz, P. & Deborde, J. (2016). Spectrophotometric determination of phosphate in matrices from sequential leaching of sediments. *Limnology and Oceanography Methods*, 14(4):245-256.

APHA (2005). *Standard methods for the examination of water and wastewater*, 21st ed American Public Health Association - APHA, American Water Works Association - AWWA and Water Environmental Federation - WEF.

APHA (2017). *Standard methods for the examination of water and wastewater*. 23rd ed., American Public Health Association - APHA, American Water Works Association - AWWA and Water Environmental Federation - WEF.

Barroso, G.F., Gonçalves, M.A. & Garcia, F.C. (2014). The Morphometry of Lake Palmas, a Deep Natural Lake in Brazil. PLoS ONE, 9(11): e111469. https://doi.org/10.1371/journal.pone.0111469

Birch, G.F. (2003). A test of normalization methods for marine sediment, including a new post-extraction normalization (PEN) technique. *Hydrobiologia*, 492(1–3):5–13. https://doi.org/10.1023/A:1024844629087

Bozelli, R. L., Esteves, F. A., Roland, F. and Suzuki, M. S. (1992). Padrões de funcionamento das lagoas do Baixo Rio Doce: variáveis abióticas e clorofila-a (Espírito Santo - Brasil). Acta Limnologica Brasiliensia, 4: 13-31.

Binford, L. R. 1983. Em busca do passado. A Descodificação do Registro Arqueológico. Trad. de João Zilhão. Londres: Europa-América, 304 pp

Cagnin, R.C., Longhini, C.M., Costa, E.S., da Silva, Cesar Alexandro, Zorzal-Almeida, S., Mendes, D.,

Pasa, V.M.D., Barbeira, P.J.S., Delazari-Barroso, A., Gücker, B., Boëchat, I.G., Lima, A.T., Neto, R.R., Sá, F., Barroso, G.F., Silva, C A, Zorzal-Almeida, S., Mendes, D., Pasa, V.M.D., Barbeira, P.J.S., Delazari-Barroso, A., Gucker, B., Boechat, I., Lima, A.T., Rodrigues Neto, R., Barroso, G.F., 2022. Macronutrients and dissolved iron in a land-ocean approach: Influences of contamination by ore tailings in Southeastern Brazil. Front. Mar. Sci. 9, 990809. https://doi.org/10.3389/fmars.2022.990809

Carlson, R. E. (1977). A trophic state index for lakes. *Limnology and Oceanography*, 22(2): 361-369. https://doi.org/10.4319/lo.1977.22.2.0361

Cole, G. A. (1994). *Textbook of limnology*. Waveland Press Inc.,

Costa, E. S., Cagnin, R. C., Silva, C. A., Longhini, C. M., Sá, F., Lima, A. T., Gomes, L. E. d. O., Bernardino, A. F. and Neto, R. R. (2021). Iron ore tailings as a source of nutrients to the coastal zone. Marine Pollution Bulletin, 171: 112725. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2021.112725

Costa, E. N. D.; Souza, M. F. L.; Silva, R. C.; Bronzoni-Oliveira, F.; Leite, J. A.; Lemos, F. H.; Lobianco, F. P.; Barroso, G. F. Thermal stratification and carbon dioxide dynamics in tropical lakes: insights from a multi-year assessment. Aquatic Ecology, v. 60, art. 36, 2026. https://doi.org/10.1007/s10452-026-10276-4

Esteves, F. A. (1988). Considerações sobre a aplicação da tipologia de lagos temperados a lagos tropicais. Acta Limnologica Brasiliensia, 2: 3-28.

Gonçalves, M.A., Garcia, F.C. & Barroso, G.F. (2016). Morphometry and mixing regime of a tropical lake: Lake Nova (Southeastern Brazil). Anais da Academia Brasileira de Ciências, 88(3):1341-1356. https://doi.org/10.1590/0001-3765201620150788

Håkanson, L. & Jansson, M. (1983). *Principles of lake sedimentology*. Cladwell, The Blackburn Press.

Hatje, V., Pedreira, R. M. A., De Rezende, C. E., Schettini, C. A. F., De Souza, G. C., Marin, D. C. & Hackspacher, P. C. (2017). The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. Scientific Reports, 7: 1-13. https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x

Howarth, R., Ed. (2000). Clean coastal waters: understanding and reducing the effects of nutrient polluttion. Washington, D.C., National Academy Press.

Langmuir, Donald, 1997, Aqueous environmental geochemistry: Upper Saddle River, New Jersey, Prentice Hall, 600 p.

Lamparelli, M.C. (2004). Grau de trofia em corpos d'água do estado de São Paulo: avaliação dos métodos de monitoramento. Departamento de Ecologia. São Paulo, Universidade de São Paulo. Doutorado: 235p.

Magris, R. A., Marta-Almeida, M. M., Monteiro, J. A. F., & Banb, N. C. (2019). A modelling approach to assess the impact of land mining on marine biodiversity: Assessment in coastal catchments experiencing catastrophic events (SW Brazil). Science of the Total Environment, 659, 828–840. https:// doi. org/ 10. 1016/j. scito tenv. 2018. 12. 238

Meybeck, M. and Vörösmarty, C. J. (2005). Fluvial filtering of land-to-ocean fluxes: from natural Holocene variations to Anthropocene. Comptes Rendus Geosciences, 337(1-2): 107-123. https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.09.016

Meybeck, M. (2013). Heavy metal contamination in rivers across the globe: an indicator of complex interactions between societies and catchments. Proceedings of H04 Understanding Freshwater Quality Problems in a Changing World, 361, 3-16.

Mia, S., DeLaune, R. D. & Jugsujinda, A. (2006). Influence of sediment redox conditions on release/solubility of metals and nutrients in a Louisiana Mississippi River deltaic plain freshwater lake. Science of The Total Environment, 371(1):334-343. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2006.07.027

Miller, M. E., Ghisolfi, R. D. & Barroso, G. F. (2023). Remote sensing monitoring of mining tailings in the fluvial-estuarine-coastal ocean continuum of the Lower Doce River Valley (Brazil). Environmental Monitoring and Assessment, 195(542). https://doi.org/10.1007/s10661-023-11123-x

Mortimer, C. H. (1942). The exchange of dissolved substances between mud and water in lakes. Journal of Ecology, 29(2): 280-329. https://doi.org/10.2307/2256691

Nordstrom, D. K.; Blowes, D. W. & Ptacek, C. J. Hydrogeochemistry and microbiology of mine drainage: An update. Applied Geochemistry, v. 57: 3–16, 2015. https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2015.02.008

Oliveira, K.S.S. & Quaresma, V. da S., 2017. Temporal variability in the suspended sediment load and streamflow of the Doce River. J. South Am. Earth Sci. 78, 101–115. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2017.06.009

Qin, B., Zhou, J., Elser, J. J., Gardner, W. S., Deng, J. & Brookes, J. D. (2020). Water depth underpins the relative roles and fates of nitrogen and phosphorus in lakes. Environmental Science & Technology, 54(3): 3191–3198. https://doi-org.ez43.periodicos.capes.gov.br/10.1021/acs.est.9b05858

Reid, T., Valipour, R., Biberhofer, J., Pascoe, T. & Zastepa, A. (2023). Spatial and temporal patterns of redox-sensitive and bio-relevant micronutrients in a large complex binational lake system: Lake of the Woods. Journal of Great Lakes Research, 49(1): 53-64. https://doi.org/10.1016/j.jglr.2022.12.003

Sakan, S.; Sakan, N. & Đorđević, D. (2015). Evaluation of the possibility of using normalization with cobalt in detection of anthropogenic heavy metals in sediments. *Advances in Chemistry Research*, 26:167-183.

Shashi, J.; Singh, J. & Dwivedi, A. K. Numerical interdependence in pH, acidity and alkalinity of a polluted river water. *Journal of Environmental Biology*, v. 30, n. 5, p. 773–775, 2009.

Santos, O. S. H., Avellar, F. C., Alves, M., Trindade, R. C., Menezes, M. B., Ferreira, M. C., França, G. S., Cordeiro, J., Sobreira, F. G., Yoshida, I. M., Moura, P. M., Baptista, M. B. & Scotti, M. R. (2019). Understanding the environmental impact of a mine dam rupture in Brazil: Prospects for remediation. Journal of Environmental Quality, 48(2): 439–449. https://doi.org/10.2134/jeq2018.04.016

Song, K., Xenopoulos, M.A., Buttle, J.M., Marsalek, J., Wagner, N.D., Pick, F.R. & Frost, P.C. (2013). Thermal stratification patterns in urban ponds and their relationships with vertical nutrient gradients. *Journal of Environmental Management*, 127: 317–323. https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2013.05.052

Souza, W. F. L., Knoppers, B., Balzer, W. & Leipe, T. (2003). Geoquímica e fluxos de nutrientes, ferro e manganês para a Costa Leste do Brasil. Geochimica Brasiliensis, 17(2): 130-144.

Scheffer, M., 1998. Ecology of Shallow Lakes. Springer.

Straskraba, M. & Tundisi, J. G. (2000). Gerenciamento da qualidade da água em reservatórios. São Carlos, Instituto Internacional de Ecologia/International Lake Environmental Committee

Vasconcellos, F. C. & Cavalcanti, I. F. A. Extreme precipitation over Southeastern Brazil in the austral summer and relations with the Southern Hemisphere annular mode. Atmospheric Science Letters, v. 11, n. 1, p. 21–26, 2010. https://doi.org/10.1002/asl.247

Wetzel, R.G. & Likens, G.E. (2000). Limnological Analyses. 3 Ed, Springer. https://doi.org/10.1007/978-1-4757-3250-4

Wetzel, R. G. (2001). Limnology: lake and river ecosystems. New York, Academic Press.

Wedepohl, K.H. (1995). The composition of the continental crust. *Geochimica et Cosmochimica Acta* 59(7):1217-1232 https://doi.org/10.1016/0016-7037(95)00038-2

Zhao, L., Zhu, R., Zhou, Q., Jeppesen, E. & Yang, K. (2023). Trophic status and lake depth play important roles in determining the nutrient-chlorophyll a relationship: Evidence from thousands of lakes globally. Water Research, 242: 120182. https://doi.org/10.1016/j.watres.2023.120182