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: Mineralogia

RT- 55/OUT 26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória – ES

Outubro de 2026

EQUIPE TÉCNICA

Danilo de Lima Camêlo (Coordenador)

David Lukas de Arruda Silva

Tiago Guimarães

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 4

2 METODOLOGIA 6

2.1 COLETA 6

2.2 ANÁLISE 8

2.2.1 Difratometria de raios X (DRX) 8

2.2.2 Suscetibilidade magnética 8

2.2.3 Extrações seletivas de oxihidróxidos de Fe 9

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 9

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 10

3.1 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (SEDIMENTOS) 11

3.2 SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (SEDIMENTOS) 32

3.3 FASE DE OXIHIDRÓXIDOS DE FERRO (SEDIMENTOS) 34

3.4 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO – MPS) 43

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 45

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 47

6 REFERÊNCIAS 47

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-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 amostral do ambiente Dulcícola integrado. As estações em negrito são aquelas vigentes no âmbito da Deliberação nº 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

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), em três lagoas com profundidade média inferior a 3,0 m (Lagoas Areal - E24, Monsarás – E25 e Cacimbas E27) e em dois reservatórios, Aimorés – ERA e Mascarenhas – ERM.

A estação amostral do rio Guandú (E17) foi descontinuada em agosto de 2022 (da Transição para o novo Ciclo) devido aos elevados valores de material particulado em suspensão e turbidez que dificultam o uso dessa estação como ambiente fluvial de referência. A partir de agosto de 2022, no início do novo Ciclo PMBA/Fest-UFES (pré-Deliberação 803/24), foi incluído o rio Manhuaçu (E2). Na calha fluvial do rio Doce as estações amostrais foram 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 do potencial retenção de materiais pelas represas (Aimorés e Mascarenhas). À jusante das barragens o monitoramento continua a ser desenvolvido na estação de Itapina, Colatina. ES - E0 que serve como comparação para as condições da estação de Resplendor. A próxima estação à jusante é Linhares – E21 que continua sendo monitorada desde outubro de 2018 e servindo como referência para estimativa dos fluxos hidrológicos de sedimentos, nutrientes e metais. A estação E-22, intermediária entre Linhares – E21 e Regência – E26, foi 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, é 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 foi descontinuada. Em substituição a Lagoa do Areão foi inserida a Lagoa

Cacimbas (E27) em agosto de 2022 (novo Ciclo PMBA/Fest-UFES), localizada a cerca de 5 km a oeste da Vila de Regência. A Lagoa Monsarás continua sendo 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 estação do Lago do Limão – E18 foi substituída pela estação E28 no Lago Palmas. 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).

Desde o início do novo Ciclo, em agosto de 2022, as estações litorâneas foram incluídas no programa de monitoramento em todos os lagos e lagoas, trazendo uma nova abordagem de amostragem em diferentes profundidades (meia água e compartimento de sedimentos). Antes disso, as amostragens eram realizadas exclusivamente no fundo, sem incluir outras profundidades. 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 agosto de 2022, 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 partir da campanha 64, e em conformidade com a Deliberação nº 803/24 (com vigência a partir de outubro de 2024), a malha amostral foi atualizada. Houve a reinclusão de pontos antes descontinuados, como a estação RGU02 (antiga E17, rio Guandu) e LLM03R (antiga E18, Lago do Limão). Houve também realocação das estações RDO12 (antiga E0), RMH01 (antiga E2, rio Manhuaçu) e UHE AIM (antiga ERA, reservatório de Aimorés), de modo a aprimorar a representatividade espacial e atender critérios logísticos de navegação. Adicionalmente, as novas estações RDO14 e RDO11 foram inseridas na calha principal do rio Doce. Por outro lado, as estações litorâneas, incluídas a partir de 2022, foram descontinuadas na nova malha, redirecionando os esforços de amostragem para as regiões centrais e profundas dos sistemas aquáticos monitorados.

As coletas de água (materiais particulados em suspensão – MPS) e sedimentos para análises mineralógicas no Laboratório de Gênese e Mineralogia de Solos – LAGEM da UFES foram realizadas pelo Tema Limnologia conforme descrito abaixo.
Nas estações amostrais fluviais, a amostragem foi feita no meio da calha do rio. Para coleta de água subsuperficial foi utilizada garrafa de Niskin (2,8 L) com montagem horizontal, e para coleta de sedimento de fundo foi utilizada draga de van Veen.
Nas estações lacustres do tipo lagos (Zméd > 3,0 m) foi feita coleta de água com garrafa de Niskin (2,8 L) com montagem vertical nas profundidades de subsuperfície, 1 % de luz (i.e., radiação fotossintética ativa) e 1,0 m próximo ao fundo. Nas lagoas e na laguna (Zméd < 3,0 m), a coleta de água foi feita no meio da coluna d'água. Nos reservatórios a amostragem foi feita conforme os lagos.

Amostras de água para difratometria de raios X foram coletadas em frascos de polipropileno (1 L) previamente descontaminados para posterior filtração de partículas em membranas de acetato/éster de celulose 47 mm e 0,45 µm.

Em todas as estações amostrais, as coletas de sedimento de fundo foram feitas com amostrador do tipo Ekman. As amostras de sedimentos para difratometria de raios X, suscetibilidade magnética e extrações seletivas de oxihidróxidos de Fe foram acondicionadas em sacos plásticos do tipo zip bag previamente descontaminados.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Difratometria de raios X (DRX)

As amostras de sedimentos e materiais particulados em suspensão (MPS) foram analisadas por difração de raios X em aparelho RIGAKU MINIFLEX 600C com radiação CuKα e operado a 40 kV e 15 mA. Os padrões de difração foram gerados em modo contínuo a uma velocidade de 1,2 º2θ min^{-1}, passo de 0,02 º2θ s^{-1} e varredura de 4 a 70 º2θ. As amostras foram montadas em lâminas escavadas (não orientadas) após trituração em almofariz de ágata para redução do tamanho de partículas (< 10 µm) seguindo as recomendações de Bish & Reynolds Junior (1989) para análises quantitativas de fases minerais.

A composição mineralógica foi identificada nos padrões de DRX a partir do reconhecimento da posição e intensidade relativa dos picos de difração dos planos atômicos dos minerais. Para isso, o software MATCH! (versão 3.10) e fichas CPDS (Putz & Brandenburg, 2015; Mincryst, 2022) foram utilizadas. A análise semiquantitativa dos minerais foi realizada pelo método da relação de intensidade de referência-RIR (*I/Ic*) (Visser & Wolff, 1964), usando o software MATCH! (versão 3.10) (Putz & Brandenburg, 2015). A avaliação da qualidade final do processo de quantificação (ajuste do refinamento) foi baseada no índice de Bragg (Rp) (Young, 1995).

2.2.2 Suscetibilidade magnética

Um sistema Bartington MS3 (Bartingon Instruments LTD, Oxford, England), acoplado a um sensor MS2B, operado em baixa (κ_{lf}) (0,47 kHz) e alta (κ_{hf}) (4,70 kHz) frequências, foi usado para determinação da suscetibilidade magnética volumétrica (κ, adimensional). Alíquotas de 10 cm^3 de amostras de sedimento, previamente trituradas e passadas em peneira de 0,25 mm (60 mesh), foram obtidas para as medições (Camêlo et al., 2018). A suscetibilidade magnética por unidade de massa (χ_{lf}) foi calculada, a partir da suscetibilidade magnética volumétrica, pela equação $\chi_{lf} = (10 \times \kappa_{lf}) / m$, em que m é a massa da amostra, e a suscetibilidade magnética dependente da frequência (χ_{fd}, %), pela equação $\chi_{fd} = 100 \times [(\chi_{lf} - \chi_{hf}) / \chi_{lf}]$ (Dearing, 1999).

2.2.3 Extrações seletivas de oxihidróxidos de Fe

Nos sedimentos foram realizadas três extrações sucessivas com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) a 60 ºC, para remoção das formas cristalinas (hematita, goethita e maghemita) e pobremente

cristalinas (ferridrita e lepidocrocita) de oxihidróxidos de ferro (Mehra & Jackson, 1960), e uma única extração com 0,2 mol L^{-1} de oxalato ácido de amônio (OAA) a pH 3,0, para remoção apenas das formas pobremente cristalinas (ferridrita e lepidocrocita) (McKeague & Day, 1966). Os teores de Fe e Mn extraídos por DCB (Fe_d e Mn_d) e OAA (Fe_o e Mn_o) foram determinados por espectroscopia de absorção atômica. O índice de cristalinidade dos oxihidróxidos de ferro foi obtido a partir da relação Fe_o/Fe_d (Cornell & Schwertmann, 2003; Camêlo et al., 2017).

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Ao longo da evolução do PMBA/Fest-UFES, o Tema Mineralogia, antes componente do Tema Limnologia, percebeu a necessidade de ampliar o conjunto de análises mineralógicas. Isso para aumentar o detalhamento das informações dos constituintes mineralógicos dos sedimentos, especialmente dos oxihidróxidos de ferro, principal grupo mineralógico traçador do Material Ligado ao Desastre (MLD) de mineração de Fe da Barragem de Fundão em ecossistemas impactados na bacia do rio Doce (Queiroz et al., 2022), e ambiente marinho adjacente (Orlando et al., 2020). Assim, no novo ciclo do PMBA/Fest-UFES, além da composição mineralógica obtida por difração de raios X, acrescentamos os seguintes indicadores: Fe_d, Fe_o, Fe_o/Fe_d, Mn_d, Mn_o e a suscetibilidade magnética, todos obtidos em sedimentos.

Uma vez que não se conseguia obter quantidades de MPS suficientes para o completo preenchimento de lâminas escavadas (montagem em pó não orientado) a fim de identificar e estimar sua composição mineralógica, nós adotamos o método de montagem de lâminas por gotejamento, que promove a orientação preferencial de minerais laminares e alongados. Embora útil em contextos específicos, quando a concentração de MPS é insuficiente para a montagem de lâminas não orientadas (método do pó), esse método de preparo de lâminas orientadas não é adequado para análises quantitativas da composição mineral, sendo restrito apenas a análises qualitativas (identificação composicional).

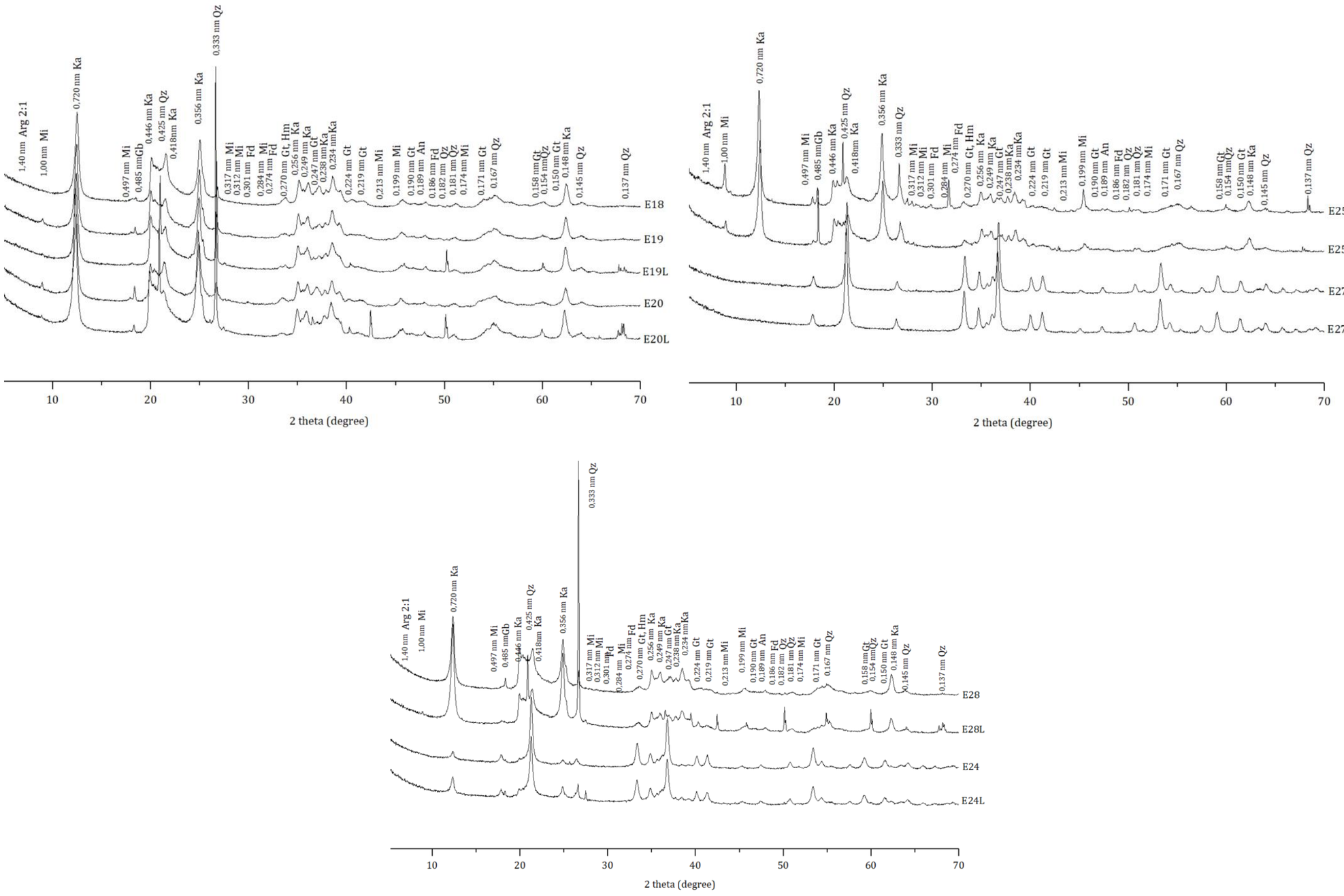
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

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 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (SEDIMENTOS)

Figura 1: Padrões de raios-X da fração lama (< 63 µm) de ambientes lacustres monitorados entre setembro de 2018 e março de 2025. As estações incluem o Lago Nova (E19); Lago Juparanã (E20); Lago Palmas (E28); Lagoa Areal (E24); Laguna Monsarás (E25); Lagoa Cacimbas (E27); e o Lago do Limão (E18, LLM03R). Minerais identificados incluem: Mi = mica (muscovita e/ou biotita), Qz = quartzo, Ka = caulinita, Gb = gibbsita, Gt = goethita, Hm = hematita, An = anatásio, Rt = rutilo, Fd = feldspato-K, Hr = hornblenda, Arg 2:1 = argilomineral 2:1 (vermiculita e/ou esmectita). "L" indica amostras coletadas na região litorânea das estações. Para a estação E20, não foram realizadas coletas após setembro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.



A mineralogia dos sedimentos (lama) nas estações dos lagos (Lagos Nova – E19, Juparanã – E20, Limão – E18 e Palmas E28) e lagoas (Lagoas Areal - E24, Monsarás – E25 e Cacimbas E27) é composta por argilominerais 2:1 (vermiculita e/ou esmectita), caulinita, quartzo, mica (muscovita e/ou biotita), goethita, hematita, gibbsita, anatásio e feldspato-K. A análise de difração de raios-X (Figura 1) confirma essa composição, evidenciando predominância de silicatos, principalmente caulinita e quartzo. Essa composição mineralógica é comum em sedimentos de ambientes dulcícolas na bacia do rio Doce (Pacheco, 2015; Orlando et al., 2020; Duarte et al., 2021).

Além disso, os dados desde o início do monitoramento indicam que o perfil mineralógico das estações dos lagos e lagoas não sofreu variações qualitativas expressivas, reafirmando a estabilidade da assembleia mineral. Para a estação E20, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.

Tabela 1. Valores médios de caulinita, oxihidróxidos de ferro (goethita + hematita), TiO2 (rutilo e anatásio), gibbsita, quartzo e mica (muscovita e/ou biotita), principais minerais em amostras da fração lama (< 63 µm) de ambientes lacustres monitorados entre setembro de 2018 e janeiro de 2026. As estações incluem o Lago Nova (E19); Lago Juparanã (E20); Lago Palmas (E28); Lagoa Areal (E24); Laguna Monsarás (E25); Lagoa Cacimbas (E27); e o Lago do Limão (E18, LLM03R). Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.

Estação amostral	Caulinita	Oxihidróxidos de Fe	TiO_2 (µ%)	Gibbsita	Quartzo	Mica
E18/LLM 03 – (Lago Limão)	76,73	11,22	2,70	2,81	3,17	3,33
E19/LNVØ2R (Lago Nova)	74,00	8,28	3,95	4,50	4,47	4,11
E19L/LNVØ2R (Lago Nova)	71,52	5,94	2,48	7,54	8,38	0
E20 (Lago Juparanã)	71,94	11,23	4,06	5,84	2,99	3,86
E20L (Lago Juparanã)	69,68	9,44	3,54	3,94	4,50	5,30
E23 (Lago Areão)	78,12	7,07	2,45	0,98	5,64	5,75
E28: Lago Palmas	72,85	7,49	5,90	6,49	5,76	0,31
E28L: Lago Palmas	62,96	5,80	3,66	4,52	19,56	1,69
E24/LAL01 (Lagoa Areal)	26,10	64,97	0,89	3,23	3,04	5,20
E24L/LAL01 (Lagoa Areal)	33,48	52,34	0,00	8,86	3,85	1,64
E25/LMN02R (Laguna Monsarás)	68,95	8,10	3,18	4,03	10,27	4,68
E25L/LMN02R (Laguna Monsarás)	66,72	9,25	4,45	7,80	8,55	6,37
E27: Lagoa Cacimbas	10,30	83,14	0,66	1,80	2,86	3,20
E27L: Lagoa Cacimbas	13,18	76,78	0,55	3,09	2,43	3,04

A caulinita constitui o principal mineral identificado na fração lama (< 63 µm) dos sedimentos da maioria dos lagos e lagoas monitorados, refletindo sua ampla predominância na fração argila (< 0,002 mm) dos solos tropicais da bacia de contribuição (Tabela 1). Essa dominância sugere que parte significativa do material sedimentar acumulado nesses ambientes está relacionada à erosão e ao transporte de

partículas finas provenientes dos solos e coberturas superficiais da paisagem. Por ser um filossilicato abundante, relativamente estável em condições tropicais e facilmente mobilizado durante processos erosivos, a caulinita tende a ser preferencialmente incorporada aos sedimentos de fundo.

Além disso, o aporte periódico de sedimentos fluviais pode contribuir para o incremento de caulinita e de outros minerais detríticos, como mica, nos ambientes lacustres e lagunares conectados ou influenciados pelo sistema do rio Doce. Essa interpretação é coerente com estudos prévios que demonstraram a predominância desse filossilicato nos sedimentos do rio Doce, tanto antes quanto após o rompimento da barragem de Fundão (Pacheco, 2015; Duarte et al., 2021).

Embora os oxihidróxidos de ferro, representados principalmente por goethita e hematita, ocorram como fases secundárias na maior parte dos sedimentos dos lagos e lagoas, esses minerais possuem elevada relevância geoquímica e ambiental. Sua importância está associada à elevada capacidade de adsorção, coprecipitação e retenção de elementos potencialmente tóxicos, o que os torna fases minerais-chave no controle da mobilidade de contaminantes na Bacia do rio Doce. Nesse contexto, os oxihidróxidos de ferro são particularmente relevantes em áreas afetadas pelo rompimento da barragem de Fundão, uma vez que estudos anteriores apontam sua participação no transporte, deposição e retenção de contaminantes associados aos rejeitos e aos Materiais Ligados ao Desastre de mineração (Camêlo et al., 2024; Davila et al., 2020; Gomes et al., 2017; Pires et al., 2003; Queiroz et al., 2018; Segura et al., 2016).

As estações localizadas nas lagoas Areal (E24 e E24L) e Cacimbas (E27 e E27L) diferenciam-se marcadamente das demais áreas monitoradas pela elevada participação de oxihidróxidos de ferro, com destaque para a goethita. Essa assinatura mineralógica indica que esses ambientes apresentam maior potencial de retenção e acúmulo de materiais ricos em ferro, incluindo possíveis contribuições de Materiais Ligados ao Desastre de mineração.

A localização dessas lagoas em setor próximo à foz do rio Doce, sujeita à influência de processos fluviais, estuarinos e hidrodinâmicos complexos, favorece a deposição de partículas finas e minerais ferruginosos. Assim, a composição mineralógica distinta observada nesses sedimentos, quando comparada à dos demais lagos e lagoas, sugere que a origem do material depositado não pode ser atribuída exclusivamente à erosão dos solos da paisagem local, como parece ocorrer de forma predominante em outros ambientes lacustres avaliados.

Nesse sentido, é plausível considerar que parte da goethita presente nas lagoas Areal e Cacimbas tenha origem autigênica, formada no próprio ambiente sedimentar a partir da transformação de fases precursoras menos cristalinas, como a ferridrita. A ferridrita é um oxihidróxido de ferro pouco ordenado, comumente encontrado em sedimentos lacustres e lagunares, e pode evoluir para goethita sob diferentes condições geoquímicas (Schwertmann e Murad, 1983; Cornell e Schwertmann, 2003; Yee et al., 2006).

Em soluções ácidas ou básicas, essa transformação pode ocorrer de forma espontânea, envolvendo inicialmente a dissolução da ferridrita e, posteriormente, a precipitação da goethita a partir de espécies

monovalentes de Fe (III) em solução, como [Fe $(OH)_2^+$] e [Fe $(OH)_4^-$] (Schwertmann e Murad, 1983). Em condições próximas à neutralidade, por outro lado, a baixa solubilidade da ferridrita restringe sua transformação direta, sendo necessária a presença de Fe (II), que atua como agente redutor e favorece a reorganização mineralógica em direção à formação de goethita (Yee et al., 2006).

Adicionalmente, ambientes de transição flúvio-estuarina, caracterizados pela interação entre águas doces e salinas, tendem a favorecer naturalmente o acúmulo de fases ferruginosas nos sedimentos. Essa dinâmica resulta da combinação de processos como floculação de partículas finas, degradação da matéria orgânica, variações nas condições redox, ciclagem de ferro e enxofre e precipitação de sulfetos ou oxihidróxidos de ferro. Tais processos são amplamente documentados em sistemas estuarinos e contribuem para a retenção de metais e outros contaminantes associados às fases minerais finas (Yang et al., 2020; Queiroz et al., 2021; Barcellos et al., 2022; García-Gamero et al., 2022). Portanto, as lagoas Areal e Cacimbas representam ambientes de elevada relevância geoquímica e ecotoxicológica, pois combinam condições favoráveis à deposição de partículas ferruginosas com alto potencial de retenção de contaminantes associados aos oxihidróxidos de ferro.

Tabela 2. Avaliação da variação sazonal dos teores mineralógicos por estação amostral nos ambientes lacustres. Teores de caulinita, oxihidróxidos de ferro, anatásio, gibbsita, quartzo e mica, principais minerais em amostras da fração lama (< 63 µm) de ambientes lacustres monitorados entre setembro de 2018 e janeiro de 2026. As estações incluem o Lago Nova (E19); Lago Juparanã (E20); Lago Palmas (E28); Lagoa Areal (E24); Laguna Monsarás (E25); Lagoa Cacimbas (E27); e o Lago do Limão (E18, LLM03R). Para a estação E20, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.

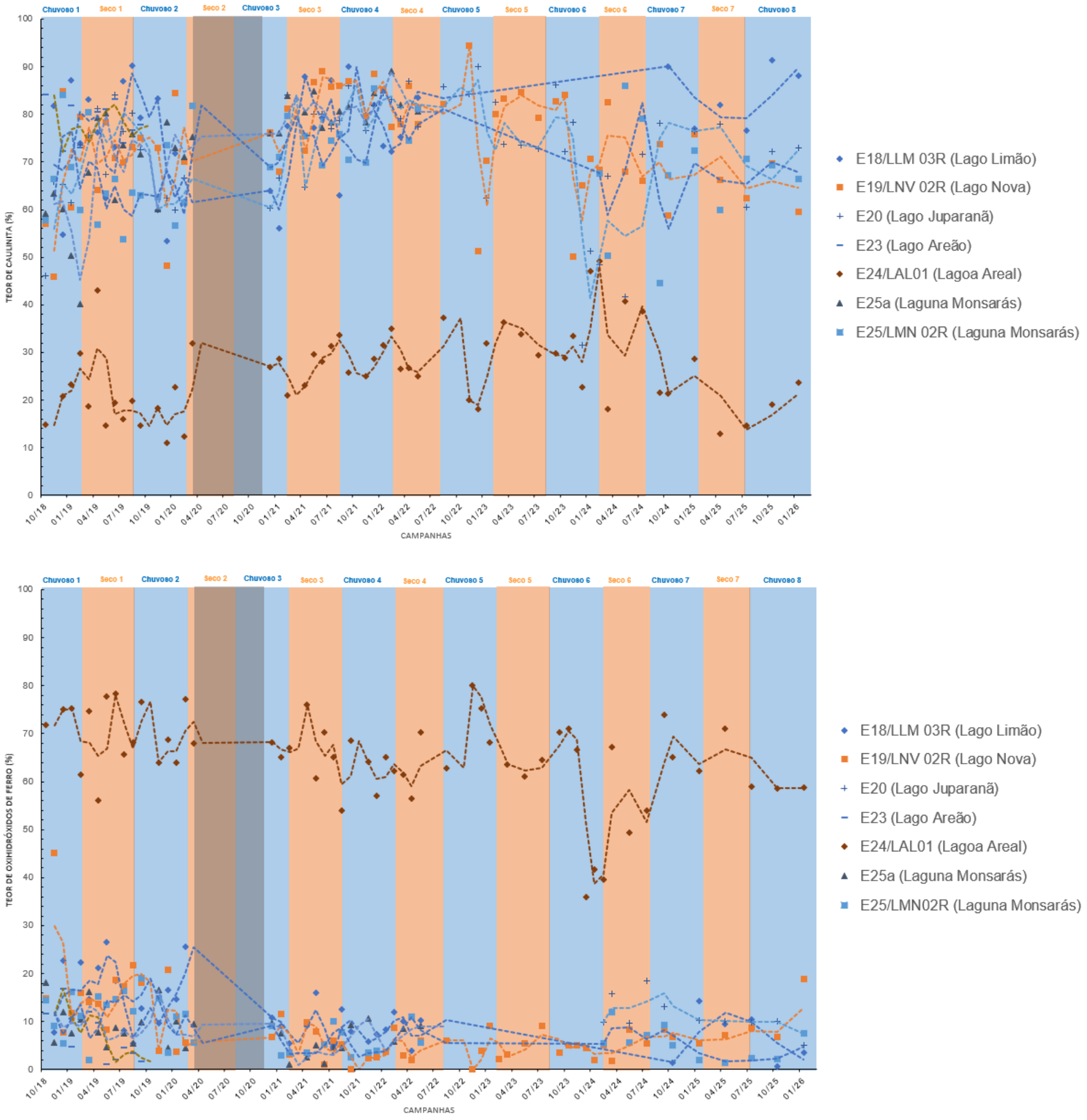
Estação amostral	Mineral	n	n chuvoso	n seco	Mediana chuvoso	Mediana seco	p KW	Significativo? (p < 0,05)	Período com maior teor
E18:/LLM 03R (Lago Limão)	Caulinita	6	3	3	88,2	81,9	0,51269076	Não	Não significativo
	Óxihidróxidos de ferro	6	3	3	3,6	9,5	0,827259347	Não	
	Anatásio	6	3	3	3,5	2,2	0,51269076	Não	
	Gibbsita	6	3	3	1,8	3,6	0,275233524	Não	
	Quartzo	6	3	3	1,6	2,9	0,827259347	Não	
	Mica	6	3	3	0	0		Não testado	
E19/LNV 02R (Lago Nova)	Caulinita	25	15	10	70,3	70,85	0,911663895	Não	Seco
	Óxihidróxidos de ferro	25	15	10	5	7	0,075665756	Não	
	Anatásio	25	15	10	3,1	5,45	**0,045292066**	**Sim**	
	Gibbsita	25	15	10	4,2	7,4	0,07136899	Não	
	Quartzo	25	15	10	3	3,6	0,69763544	Não	
	Mica	25	15	10	2,9	1,95	0,316749741	Não	
E19L: Lago Nova	Caulinita	18	11	7	77,5	75,7	0,650500314	Não	Não significativo
	Óxihidróxidos de ferro	18	11	7	4,2	5,2	0,682984539	Não	
	Anatásio	18	11	7	3	3	0,617675087	Não	
	Gibbsita	18	11	7	3,3	5,8	0,88982917	Não	
	Quartzo	18	11	7	6,8	5,5	0,496979396	Não	
	Mica	0	0	0				Não testado	Amostragem insuficiente
E20 - Lago Juparanã	Caulinita	24	15	9	73	73,5	0,438139487	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	24	15	9	7,9	9,7	0,386941438	Não	
	Anatásio	24	15	9	3,5	2,8	0,76504846	Não	
	Gibbsita	24	15	9	2,3	3,5	0,324969033	Não	
	Quartzo	24	15	9	2,3	2,5	0,654580383	Não	
	Mica	23	15	8	5,2	1,55	0,064949765	Não	
E20L: Lago Juparanã	Caulinita	19	12	7	64,1	71,6	0,236723571	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	19	12	7	4,6	3,8	0,498207565	Não	
	Anatásio	19	12	7	4,25	3,3	1	Não	
	Gibbsita	19	12	7	3,8	3,7	0,898587664	Não	
	Quartzo	19	12	7	11,1	8,5	0,352330857	Não	
	Mica	19	12	7	0,7	3	0,828381753	Não	
E24 (Lagoa Areal)	Caulinita	24	14	10	30,3	29,15	0,769649277	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	24	14	10	62,9	64,85	0,482179866	Não	
	Anatásio	22	13	9	0	0	0,228439809	Não	
	Gibbsita	24	14	10	0,65	5,25	0,459875914	Não	Não significativo
	Quartzo	24	14	10	2,9	0,75	0,403528022	Não	
	Mica	19	12	7	0	0	0,445008719	Não	
E24L: Lagoa Areal	Caulinita	17	11	6	35,9	36,05	0,919944381	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	17	11	6	49,1	50,7	0,481727716	Não	
	Anatásio	17	11	6	0	0	0,49955282	Não	
	Gibbsita	17	11	6	0	3,1	0,595717419	Não	
	Quartzo	17	11	6	7	5,8	0,546493595	Não	
	Mica	12	9	3	0	0	0,715823013	Não	
E25/LMN 02R (Laguna Monsarás)	Caulinita	25	15	10	66,4	69,5	0,222335849	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	25	15	10	4,7	3,8	0,453689867	Não	
	Anatásio	25	15	10	1,2	2,1	0,384646032	Não	
	Gibbsita	25	15	10	4,4	4,75	0,824340767	Não	
	Quartzo	25	15	10	10,5	7,8	0,120313441	Não	
	Mica	23	14	9	5	3,7	0,705179141	Não	
E25L: Laguna Monsarás	Caulinita	19	12	7	65,1	64,3	0,865714024	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	19	12	7	4,85	2,6	0,421830874	Não	

Estação amostral	Mineral	n	n chuvoso	n seco	Mediana chuvoso	Mediana seco	p KW	Significativo? (p < 0,05)	Período com maior teor
	Anatásio	19	12	7	3,6	5	0,9324988	Não	
	Gibbsita	19	12	7	4,2	3,3	0,735204886	Não	
	Quartzo	19	12	7	8,15	9	0,832589751	Não	
	Mica	17	11	6	7,3	4,05	0,421379504	Não	
E27 (Lagoa Cacimbas)	Caulinita	25	15	10	4,8	3	0,570060884	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	25	15	10	85,3	94,25	0,255988512	Não	
	Anatásio	23	14	9	0	0	0,146415717	Não	
	Gibbsita	18	12	6	0	0	0,194476719	Não	
	Quartzo	25	15	10	1,3	0,85	0,455815747	Não	
	Mica	24	15	9	0	0	0,91130869	Não	
E27L: Lagoa Cacimbas	Caulinita	18	12	6	4,75	0	0,271050047	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	19	12	7	81,65	100	0,291997272	Não	
	Anatásio	19	12	7	0	0	0,732377067	Não	
	Gibbsita	18	11	7	0	0	0,705756151	Não	
	Quartzo	18	11	7	0	0	0,51810289	Não	
	Mica	17	11	6	0	0	0,344520573	Não	
E28: Lago Palmas	Caulinita	19	12	7	74,4	74,6	0,9324988	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	19	12	7	5,8	9,2	0,374437791	Não	
	Anatásio	19	12	7	6,1	4	0,128022781	Não	
	Gibbsita	19	12	7	5,5	8,4	0,310069642	Não	
	Quartzo	17	11	6	5,7	4,7	0,615085834	Não	
	Mica	14	10	4	0	0	0,113846298	Não	
E28L: Lago Palmas	Caulinita	18	12	6	62,95	66,35	0,925380373	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	19	12	7	6,65	5	0,175916845	Não	
	Anatásio	18	12	6	4,85	1,35	**0,009891273**	**Sim**	Chuvoso
	Gibbsita	18	12	6	4,75	4,85	0,776470875	Não	
	Quartzo	18	12	6	17,75	16,85	0,399269143	Não	Não significativo
	Mica	13	10	3	0	0	0,492825388	Não	

A análise sazonal dos teores mineralógicos por estação amostral indicou ausência de um padrão sistemático de variação entre os períodos chuvoso e seco para a maior parte dos minerais avaliados (Tabela 2 e Figura 2). De modo geral, os valores de p obtidos pelo teste de Kruskal–Wallis foram superiores ao nível de significância de 5%, sugerindo que as variações observadas entre campanhas tendem a refletir mais a variabilidade natural entre amostragens, condições locais de sedimentação e heterogeneidade mineralógica dos ambientes lacustres do que um controle sazonal direto.

Os únicos resultados significativos pelo p-valor bruto foram observados para anatásio em duas estações: E19/LNV 02R – Lago Nova, com maiores teores no período seco, e E28L - Lago Palmas, com maiores teores no período chuvoso. Assim, os dados sugerem que a sazonalidade não exerce controle consistente sobre os teores mineralógicos nas estações avaliadas, embora variações localizadas possam ocorrer em função de processos hidrossedimentares específicos de cada lago.

Figura 2: Série temporal dos teores de caulinita e oxihidróxidos de ferro (goethita + hematita) em amostras da fração lama (partículas < 63 µm) de ambientes lacustres monitorados de outubro de 2018 a janeiro de 2026. A figura apresenta exclusivamente as estações amostrais iniciadas antes do Novo Ciclo PMBA/Fest-UFES: Lago Limão (E18); Lago Nova (E19); Lago Juparanã (E20); Lagoa Areão (E23); Lagoa Areal (E24); e Laguna Monsarás (E25). Observações: i) Os pontos indicam valores do mineral quantificados na estação amostral, enquanto a linha tracejada indica a média móvel dos valores quantificados para a estação temporal. ii) a faixa cinza nos gráficos abrange o período de suspensão das atividades de campo do PMBA/Fest-UFES devido à COVID-19 (março/2020 a novembro/2020); iii) a ausência de informações sobre as estações amostrais E18, E23, E25 e E25a após o período de 04/22 indicam descontinuação dessas estações no novo ciclo do PMBA/Fest-UFES; iv) Período chuvoso (outubro a março) e período seco (abril a setembro).



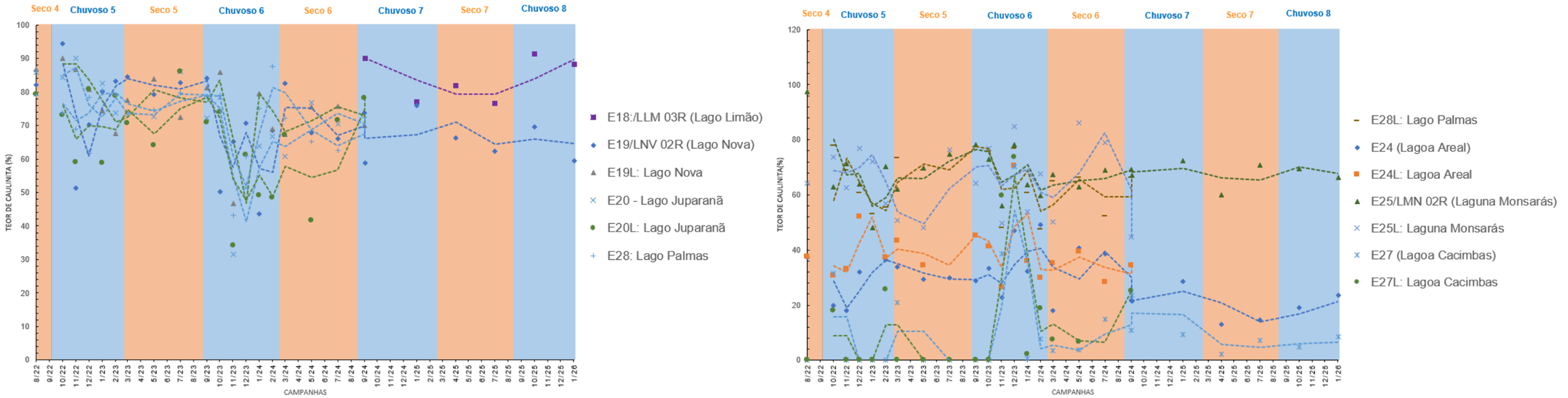
Ao longo do monitoramento PMBA/Fest-UFES (10/18 a 01/26), os teores de caulinita mostraram uma tendência de ligeiro aumento até a coleta no período seco em 08/22. A partir da coleta no período chuvoso em 10/22, as médias móveis das estações dos lagos Nova e Juparanã (E19 e E20) indicaram redução nos teores de caulinita (Figura 2). Esse comportamento está possivelmente relacionado ao período seco observado no final de 2022 na região do Baixo rio Doce (Brasil, 2023), que pode ter diminuído o aporte de sedimentos ricos em caulinita oriundos dos solos a montante. Esse período de redução precedeu o segundo aumento nos teores de caulinita no período seco de 07/23 para a lagoa Areal (E24) e Lago Limão (E18).

Quando analisado pontualmente, os teores de caulinita apresentaram variações sazonais, com diferenças notáveis entre os períodos secos e chuvosos, especialmente após as campanhas realizadas em 10/22. Durante os períodos secos, os teores de caulinita nos sedimentos tendem a aumentar, enquanto nos períodos chuvosos ocorre uma redução. Esse fenômeno pode ser explicado pelo maior fluxo turbulento das águas em períodos chuvosos (Garcia et al., 2018). Nessas condições, a caulinita, devido à sua facilidade de dispersão físico-química, é deslocada do sedimento de fundo para compor o material particulado em suspensão. O oposto ocorre nos períodos secos, quando as condições de menor turbulência favorecem sua deposição nos sedimentos.

Em contrapartida, a série temporal das médias móveis dos teores de oxihidróxidos de ferro não seguiu a mesma tendência observada para a caulinita (Figura 2). A constância desses teores pode ser atribuída à capacidade de floculação dos oxihidróxidos de ferro, que reduz sua suscetibilidade ao transporte hidrodinâmico (Chibowski, 2011). Contudo, na estação da lagoa Areal (E24), observou-se uma redução nos teores de oxihidróxidos de ferro no período chuvoso 6 e aumento no 7. Esse comportamento pode estar associado a fenômenos bioquímicos de ciclagem de ferro (Vepraskas et al., 2016), possivelmente influenciados por processos marinhos, dada a proximidade da estação com a costa.

Embora as médias móveis indiquem oscilações temporais nos teores de caulinita, especialmente após outubro de 2022, essas variações devem ser interpretadas como tendências gráficas descritivas, e não como evidência estatística direta de diferença sazonal. Isso ocorre porque as médias móveis suavizam a série temporal e podem realçar mudanças locais entre campanhas consecutivas, enquanto os testes estatísticos aplicados aos dados brutos avaliam se as distribuições dos grupos comparados diferem de forma robusta. Assim, a ausência de significância estatística indica que as variações observadas no gráfico não foram suficientemente consistentes, considerando a variabilidade interna e o número de amostras, para caracterizar uma diferença sazonal sistemática.

Figura 3: Teores de caulinita e oxihidróxidos de Fe (goethita + hematita) em amostras da fração lama (partículas < 63 µm) de ambientes lacustres monitorados a partir de agosto de 2022 (Novo Ciclo PMBA/Fest-UFES). As estações incluem: Lago Nova (E19), Lago Juparanã (E20), Lago Palmas (E28), Lagoa Areal (E24), Laguna Monsarás (E25), Lagoa Cacimbas (E27) e Lago do Limão (E18). O período de suspensão das atividades de campo do PMBA/Fest-UFES devido à COVID-19 abrange os meses de março a novembro de 2020. Para a estação E20, não foram realizadas coletas após outubro de 2024, em conformidade com a Deliberação CIF nº 803, de 8 de agosto de 2024.



A composição mineralógica da fração lama proveniente dos lagos (Lagos Nova – E19, Limão - E18, Juparanã – E20 e Palmas- E28) e lagoas (Lagoas Areal - E24, Monsarás – E25 e Cacimbas- E27) monitorados no novo ciclo do PMBA/Fest-UFES demonstraram variações em padrões consistentes com os ciclos anteriores. Considerando-se o período chuvoso entre outubro e março e o período seco entre abril e setembro, as médias móveis indicaram que a assembleia mineralógica geral permaneceu relativamente estável, embora com oscilações nos teores relativos de caulinita e oxihidróxidos de ferro ao longo das campanhas.

Para a caulinita, as médias móveis das estações do Lago Nova - setor litorâneo (E19L), do Lago Juparanã (E20, E20L), do Lago Palmas (E28) e do Lago Palmas - setor litorâneo (E28L) indicaram valores geralmente elevados, confirmando o predomínio desse mineral nos ambientes lacustres mais afastados da foz do rio Doce. Entretanto, observa-se uma redução relativa dos teores de caulinita durante parte dos períodos chuvosos, especialmente após outubro de 2022 e novamente entre outubro de 2023 e março de 2024. Esse comportamento foi mais evidente no Lago Nova - setor litorâneo (E19L), no Lago Juparanã (E20, E20L) e, em menor grau, no Lago Palmas (E28, E28L). Em contrapartida, durante os períodos secos, particularmente entre maio e setembro de 2023 e entre maio e setembro de 2024, as médias móveis tendem a indicar recuperação ou manutenção dos teores de caulinita nos sedimentos de fundo desses ambientes.

Essa dinâmica sugere que, nas estações ricas em caulinita, os períodos chuvosos podem favorecer a remobilização parcial das partículas finas do sedimento de fundo para a coluna d'água, em função do aumento da energia hidrodinâmica, do escoamento superficial e da turbulência. Nessas condições, a caulinita, por apresentar pequeno tamanho de partícula e elevada dispersibilidade físico-química, pode permanecer por mais tempo em suspensão, reduzindo sua participação relativa nos sedimentos de fundo amostrados. Durante os períodos secos, por outro lado, a menor energia do sistema favorece a deposição dessas partículas finas, contribuindo para o aumento relativo dos teores de caulinita na fração lama.

Na Lagoa Areal (E24, E24L) e na na Lagoa Cacimbas (E27, E27L), a resposta temporal da caulinita foi distinta daquela observada nos lagos mais ricos nesse mineral. Como esses ambientes apresentam composição originalmente dominada por oxihidróxidos de ferro e baixos teores relativos de caulinita, pequenos incrementos de sedimentos cauliníticos podem produzir variações proporcionais mais expressivas nas médias móveis. Esse comportamento foi particularmente evidente na Lagoa Cacimbas (E27) e na Lagoa Cacimbas - setor litorâneo (E27L), onde houve aumento relativo de caulinita em parte do período chuvoso de 2023/2024, especialmente entre novembro e dezembro de 2023. Esse padrão pode refletir o aporte episódico de partículas finas oriundas dos solos do entorno ou de materiais transportados pelo sistema flúvio-estuarino, os quais se tornam mais perceptíveis em ambientes com baixo teor inicial de caulinita.

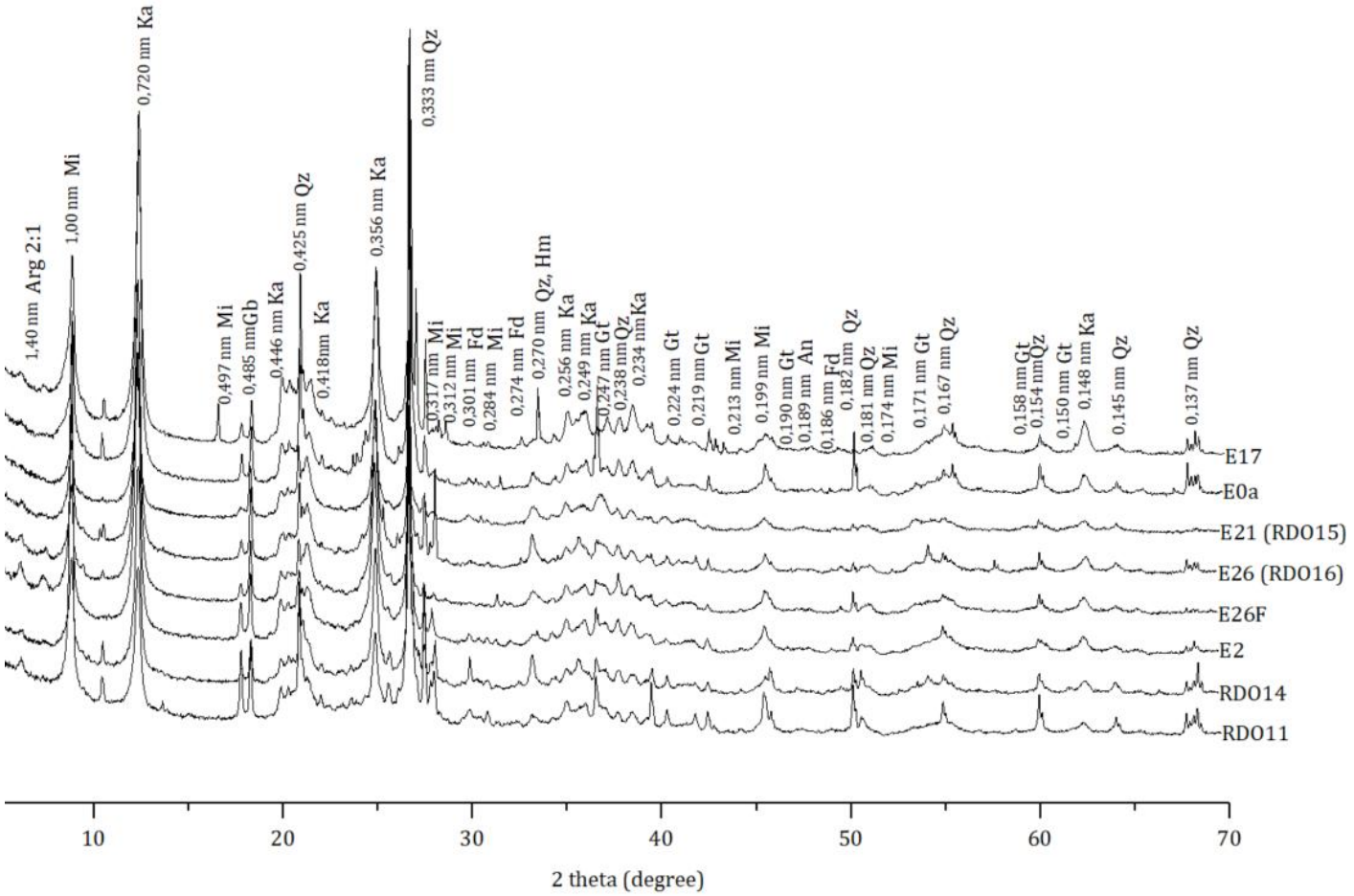
Em relação aos oxihidróxidos de ferro, as médias móveis evidenciaram um padrão espacial inverso ao da caulinita. As maiores concentrações permaneceram associadas à Lagoa Areal (E24, E24L), à Lagoa Cacimbas (E27, E27L), enquanto o Lago Nova (E19), o Lago Juparanã (E20), o Lago Palmas (E28) e

a Laguna Monsarás (E25) apresentaram teores relativamente baixos desses minerais. Essa diferença reforça a distinção mineralógica entre os ambientes lacustres dominados por caulinita e os ambientes lagunares mais próximos da foz do rio Doce, onde há maior acúmulo de fases ferruginosas.

Temporalmente, os oxihidróxidos de ferro apresentaram maior estabilidade nas estações com baixos teores, como o Lago Nova (E19), o Lago Juparanã (E20), a Laguna Monsarás (E25) e o Lago Palmas (E28), com oscilações discretas ao longo dos períodos seco e chuvoso. Já nas estações ferruginosas, especialmente na Lagoa Areal (E24, E24L), na Lagoa Cacimbas (E27, E27L), as médias móveis indicaram reduções pontuais nos teores de oxihidróxidos de ferro durante parte do período chuvoso 6, concomitantemente ao aumento relativo de caulinita em algumas dessas estações. Essa relação sugere possível efeito de diluição mineralógica, no qual o aumento da contribuição de partículas cauliníticas reduz proporcionalmente a participação dos oxihidróxidos de ferro na fração lama. Além disso, variações locais nas condições redox, na salinidade, na matéria orgânica e na dinâmica de floculação podem influenciar a precipitação, a dissolução parcial ou a redistribuição das fases ferruginosas nesses ambientes.

Dessa forma, as médias móveis evidenciam oscilações temporais relevantes, mas devem ser interpretadas como ferramenta descritiva da dinâmica mineralógica, e não como evidência estatística direta de sazonalidade. A aparente variação entre períodos secos e chuvosos indica que a resposta mineralógica é condicionada tanto pela sazonalidade hidrossedimentológica quanto pelas características próprias de cada ambiente. Assim, enquanto o Lago Nova (E19), o Lago Juparanã (E20) e o Lago Palmas (E28), dominados por caulinita, parecem responder principalmente à remobilização e deposição de partículas finas, a Lagoa Areal (E24) e a Lagoa Cacimbas (E27), mais ricas em oxihidróxidos de ferro e próximas à foz do rio Doce, refletem processos mais complexos, envolvendo aporte sedimentar, diluição mineralógica, floculação e ciclagem biogeoquímica do ferro.

Figura 4: Padrões de raios-X da fração lama (partículas < 63 µm) dos ambientes fluviais do rio Doce e seus tributários, coletados de outubro de 2018 a janeiro de 2026, no âmbito do monitoramento PMBA/Fest-UFES. As amostras são provenientes de várias estações ao longo do sistema fluvial, incluindo o tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17); e a calha principal do rio Doce, com coletas a montante das represas de Aimorés e Mascarenhas nas estações E0a e RDO12, em trecho intermediário na estação E21 (Colatina, ES), e a jusante na estação E26 (Regência, ES), próxima à foz; estação E26F, localizada em área de remanso sujeita à intrusão salina; e as estações RDO14 e RDO11, ampliando a cobertura espacial ao longo do gradiente longitudinal do rio Doce. Minerais identificados: Mi = mica (muscovita e/ou biotita), Qz = quartzo, Ka = caulinita, Gb = gibbsita, Gt = goethita, Hm = hematita, Rt = Rutilo, An = anatásio, Fd = feldspato-K, Hr= hornblenda. “L” indica amostras coletadas na região litorânea das estações. Para as estações 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.



O perfil mineralógico dos sedimentos (fração lama) das estações amostrais da calha do rio Doce (E0a, E0, E21, E26, E26F, RDO14 e RDO11) e rios tributários (Rio Manhuaçu, E2 e Guandu, E17), monitoradas ao longo do PMBA/Fest-UFES, é representado na Figura 4. Em todos os padrões de difração de raios-X, predominam picos característicos de minerais silicatados, com destaque para a caulinita (Ka) e o quartzo (Qz). Além disso, foram detectados minerais 2:1, como vermiculita e/ou esmectita, embora em proporções menores quando comparados aos minerais predominantes. Esses minerais pertencem à classe dos argilominerais expansivos e têm uma presença consistente em ambientes tropicais (Melo et al., 2002), como os solos da Bacia do rio Doce, podendo desempenhar um papel importante na retenção de água e nutrientes nos sedimentos (Missana et al; 2021).

Não foram observadas mudanças qualitativas na assembleia mineralógica das estações amostrais fluviais ao longo do monitoramento, indicando uma estabilidade composicional que reflete as características geológicas e pedológicas da região. A presença de minerais 2:1, ainda que menos expressiva, ressalta a diversidade mineralógica típica desses ambientes.

Tabela 3: Valores médios de caulinita, oxihidróxidos de ferro (goethita + hematita), TiO_2 (rutilo e anatásio), gibssita, quartzo e mica (muscovita e/ou biotita), principais minerais em amostras da fração lama (partículas < 63 µm) dos ambientes fluviais do rio Doce e seus tributários, coletados de outubro de 2018 a janeiro de 2026, monitorados no PMBA/Fest-UFES. As amostras são provenientes de várias estações ao longo do sistema fluvial, incluindo o tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17); a calha principal do rio Doce, com coletas a montante das represas de Aimorés e Mascarenhas nas estações E0a e RDO12 (realocada, E0), em trecho intermediário na estação E21 (Colatina, ES), e a jusante na estação E26 (Regência, ES), próxima à foz; estação E26F, localizada em área de remanso sujeita à intrusão salina; e as estações RDO14 e RDO11, ampliando a cobertura espacial ao longo do gradiente longitudinal do rio Doce. Para as estações 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.

Estações amostrais	Caulinita	Oxihidróxidos de Fe	TiO_2	Gibbsita	Quartzo	Mica
			µ%			
E17/RGU 02 (Rio Guandu)	58,38	6,28	2,15	4,23	21,14	7,72
E26: RD - Regência	62,70	7,88	1,90	5,77	17,01	9,36
E26F: RD - Foz	58,36	3,14	3,36	4,41	15,36	4,45
E0a: RD - Resplendor	62,8	4,9	2,0	4,6	16,5	6,9
E0: RD - Itapina	56,7	2,3	1,0	7,7	18,1	13,2
E2: Rio Manhuaçu	63,7	2,2	2,1	4,4	16,6	10,2
E21: RD - Linhares	52,17	4,09	0,95	6,41	18,70	12,18
E22 (Povoação)	72,10	7,20	1,35	3,00	12,80	3,55
RDO 11 (RD Baixo Guandu)	39,7	2,5	0,8	8,9	20,8	19,3
RDO 14 (RD Marilândia)	60,2	3,8	0,4	4,4	28,5	6,6

Na maioria das estações amostrais, o principal constituinte mineral dos sedimentos (lama) da calha do rio Doce (E0a, E0, E21, E26, E22, RDO11 e RDO14), tributário (E2 e E17) e foz (E26F) continua sendo a caulinita, com teores variando de 39,7% a 72,1% (Tabela 3). Este mineral, amplamente presente na fração argila dos solos tropicais, é reconhecido por sua abundância na maioria dos solos do Brasil (Schaefer et al., 2008). Mica e quartzo aparecem como constituintes secundários importantes, com

teores de mica variando de 3,55% a 19,3%, sendo mais expressiva nas estações da calha do rio Doce (E21-12,18%; e E0-13,2%), enquanto o quartzo apresenta maior concentração na calha do rio Doce (RDO-14- 28,5%), rio Guandu (E17-21,14%) e Baixo rio Guandu (20,8%-RDO11). Por outro lado, os oxihidróxidos de ferro, como goethita e hematita, se mantêm como fases minoritárias nos sedimentos fluviais, com teores variando de 2,2% no rio Manhuaçu (E2) a 7,88% na calha do rio Doce (E26). Apesar de sua baixa presença relativa nos sedimentos fluviais, esses minerais têm um papel ambiental importante, pois atuam como potenciais fontes de contaminantes nos ecossistemas da Bacia do rio Doce. Estudos recentes apontam que os oxihidróxidos de ferro, particularmente a goethita, desempenham um papel crítico na retenção e liberação de contaminantes associados aos Materiais Ligados ao Desastre de mineração (Camêlo et al., 2024; Davila et al., 2020; Gabriel et al., 2021; Queiroz et al., 2021, 2018).

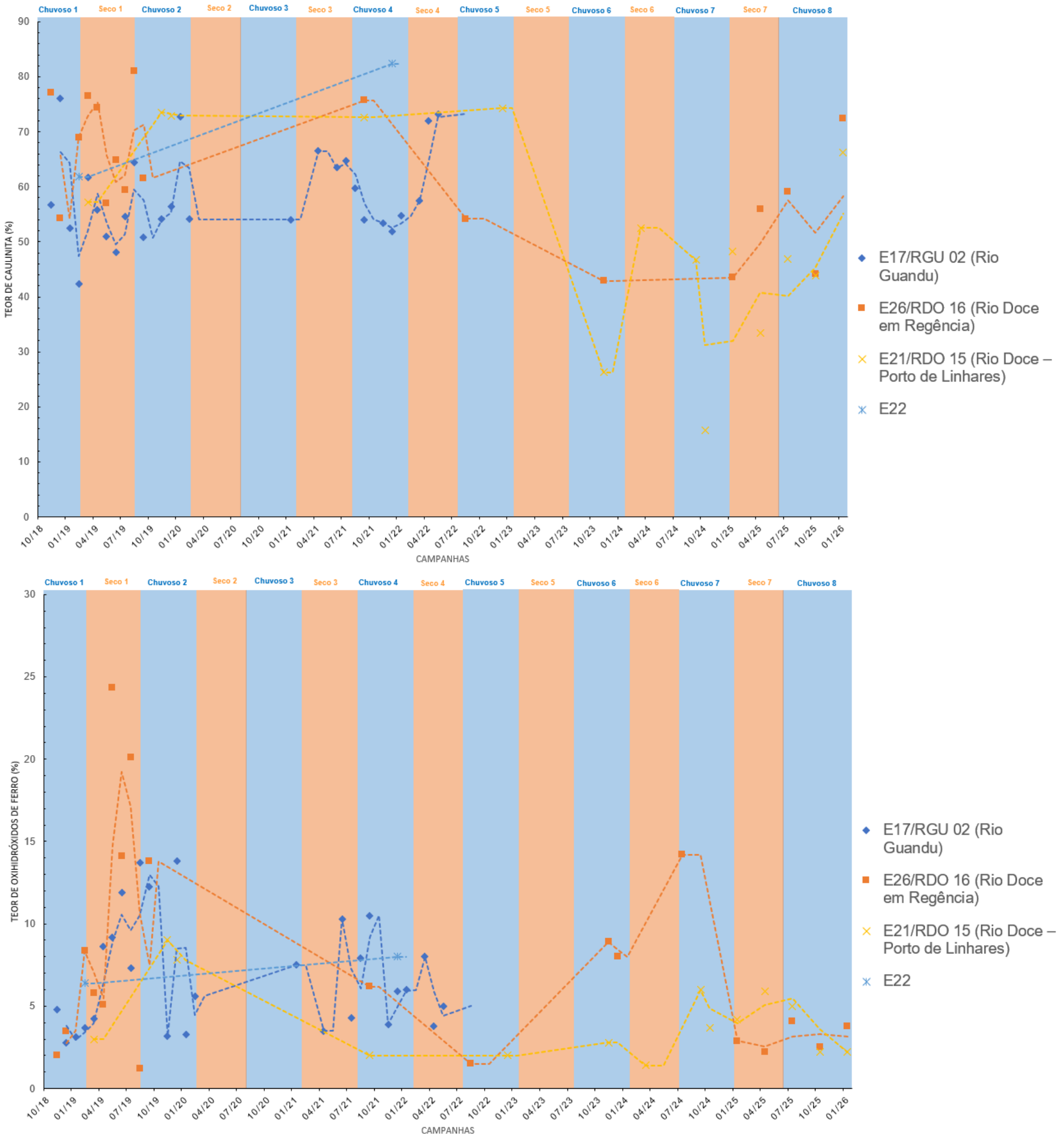
Especificamente, a goethita tem sido identificada como o principal mineral pedogênico responsável pela liberação de metais pesados e outros contaminantes dos Materiais Ligados ao Desastre de mineração (Camêlo et al., 2024). Este comportamento é particularmente relevante nas estações da calha do rio Doce (E26) e Foz (E26F), onde os oxihidróxidos de ferro apresentam os teores mais elevados, sugerindo uma maior influência de processos de ciclagem geoquímica e interações entre os sedimentos mais próximos à foz do rio Doce. A presença de gibbsita e TiO_2, embora em menores concentrações, também reflete a composição mineralógica característica da Bacia do rio Doce. A gibbsita apresenta valores mais altos no Baixo Guandu (RDO 11, 8,9%), evidenciando a influência de processos de intemperismo intenso nos sedimentos fluviais.

Tabela 4. Avaliação da variação sazonal dos teores mineralógicos por estação amostral nos ambientes fluviais. Teores de caulinita, oxihidróxidos de ferro, anatásio, gibbsita, quartzo e mica, principais minerais em amostras da fração lama (< 63 µm) de ambientes lacustres monitorados entre setembro de 2018 e janeiro de 2026. As amostras são provenientes de várias estações ao longo do sistema fluvial, incluindo o tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17); a calha principal do rio Doce, com coletas a montante das represas de Aimorés e Mascarenhas nas estações E0a e RDO12 (realocada, E0), em trecho intermediário na estação E21 (Colatina, ES), e a jusante na estação E26 (Regência, ES), próxima à foz; estação E26F, localizada em área de remanso sujeita à intrusão salina; e as estações RDO14 e RDO11, ampliando a cobertura espacial ao longo do gradiente longitudinal do rio Doce. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.

Estação amostral	Mineral	n total	n chuvoso	n seco	Mediana chuvoso	Mediana seco	Média chuvoso	Média seco	H KW	p KW	Significativo p<0,05?	Período com maior teor
E17/RGU 02 (Rio Guandu)	Caulinita	34	19	15	54,70	59,80	57,57	59,42	0,2359	0,6272	Não	Não significativo
	Óxihidróxidos de ferro	34	19	15	4,23	7,90	5,48	7,30	2,1228	0,1451	Não	
	Anatásio	33	18	15	1,54	1,80	1,64	2,76	0,7015	0,4023	Não	
	Gibbsita	34	19	15	3,50	4,40	4,23	4,23	0,1210	0,7279	Não	
	Quartzo	34	19	15	23,08	21,60	21,73	20,39	0,1203	0,7287	Não	
	Mica	34	19	15	8,80	4,75	9,20	5,85	6,0718	**0,0137**	**Sim**	Chuvoso
E26/RDO 16 (Rio Doce em Regência)	Caulinita	19	9	10	68,30	60,50	60,91	64,32	0,1667	0,6831	Não	Não significativo
	Óxihidróxidos de ferro	21	10	11	4,80	6,20	5,86	9,72	0,7140	0,3981	Não	
	Anatásio	20	10	10	2,60	0,60	2,29	1,52	0,8631	0,3529	Não	
	Gibbsita	21	10	11	4,70	6,90	5,03	6,45	0,1535	0,6952	Não	
	Quartzo	22	11	11	13,30	11,30	22,42	11,61	1,6405	0,2003	Não	
	Mica	22	11	11	5,20	8,40	10,29	8,43	0,1822	0,6695	Não	
E26F	Caulinita	9	4	5	63,80	64,30	53,92	61,90	0,1361	0,7122	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	9	4	5	3,10	2,80	3,62	2,76	0,0151	0,9021	Não	
	Anatásio	8	3	5	3,30	3,80	2,30	4,00	1,0889	0,2967	Não	
	Gibbsita	9	4	5	5,50	4,50	5,10	3,86	0,5445	0,4606	Não	
	Quartzo	8	3	5	10,10	11,90	10,57	18,24	1,0889	0,2967	Não	
	Mica	8	3	5	5,60	4,30	5,13	4,04	0,8096	0,3682	Não	
E21/RDO 15 (Rio Doce – Porto de Linhares)	Caulinita	14	10	4	54,84	46,80	53,08	49,90	0,5000	0,4795	Não	
	Óxihidróxidos de ferro	14	10	4	2,90	5,45	3,83	4,72	0,6077	0,4357	Não	
	Anatásio	13	9	4	1,00	0,05	1,01	0,83	0,6121	0,4340	Não	
	Gibbsita	14	10	4	4,75	6,90	5,62	8,40	0,5011	0,4790	Não	
	Quartzo	14	10	4	15,95	11,80	20,75	13,55	0,5000	0,4795	Não	
	Mica	14	10	4	7,80	8,00	12,97	10,20	0,2455	0,6202	Não	
E22	Caulinita	2	2	0	72,10		72,10				Não testado	
	Óxihidróxidos de ferro	2	2	0	7,20		7,20				Não testado	
	Anatásio	2	2	0	1,35		1,35				Não testado	
	Gibbsita	2	2	0	3,00		3,00				Não testado	
	Quartzo	2	2	0	12,80		12,80				Não testado	
	Mica	2	2	0	3,55		3,55				Não testado	

A avaliação sazonal dos teores mineralógicos por estação amostral indicou ausência de um padrão estatisticamente consistente de variação entre os períodos chuvoso e seco para a maior parte dos minerais analisados nos ambientes fluviais. Entre as combinações testáveis, apenas a mica na estação E17/RGU 02 – rio Guandu apresentou diferença significativa pelo p-valor bruto do teste de Kruskal–Wallis, com maiores teores medianos no período chuvoso (Tabela 4).

Figura 5: Série temporal e teores de caulinita e oxihidróxidos de ferro (goethita + hematita) em amostras da fração lama (partículas < 63 µm) dos ambientes fluviais do rio Doce e seus tributários, coletados de outubro de 2018 a janeiro de 2026, monitorados no PMBA/Fest-UFES. A figura apresenta exclusivamente as estações amostrais iniciadas antes do Novo Ciclo PMBA/Fest-UFES. As amostras incluem estação do rio Guandú (E17); a calha fluvial do rio Doce, com amostras de midstream na estação E21 em Colatina e E22 em Povoação (descontinuada) e downstream na estação E26 próxima à foz, cada uma representando as variações ao longo do rio. Observações: i) Os pontos indicam os valores quantificados do mineral na estação amostral enquanto a linha tracejada indica a média móvel dos valores quantificados para a estação temporal. Ii) a faixa cinza nos gráficos abrange o período de suspensão das atividades de campo do PMBA/Fest-UFES devido à COVID-19 (março/2020 a novembro/2020); iii) a ausência de informações sobre as estações amostrais E17 e E22 após o período do Novo Ciclo PMBA/Fest-UFES, indicam descontinuação dessas estações no novo ciclo do PMBA/Fest-UFES e lacunas de dados indicam amostras impossibilitadas de coletadas por condições ambientais ou com quantidade insuficiente de lama para análise mineralógica (sedimento arenoso); iv) Período chuvoso (outubro a março) e período seco (abril a setembro).



Desde o início do monitoramento PMBA/Fest-UFES (09/18), os teores de caulinita apresentaram um leve aumento até a coleta do período seco em 08/22, conforme indicado pelas médias móveis (Figura 5). Na calha do rio Doce, as estações de Colatina (E21/RDO 15) e de Regência, próxima à foz (E26/RDO 16), indicaram comportamento variável, com redução mais evidente dos teores de caulinita nas campanhas recentes, especialmente entre 11/23 e 10/24, seguida de aumento parcial até 01/26.

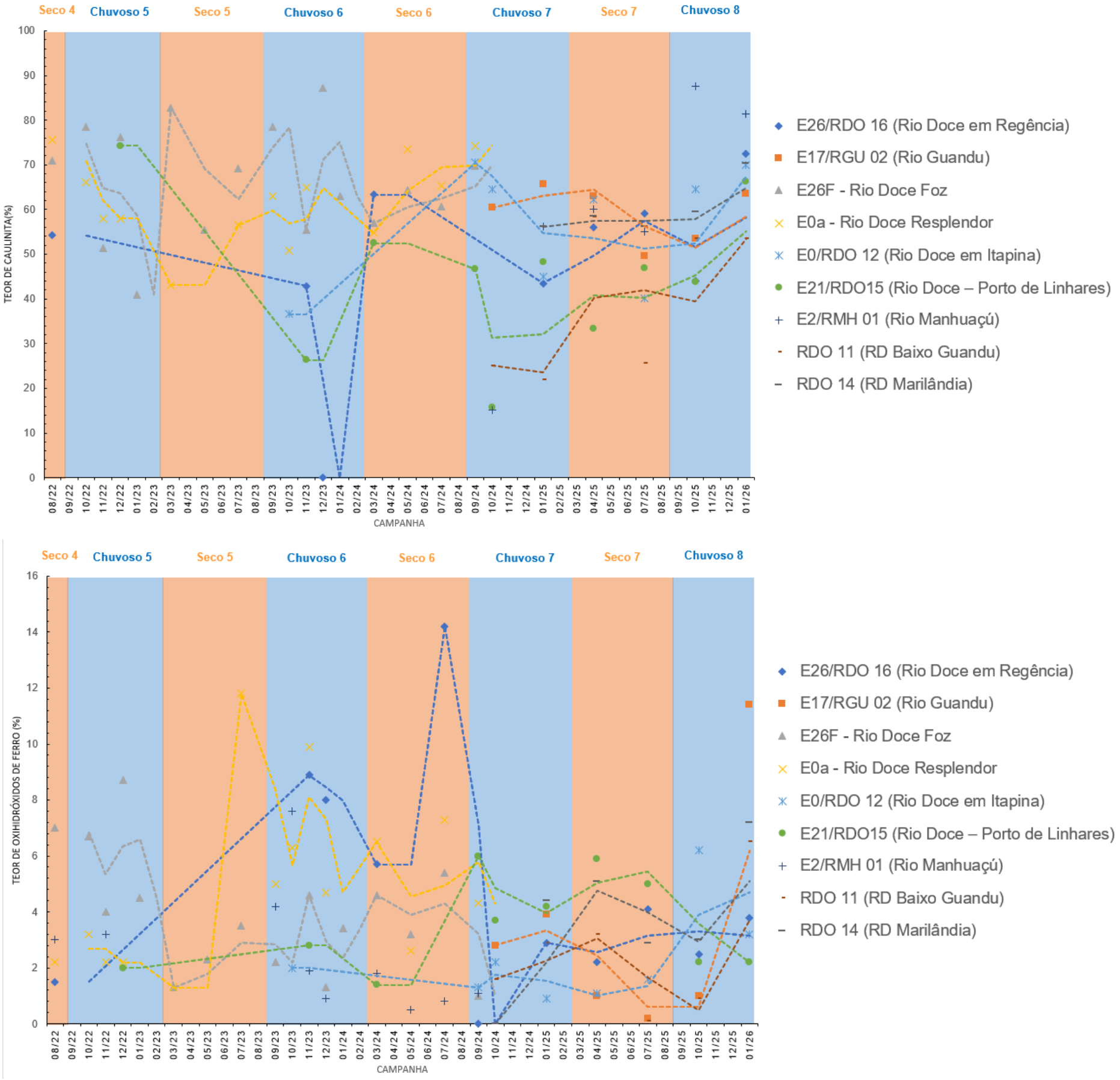
Na estação de Regência (E26/RDO 16), os maiores teores de caulinita ocorreram no início do monitoramento, entre 10/18 e 09/19, enquanto os menores valores foram observados em campanhas mais recentes, principalmente entre 08/22 e 01/25. Na estação de Colatina (E21/RDO 15), os teores também foram elevados em parte da série histórica, especialmente entre 11/19 e 12/22, mas apresentaram queda acentuada entre 11/23 e 10/24. Esse comportamento pode estar relacionado a mudanças temporais no aporte de sedimentos finos ricos em caulinita oriundos dos solos a montante, bem como a eventos hidrossedimentológicos específicos capazes de alterar a proporção relativa entre minerais silicáticos e fases ferruginosas nos sedimentos de fundo.

Embora as médias móveis indiquem oscilações temporais nos teores de caulinita, não se observa uma alternância regular entre o período chuvoso, de outubro a março, e o período seco, de abril a setembro. Esse resultado é coerente com a ausência de diferença estatística significativa apontada pelo teste de Kruskal-Wallis, indicando que as variações observadas no gráfico refletem tendências locais ou episódicas, e não necessariamente um padrão sazonal sistemático. Ainda assim, algumas flutuações pontuais podem estar associadas à sazonalidade, uma vez que a maior energia do sistema durante o período chuvoso tende a favorecer a remobilização de partículas finas, enquanto o período seco pode favorecer a deposição relativa de minerais nos sedimentos de fundo.

Em relação aos oxihidróxidos de ferro, as médias móveis indicaram comportamento distinto daquele observado para a caulinita. Na estação do rio Guandu (E17/RGU 02), os maiores teores ocorreram principalmente entre 04/19 e 09/19, seguidos por redução relativa nas campanhas mais recentes, entre 10/24 e 07/25, com aumento pontual em 01/26. Na estação de Regência (E26/RDO 16), os teores foram mais elevados durante o período seco de 2019, especialmente entre 05/19 e 07/19, além de novo aumento em 07/24. Esse comportamento sugere que, em determinados momentos, a redução do aporte de sedimentos cauliníticos durante períodos de menor pluviosidade pode favorecer o aumento relativo dos oxihidróxidos de ferro nos sedimentos depositados. Na estação de Colatina (E21/RDO 15), os teores de oxihidróxidos de ferro foram mais elevados em 11/19 e 12/19, com variações moderadas entre 2024 e 2025. A estação de Povoação (E22), por apresentar apenas registros pontuais em 02/19 e 12/21, não permite avaliação consistente de tendência temporal ou sazonal.

De modo geral, os resultados indicam que a caulinita permanece como o principal constituinte mineral dos sedimentos fluviais, refletindo a contribuição dominante de materiais finos provenientes dos solos da bacia do rio Doce. Os oxihidróxidos de ferro, por sua vez, apresentam teores menores e comportamento mais irregular, com aumentos pontuais em campanhas específicas, sobretudo em alguns períodos secos. Esses padrões reforçam a influência das condições hidrossedimentológicas sobre a composição mineralógica dos sedimentos, mas indicam que a sazonalidade, isoladamente, não explica de forma uniforme as variações observadas ao longo do monitoramento.

Figura 6: Teores de caulinita e oxihidróxidos de ferro (goethita + hematita) em amostras da fração lama (partículas < 63 µm) dos ambientes fluviais do rio Doce e seus tributários, monitorados no PMBA/Fest-UFES. As amostras são provenientes de várias estações ao longo do sistema fluvial, incluindo o tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17); e a calha principal do rio Doce, com coletas a montante das represas de Aimorés e Mascarenhas nas estações E0a e RDO12 (realocada, E0), em trecho intermediário na estação E21 (Colatina, ES), e a jusante na estação E26 (Regência, ES), próxima à foz; estação E26F e as estações RDO14 e RDO11, ampliando a cobertura espacial ao longo do gradiente longitudinal do rio Doce. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.

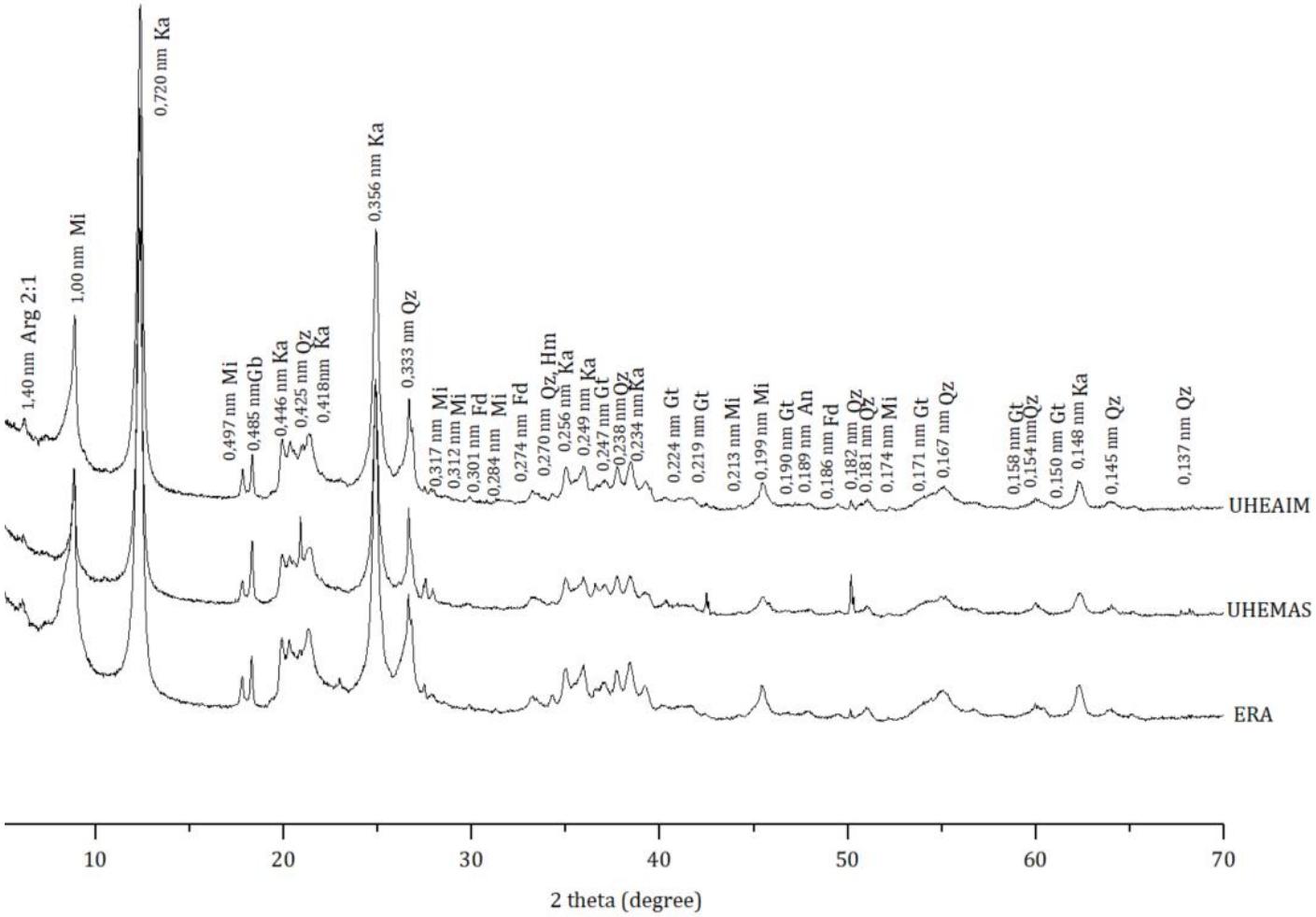


Nos dados monitorados no PMBA/Fest-UFES entre 08/22 e 01/26, as médias móveis indicaram que a caulinita permaneceu como a principal fase mineral dos sedimentos fluviais, embora com variações temporais importantes entre as estações. Durante o período seco de 2023, entre 05/23 e 09/23, houve aumento ou manutenção de teores mais elevados de caulinita em algumas estações, como rio Doce Foz (E26F), rio Manhuaçu (E2/RMH 01) e rio Doce em Resplendor (E0a). Já no período chuvoso de 2023/2024, entre 10/23 e 03/24, observaram-se reduções e maior instabilidade em estações como rio Doce em Porto de Linhares (E21/RDO 15), rio Doce em Regência (E26/RDO 16) e rio Doce Foz (E26F), possivelmente associadas à remobilização de partículas finas.

Os oxihidróxidos de ferro apresentaram teores menores e comportamento mais irregular. Os aumentos mais evidentes ocorreram no período seco de 2023, entre 05/23 e 09/23, principalmente em rio Doce em Resplendor (E0a) e no rio Manhuaçu (E2/RMH 01), além de aumentos localizados no período seco de 2024, entre 05/24 e 09/24, em rio Doce em Itapina (E0/RDO 12), rio Doce em Porto de Linhares (E21/RDO 15) e rio Doce Foz (E26F). No período chuvoso de 2023/2024, entre 10/23 e 03/24, houve redução ou estabilização em menores teores na maior parte das estações.

De modo geral, os resultados sugerem influência sazonal sobre a composição mineralógica dos sedimentos, mas sem um padrão uniforme em todas as estações. A caulinita tende a se manter elevada ou aumentar em alguns períodos secos, enquanto os oxihidróxidos de ferro apresentam aumentos mais pontuais, também associados a períodos de menor pluviosidade. Essas variações parecem refletir a interação entre sazonalidade, posição na calha fluvial, influência de tributários, dinâmica da foz e eventos locais de remobilização e deposição sedimentar.

Figura 7: Padrões de raios-X representativos da fração lama (partículas < 63 µm) de reservatórios monitorados no PMBA/Fest-UFES. Minerais identificados: Mi = mica, Qz = quartzo, Ka = caulinita, Gb = gibbsita, Gt = goethita, Hm = hematita, An = anatásio, 2:1 = argilomineral 2:1 (vermiculita e, ou, esmectita). Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.



Os difratogramas de raios-X mostram predomínio de minerais silicatados, especialmente quartzo e caulinita (Figura 7). Desde o início do monitoramento do PMBA/Fest-UFES, a assembleia mineralógica das amostras dos reservatórios não expressaram mudança qualitativa.

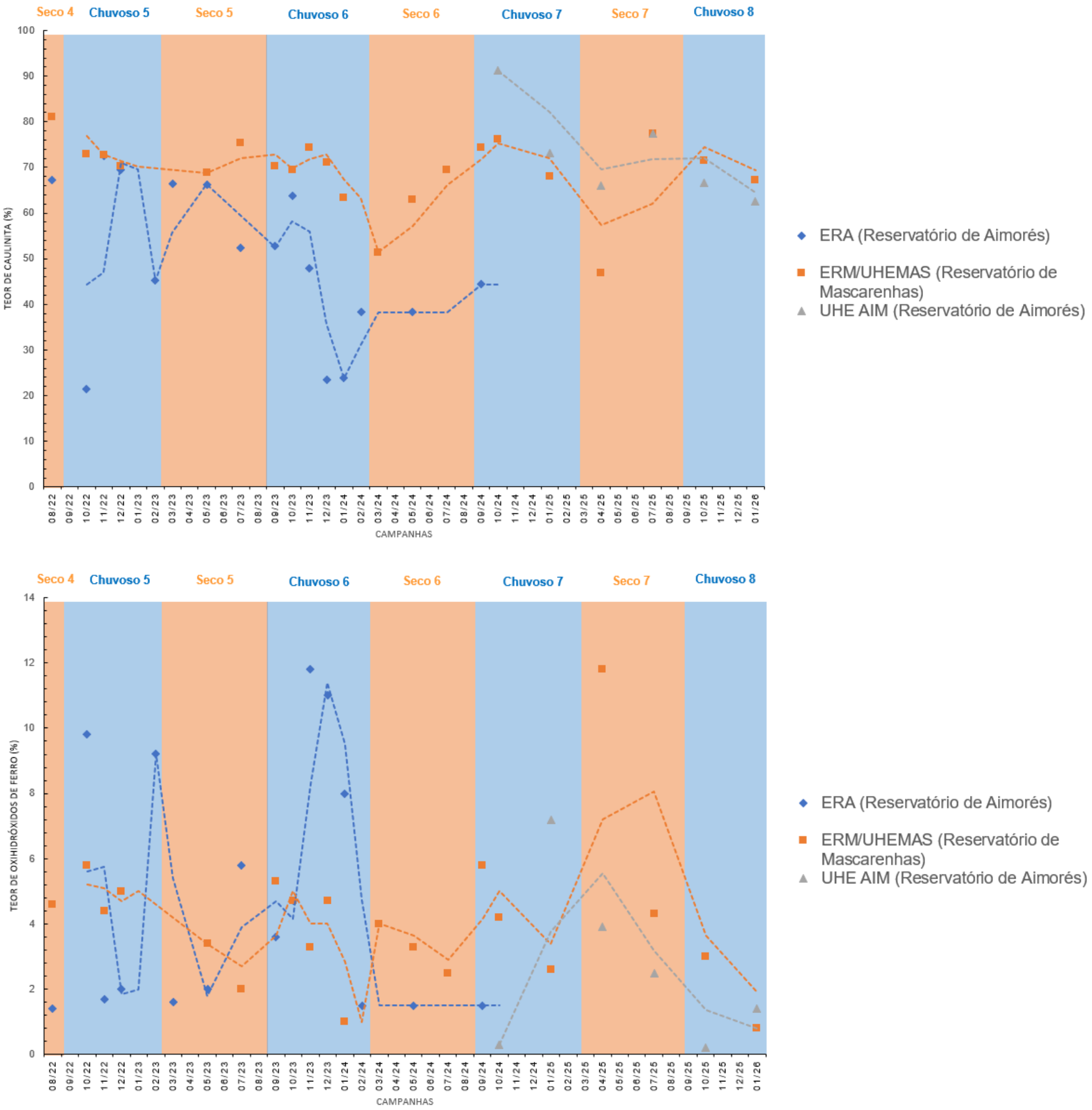
Tabela 5: Valores médios de caulinita, oxihidróxidos de ferro (goethita + hematita), TiO_2 (rutilo e anatásio), gibbsita, quartzo e mica (muscovita e/ou biotita), principais minerais em amostras da fração lama (partículas < 63 µm) de reservatórios monitorados no PMBA/Fest-UFES. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.

	Caulinita	**Oxihidróxidos de Fe**	**TiO^2**	**Gibssita**	**Quartzo**	**Mica**
			µ%			
UHE AIM	72,83	2,58	1,78	5,35	4,53	6,95
UHE MAS	69,28	4,12	4,68	5,64	9,57	5,35
ERA	49,62	4,82	5,00	1,71	20,21	7,66

Os teores médios dos reservatórios ERA (Represa de Aimorés), UHE MAS (Represa de Mascarenhas) e UHE AIM (Reservatório Aimorés) indicam o predomínio de caulinita e quartzo, de forma semelhante à composição mineralógica observada na maioria das amostras de ambientes lacustres e fluviais da Bacia do rio Doce (Tabela 5). A estação UHE AIM apresenta os maiores teores médios de caulinita (72,83) em comparação às estações ERA (49,62%) e UHE MAS (69,28%), evidenciando a maior concentração deste mineral nos sedimentos dessa área. Por outro lado, os teores de quartzo são mais elevados em ERA (20,21%) em relação às demais estações.

Os oxihidróxidos de ferro apresentam teores baixos nas estações, com valores médios de 4,82% em ERA, 4,12% em UHE MAS e 2,58% em UHE AIM, sendo o terceiro grupo mineralógico mais abundante. Apesar de sua menor proporção relativa, os oxihidróxidos de ferro desempenham um papel ambiental importante, especialmente como potenciais carreadores de contaminantes nos sedimentos fluviais e lacustres (Schwertmann e Taylor; 1989). Outros minerais, como TiO_2, gibbsita e mica, também foram detectados em menores concentrações. TiO_2 e gibbsita apresentaram teores levemente maiores em UHE MAS, enquanto a mica foi mais expressiva em ERA (7,66%).

Figura 8: Teores de caulinita e oxihidróxidos de ferro em amostras da fração lama (partículas < 63 µm) de reservatórios monitorados no PMBA/Fest-UFES. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.

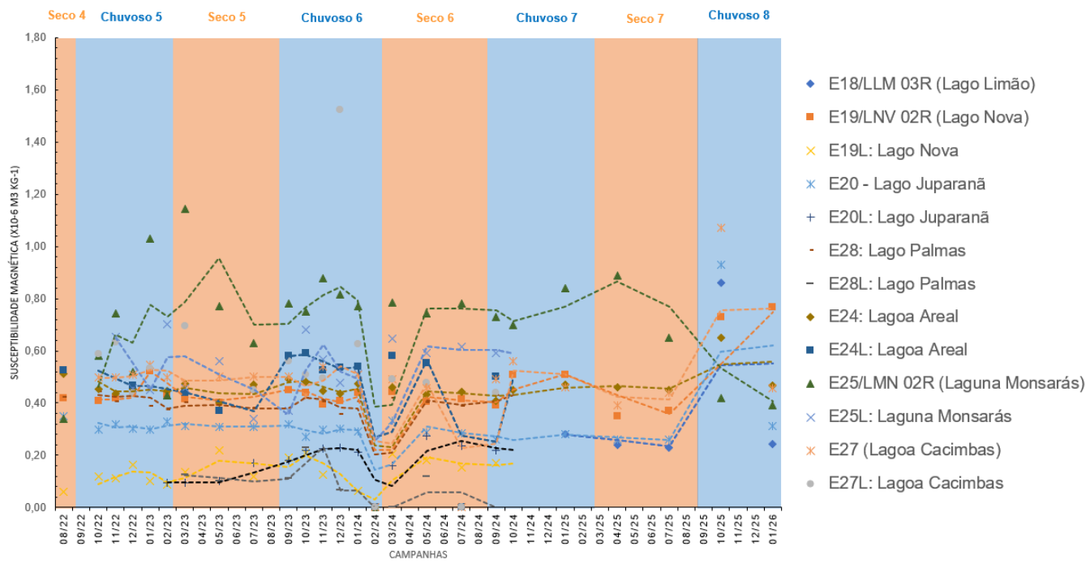


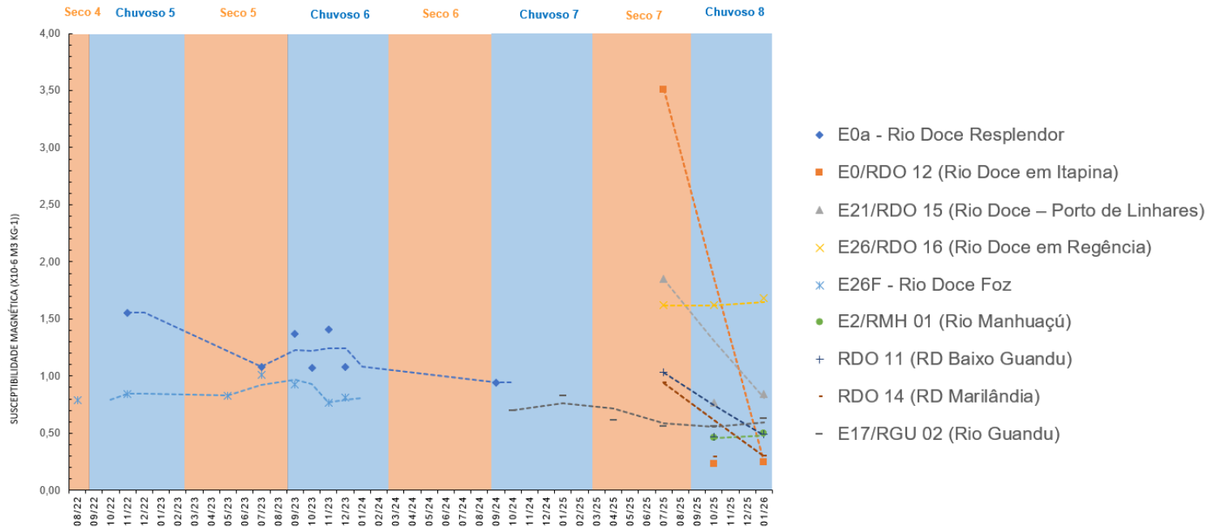
As estações dos reservatórios Aimorés e Mascarenhas apresentaram uma tendência de aumento nos teores de caulinita ao longo do monitoramento. Essa variação reflete possíveis alterações na entrada de sedimentos, que podem estar relacionadas às condições sazonais dos períodos secos e chuvoso. Durante o período chuvoso entre 10/23 e 01/24 (Figura 8), houve uma redução abrupta nos teores de caulinita, que precedeu uma tendência de aumento a partir do período seco 6 até o período seco 8.

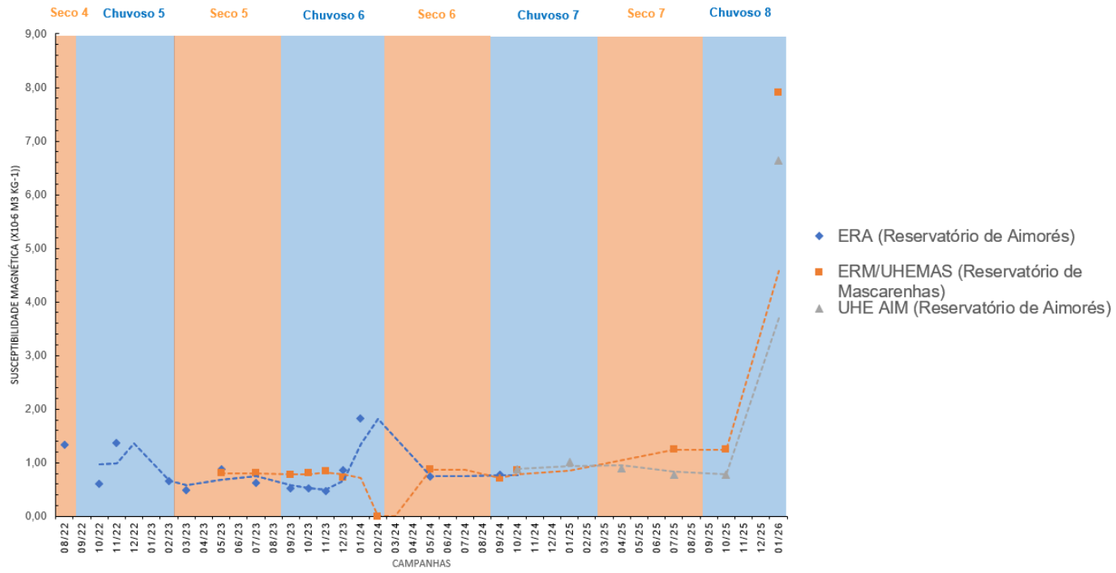
Na estação do reservatório ERA, os teores de óxihidróxidos de ferro expressaram tendência de estabilização após no período chuvoso 6, enquanto na estação UHE MAS os oxihidróxidos de ferro apresentaram uma tendência de estabilidade ao longo do novo ciclo. Houve aumento dos teores no período seco 6 e redução no período 8.

3.2 SUSCEPTIBILIDADE MAGNÉTICA (SEDIMENTOS)

Figura 9: Suscetibilidade magnética de amostras da fração lama (partículas < 63 µm) de ambientes dulcícolas monitorados no PMBA/Fest-UFES. As estações fluviais incluem tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17), estações E0a e RDO12 (realocada, E0), E21 (Colatina, ES), E26 (Regência, ES), E26F, RDO14 e RDO11. Os reservatórios monitorados são Aimorés (ERA e UHE AIM), Mascarenhas (ERM). Os ambientes lacustres monitorados foram: Lago Nova (E19), Lago Juparanã (E20); Lago Palmas (E28), Lagoa Areal (E24), Laguna Monsarás (E25), Lagoa Cacimbas (E27), e o Lago do Limão (E18, LLM03R). Observação: em razão da quantidade insuficiente de lama para análise (material arenoso), a suscetibilidade magnética de algumas estações em algumas campanhas não foi determinada. 'L' indica amostras coletadas nas regiões litorâneas. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.







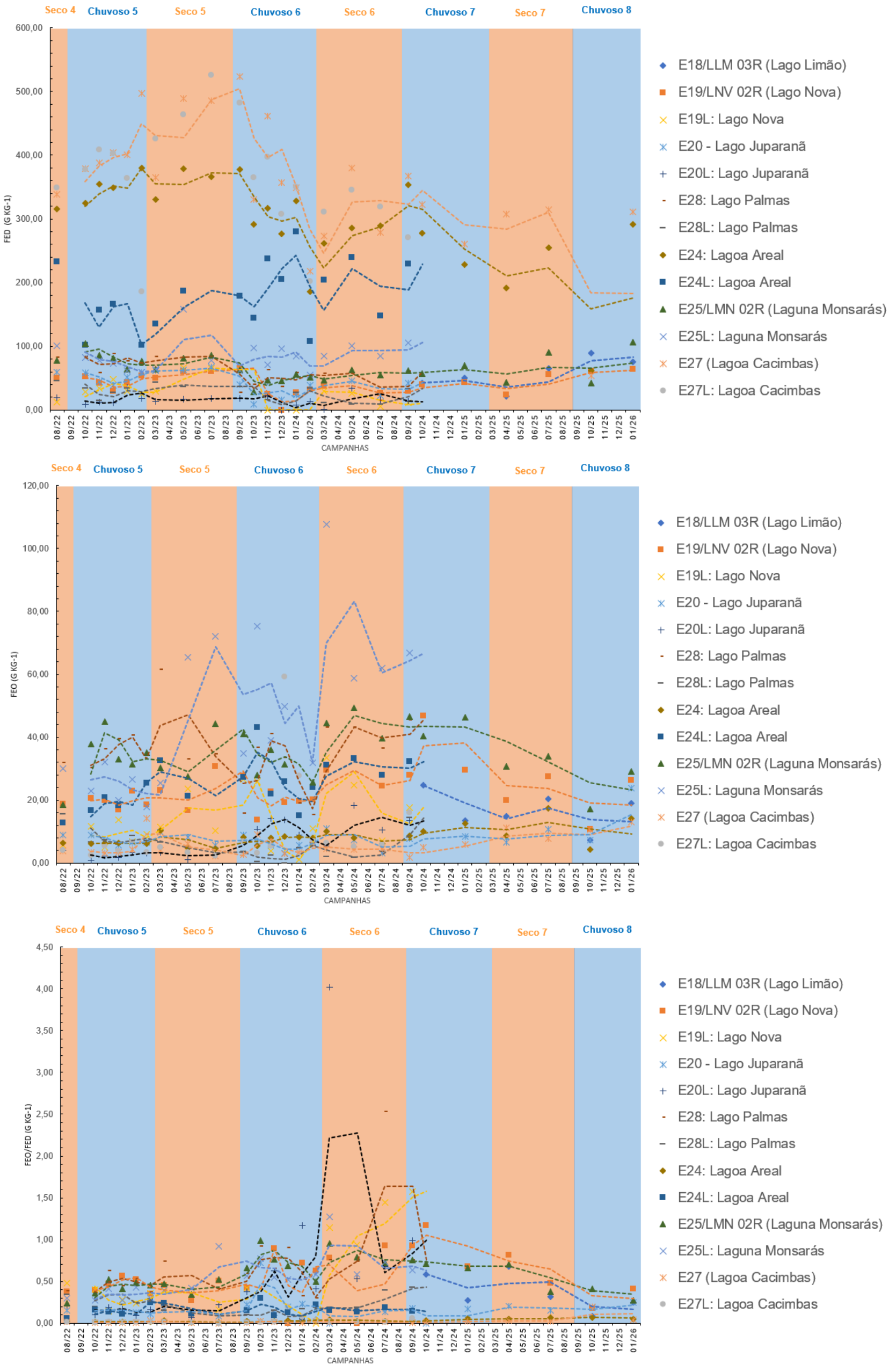
Os valores de susceptibilidade magnética dos sedimentos monitorados indicam poucas variações sazonais entre as estações (Figura 9). De maneira geral, as susceptibilidades magnéticas permaneceram baixas, predominantemente abaixo de 8×10^{-6} m3, sugerindo a predominância de minerais diamagnéticos (ex.: caulinita e quartzo) e antiferromagnéticos (ex.: goethita e hematita).

Nas estações lacustres houve redução dos valores de susceptibilidade magnética no início do período chuvoso 6, em seguida, os valores tenderam a estabilidade até o período 8 onde expressaram aumento. A lagoa Cacimbas (E27) manteve os menores valores, evidenciando sua composição predominantemente diamagnética. Em estações fluviais, como na calha do rio Doce, e tributário, E2, os aumentos durante os períodos úmidos sugerem um aporte local de sedimentos ricos em minerais magnéticos. Já na calha do rio Doce em E21, os valores permaneceram constantes, indicando estabilidade nos aportes sedimentares. A estação E21/ RDO 15 expressou redução abrupta no período chuvoso 8, indicando maior aporte de minerais diamagnéticos.

Nos reservatórios, padrões distintos foram identificados. Em ERA (Represa de Aimorés), houve uma redução na susceptibilidade magnética durante o período chuvoso 6, seguida de recuperação no período seco, enquanto em UHE MAS (Represa de Mascarenhas) foi registrado um aumento significativo no período chuvoso 6, possivelmente associado a sedimentos magnéticos de fontes externas. No período chuvoso 8 ERM/ UHEMAS expressou aumento.

3.3 FASE DE OXIHIDRÓXIDOS DE FERRO (SEDIMENTOS)

Figura 10: Teores de ferro extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato-Na (Fe_d) e oxalato ácido de amônio (Fe_o), e o índice de cristalinidade dos oxihidróxidos de ferro (Fe_o/Fe_d) na fração lama (partículas < 63 µm) de ambientes lacustres monitorados no PMBA/Fest-UFES, monitorados de 08/22 a 01/26. As estações incluem: Lago Nova (E19), Lago Juparanã (E20), Lago Palmas (E28), Lagoa Areal (E24), Laguna Monsarás (E25), Lagoa Cacimbas (E27) e Lago do Limão (E18). Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.



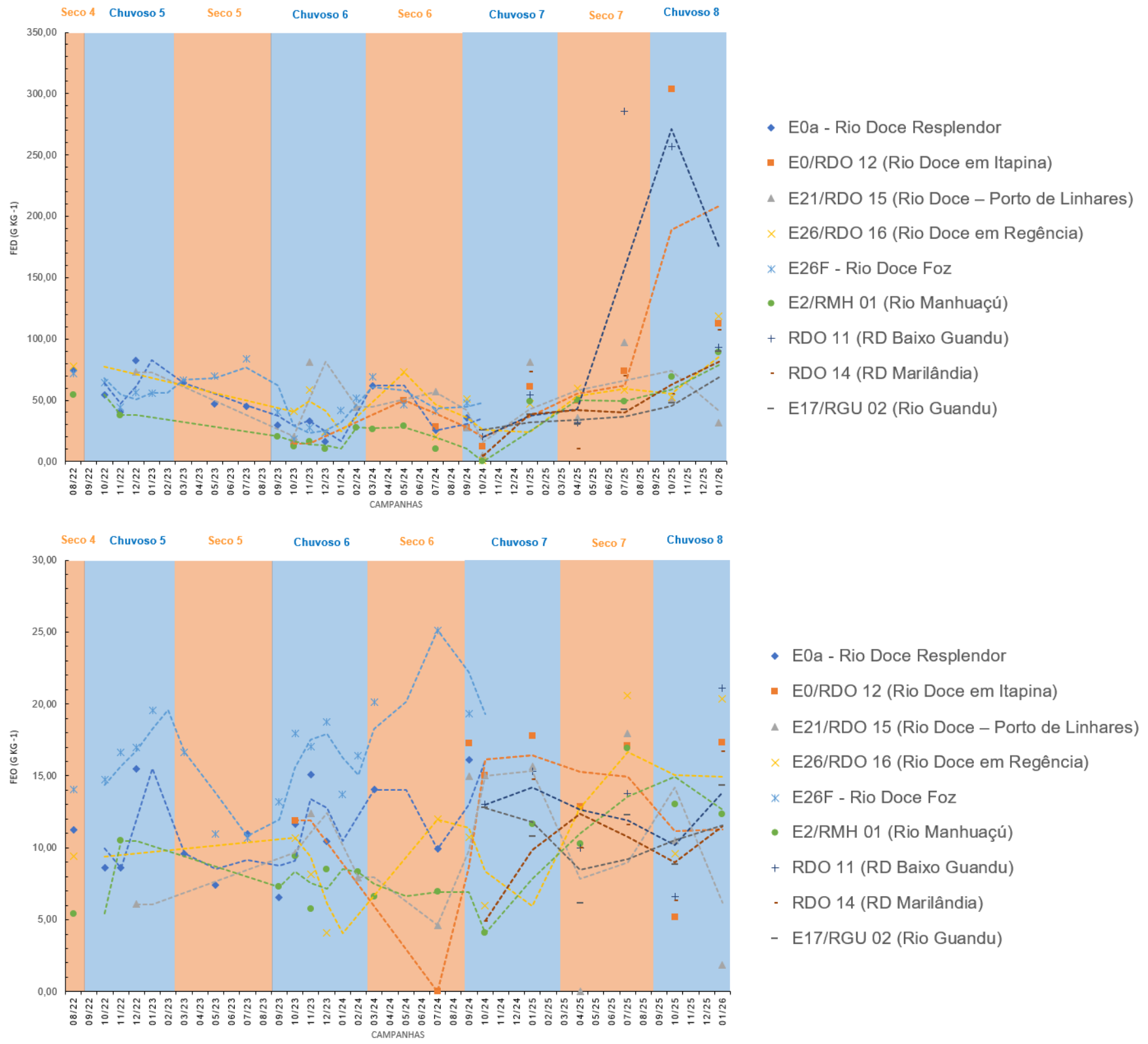
De forma geral, predominam formas cristalinas de oxihidróxidos de ferro nos lagos e lagoas, conforme indicado pelas razões Feo/Fed≤0,5. No entanto, durante as coletas realizadas no período chuvoso 6, observou-se um aumento nas formas pobremente cristalinas em várias estações de coleta, com razões Feo/Fed>0,5 que se mantiveram até a estação chuvosa 8 (Figura 10). Em todas as estações se observa uma redução sistemática dos teores de Fed e Feo. O aporte de sedimentos orgânicos, associado às maiores precipitações, pode intensificar os processos redutivos no ambiente sedimentar, favorecendo a formação e estabilização de fases pobremente cristalinas de ferro (Vepraskas et al., 2016).

As lagoas Areal (E24 e E24L) e Cacimbas (E27 e E27L) apresentaram os maiores teores de Fed, compatíveis com os altos teores de goethita na fração lama dessas estações. Esse comportamento reflete a estabilidade de formas cristalinas de ferro, predominantes em sedimentos oxidados. Por outro lado, a Laguna Monsarás (E25 e E25L) apresentou fração lama pobre em oxihidróxidos de ferro e exibiu um aumento nas razões Feo/Fed durante o período chuvoso 6, indicando intensificação dos processos redutivos em suas condições sedimentares.

Em ambientes alagados ou saturados por água, o esgotamento rápido do oxigênio favorece a transição da atividade microbiana de aeróbica para anaeróbica, resultando na fermentação da matéria orgânica (Kirk, 2004). Durante esse processo, o carbono atua como o principal doador de elétrons, enquanto o oxigênio é o aceptor primário na respiração microbiana (Ponnamperuma, 1984). Na ausência de oxigênio, outros elementos inorgânicos, como nitrogênio, ferro, manganês e enxofre, tornam-se aceptores alternativos de elétrons, contribuindo para a oxidação da matéria orgânica (Du Laing et al., 2009).

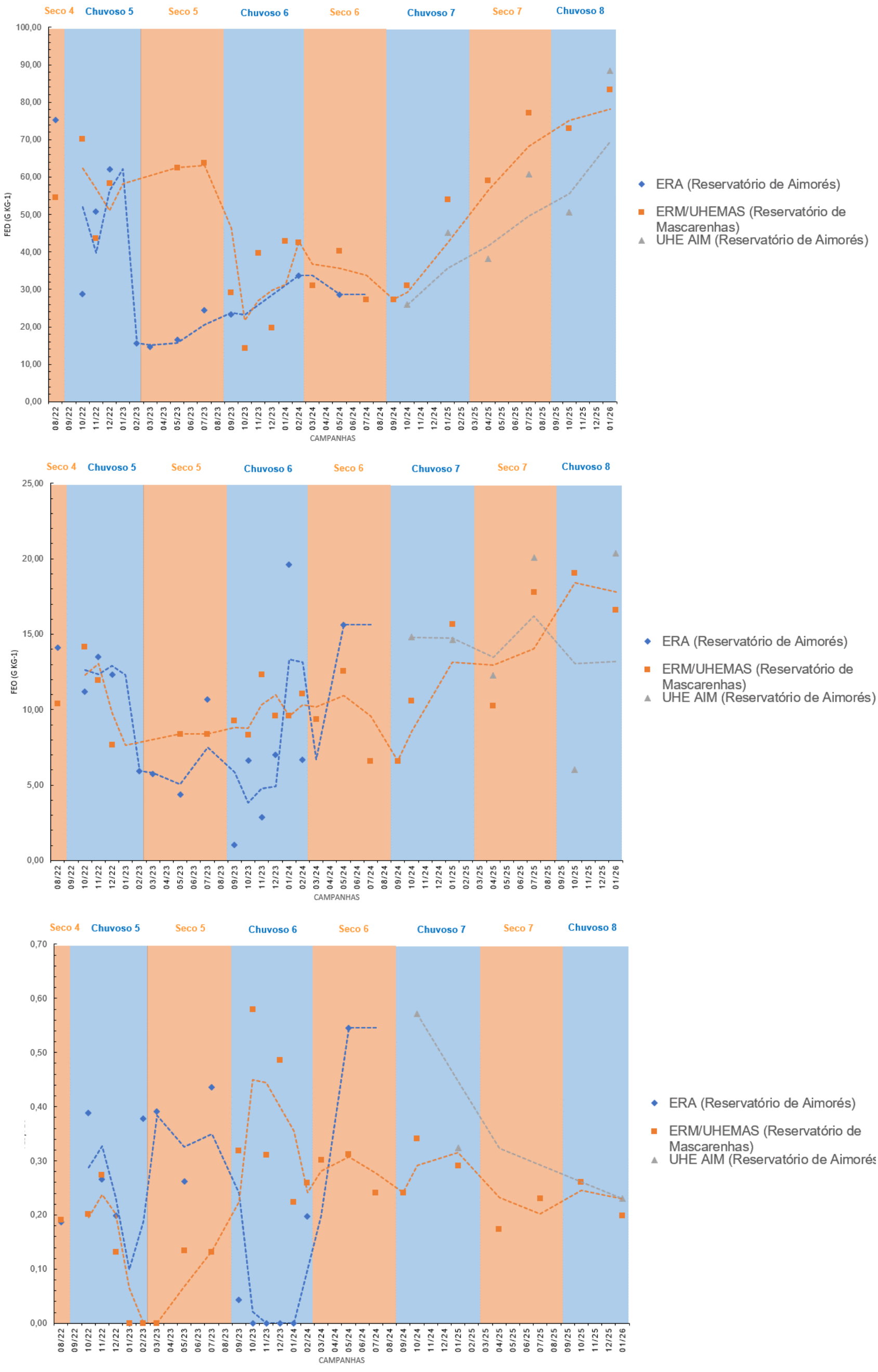
Nos sedimentos, os oxihidróxidos de ferro são a principal fonte de Fe^{3+} (Bolan et al., 1999). Esses compostos podem ser reduzidos quimicamente durante a respiração anaeróbica dos microrganismos (Kirk, 2004), liberando elementos potencialmente tóxicos previamente adsorvidos ou complexados, como arsênio (As), cádmio (Cd), zinco (Zn) e chumbo (Pb) (Shaheen et al., 2016). Esse processo reforça o papel crítico das condições redutivas em ambientes alagados, não apenas na dinâmica do ferro, mas também no potencial impacto ambiental relacionado à liberação de contaminantes.

Figura 11: Teores de ferro extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato-Na (Fe_d) e oxalato ácido de amônio (Fe_o), e o índice de cristalinidade dos oxihidróxidos de ferro (Fe_o/Fe_d) na fração lama (partículas < 63 µm) dos ambientes fluviais do rio Doce e seus tributários monitorados no PMBA/Fest-UFES, monitorados de 08/22 a 01/26. As amostras são provenientes de várias estações ao longo do sistema fluvial, incluindo o tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17); e a calha principal do rio Doce, com coletas a montante das represas de Aimorés e Mascarenhas nas estações E0a e RDO12, em trecho intermediário na estação E21 (Colatina, ES), e a jusante na estação E26 (Regência, ES), próxima à foz; a estação E26F; e as estações RDO14 e RDO11, ampliando a cobertura espacial ao longo do gradiente longitudinal do rio Doce. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.



Nas estações da calha do rio Doce, tributários e Foz, os teores de ferro associados a formas pouco cristalinas (Feo) tiveram ligeiro aumento a partir do período seco 6, sobretudo nas estações E26F (Rio Doce Foz) e E0a (Rio Doce Resplendor). Os teores de Fed apresentaram uma redução significativa durante o período chuvoso 6 na maioria das estações amostrais, que precedeu um aumento generalizado período chuvoso 7 ao 8. Como consequência, as relações Feo/Fed foram mais elevadas no período chuvoso 7, especialmente nas estações localizadas em Itapina (E0/RDO12), Porto de Linhares (E21/RDO15) e rio Doce em Regência (E26/RDO16), sugerindo um incremento nas fases menos cristalinas de ferro, possivelmente associado a condições redox favoráveis à redução de oxihidróxidos cristalinos.

Figura 12: Teores de ferro extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato-Na (Fe_d) e oxalato ácido de amônio (Fe_o), e o índice de cristalinidade dos oxihidróxidos de ferro (Fe_o/Fe_d) na fração lama (partículas < 63 µm) de reservatórios monitorados no PMBA/Fest-UFES. i) Período chuvoso (outubro a março) e período seco (abril a setembro). Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.

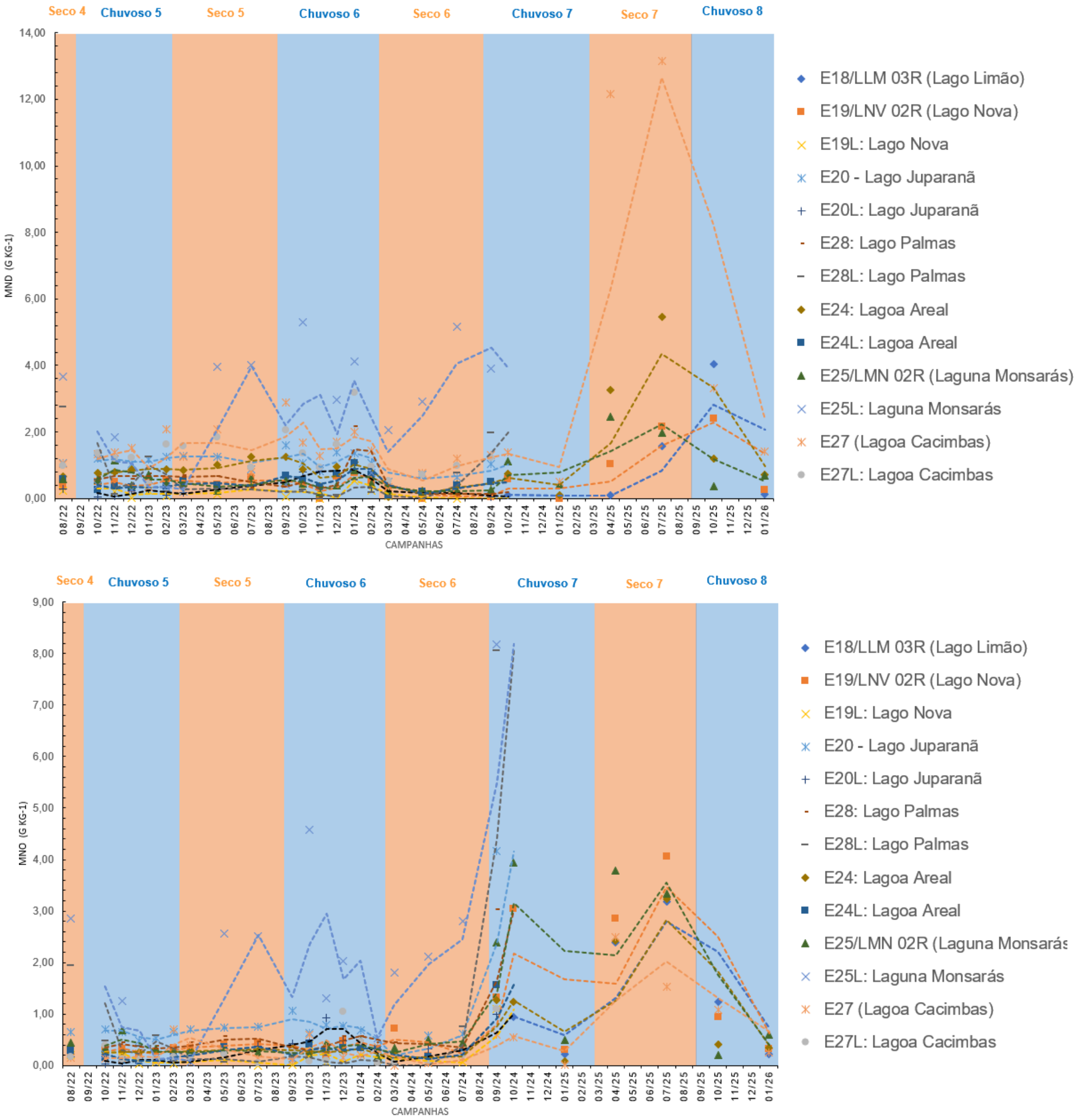


Os teores de Fed nos reservatórios ERM/UHEMAS e UHE AIM apresentaram aumento expressivo a partir na estação chuvosa 7. De maneira geral, os teores de Fed observados em ambientes fluviais e lacustres indicam uma relativa pobreza em oxihidróxidos de ferro na maioria dos ambientes dulcícolas monitorados, enquanto que, nos reservatórios há uma tendência de aumento dos teores de Fed e, de maneira geral, Feo. As lagoas Areal (E24 e E24L) e Cacimbas (E27 e E27L) destacaram-se por seus altos teores de ferro, o que pode ser atribuído à influência geográfica da Formação Barreiras. Essa formação é composta por sedimentos naturalmente ricos em oxihidróxidos de ferro (Nunes et al., 2011). A proximidade com a Formação Barreiras influencia significativamente a composição mineral dos sedimentos dessas lagoas, resultando em concentrações mais elevadas desses minerais.

Além disso, a área onde se localizam essas lagoas é caracterizada pela presença de solos ácidos sulfatados, que sofrem uma redução abrupta do pH quando oxidados. Essa acidificação ocorre tanto pela ferrólise (oxidação do ferro) quanto pela geração de ácido sulfúrico. A redução do pH provoca a dissolução de caulinitas, enquanto o ferro, que é solúvel em condições ácidas, tende a se acumular nos sedimentos de áreas depressivas como as lagoas.

Nos ambientes dulcícolas monitorados, os oxihidróxidos de ferro na fração lama são predominantemente cristalinos (Feo/Fed ≤ 0,50). No entanto, a amplitude dos valores do índice de cristalinidade (0,01 ≤ Feo/Fed ≤ 0,73) sugere que variações nas condições físico-químicas, como pH e potencial redox, afetam significativamente a cristalinidade desses minerais. Isso influencia diretamente a dinâmica de sorção e liberação de metais associados aos oxihidróxidos de ferro.

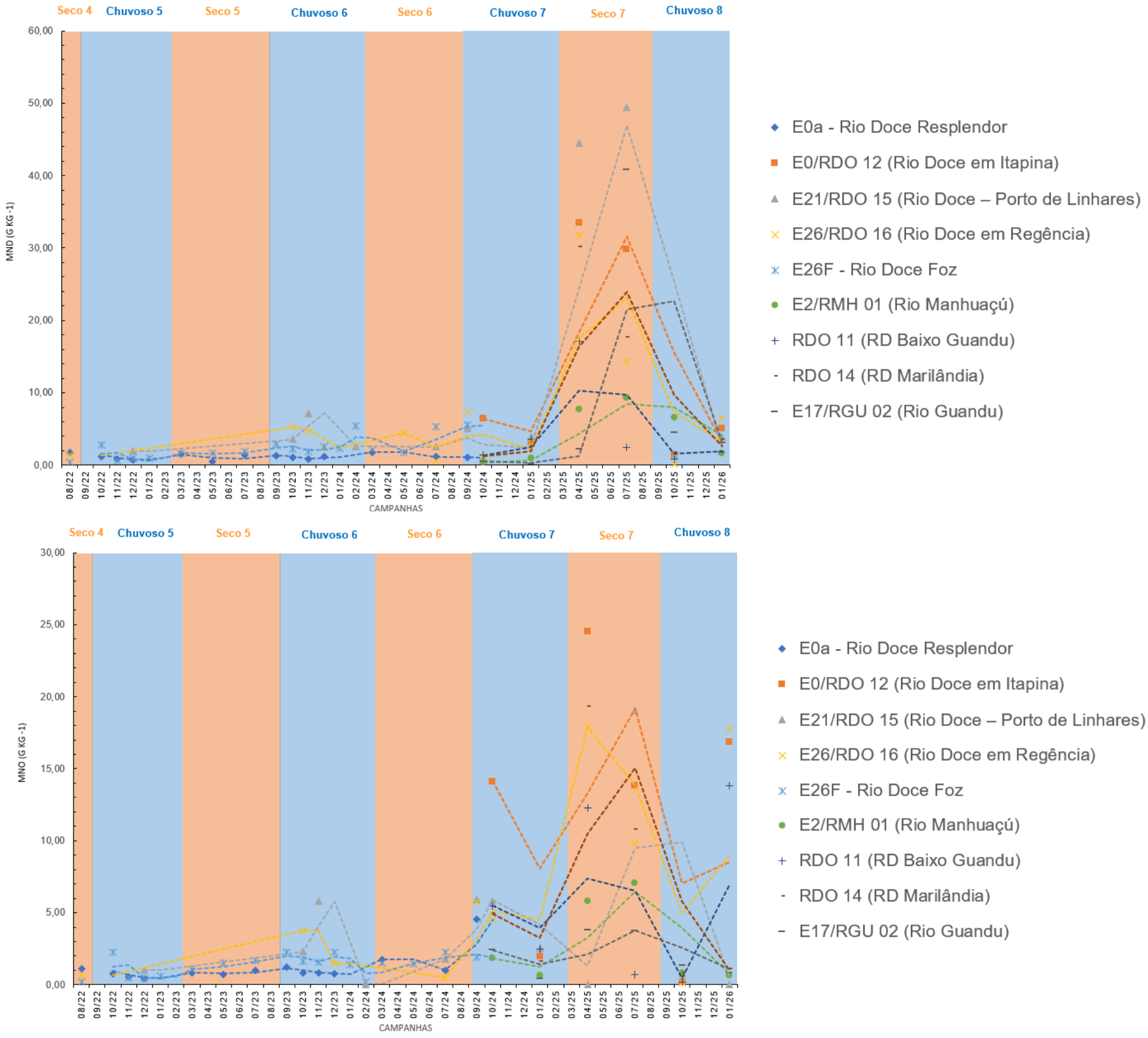
Figura 13: Teores de manganês extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato-Na (Mn_d) e oxalato ácido de amônio (Mn_o) na fração lama (partículas < 63 µm) de ambientes lacustres monitorados no PMBA/Fest-UFES, entre 08/22 e 01/26. As estações incluem: Lago Nova (E19), Lago Juparanã (E20), Lago Palmas (E28), Lagoa Areal (E24), Laguna Monsarás (E25), Lagoa Cacimbas (E27) e Lago do Limão (E18). O período de suspensão das atividades de campo do PMBA/Fest-UFES devido à COVID-19 ocorreram entre março e novembro de 2020. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.



Os sedimentos dos lagos e lagoas apresentaram baixos teores de Mn_d (< 5,0 g kg-1) e Mn_o (< 8,0 g kg-1), sendo as maiores médias móveis encontradas na lagoa Cacimbas (E27) (Figura 13). Os lagos Nova, Juparanã e Palmas evidenciaram poucas variações na média móvel de suas concentrações, sugerindo certa estabilidade geoquímica desse elemento nos ambientes. Tal estabilidade representaria menor potencial de liberação de manganês e sugere equilíbrio entre os teores associados aos oxihidróxidos de ferro e o meio.

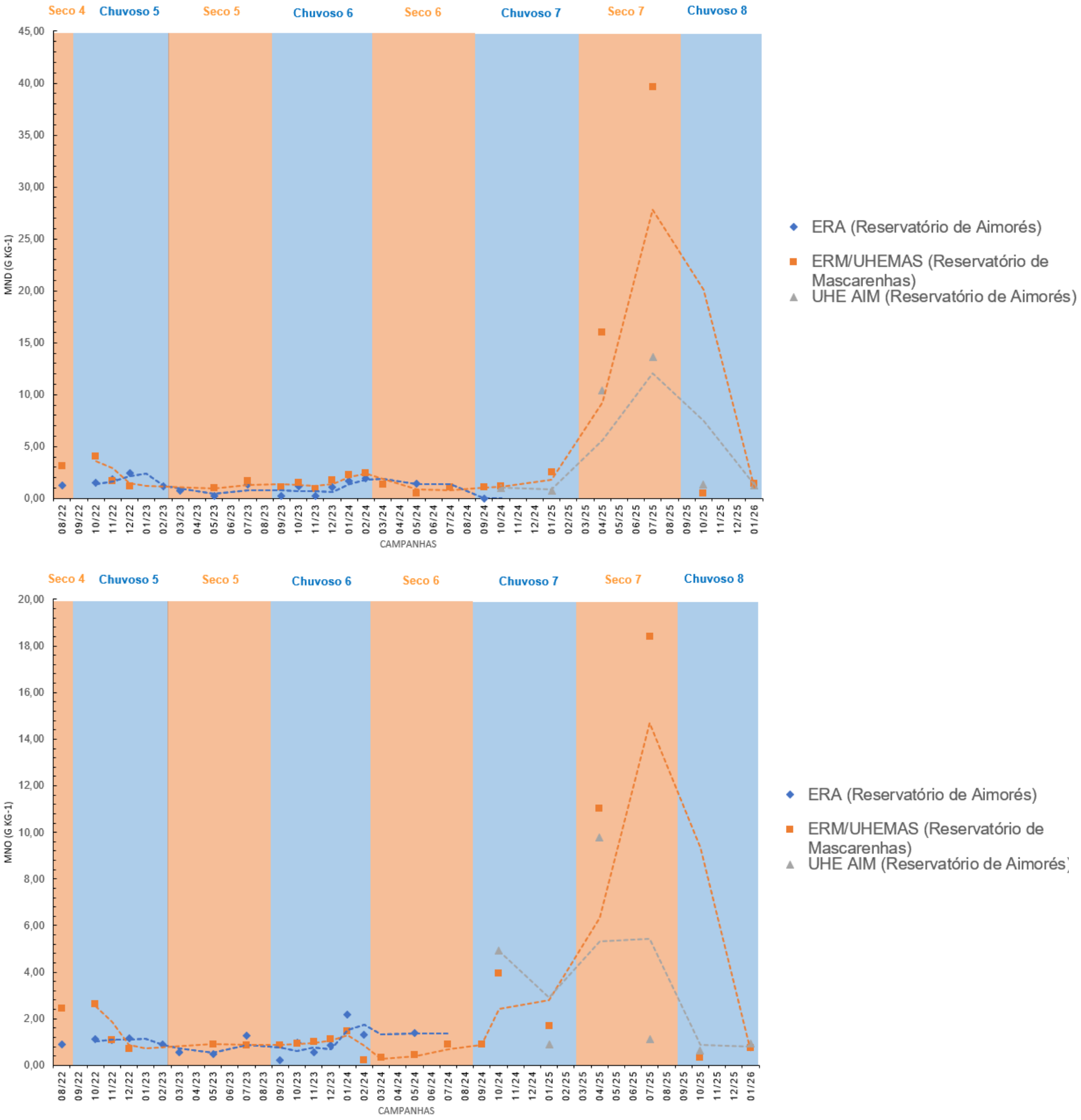
Os maiores valores das médias móveis dos teores de manganês extraído por ditionito-citrato-bicarbonato (Mnd) e oxalato (Mno) foram encontrados na Lagoa Cacimbas (E27L) e Monsarás (E25L). Em todas as estações houve aumento expressivo dos teores de Mnd e Mno na estação seca 7, que precedeu uma redução abrupta na estação chuvosa 8. Esse comportamento pode ser explicado por alterações geoquímicas no ambiente, provavelmente relacionadas ao aumento do potencial redox. Esse aumento favorece a dissolução de oxihidróxidos de ferro e manganês, liberando manganês associado para os ecossistemas aquáticos.

Figura 14: Teores de manganês extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato-Na (Mn_d) e oxalato ácido de amônio (Mn_o) na fração lama (partículas < 63 µm) de ambientes fluviais monitorados no PMBA/Fest-UFES, entre 08/22 e 01/26. As amostras são provenientes de várias estações ao longo do sistema fluvial, incluindo o tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17); e a calha principal do rio Doce, com coletas a montante das represas de Aimorés e Mascarenhas nas estações E0a e RDO12, em trecho intermediário na estação E21 (Colatina, ES), e a jusante na estação E26 (Regência, ES), próxima à foz; a estação E26F e as estações RDO14 e RDO11, ampliando a cobertura espacial ao longo do gradiente longitudinal do rio Doce. Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.



As maiores médias móveis de manganês associados aos oxihidróxidos de ferro cristalinos (Mnd) e pobremente cristalinos (Mno) foram identificadas na calha do rio (E26, E21) durante o período seco 7 (Figura 14). Essas mudanças podem estar associadas à redução do potencial redox do meio, promovendo o aumento das taxas de dissolução redutiva de oxihidróxidos de ferro e de manganês. Como consequência, além de ferro e manganês, outros elementos potencialmente tóxicos associados podem ser liberados, aumentando os níveis de contaminação.

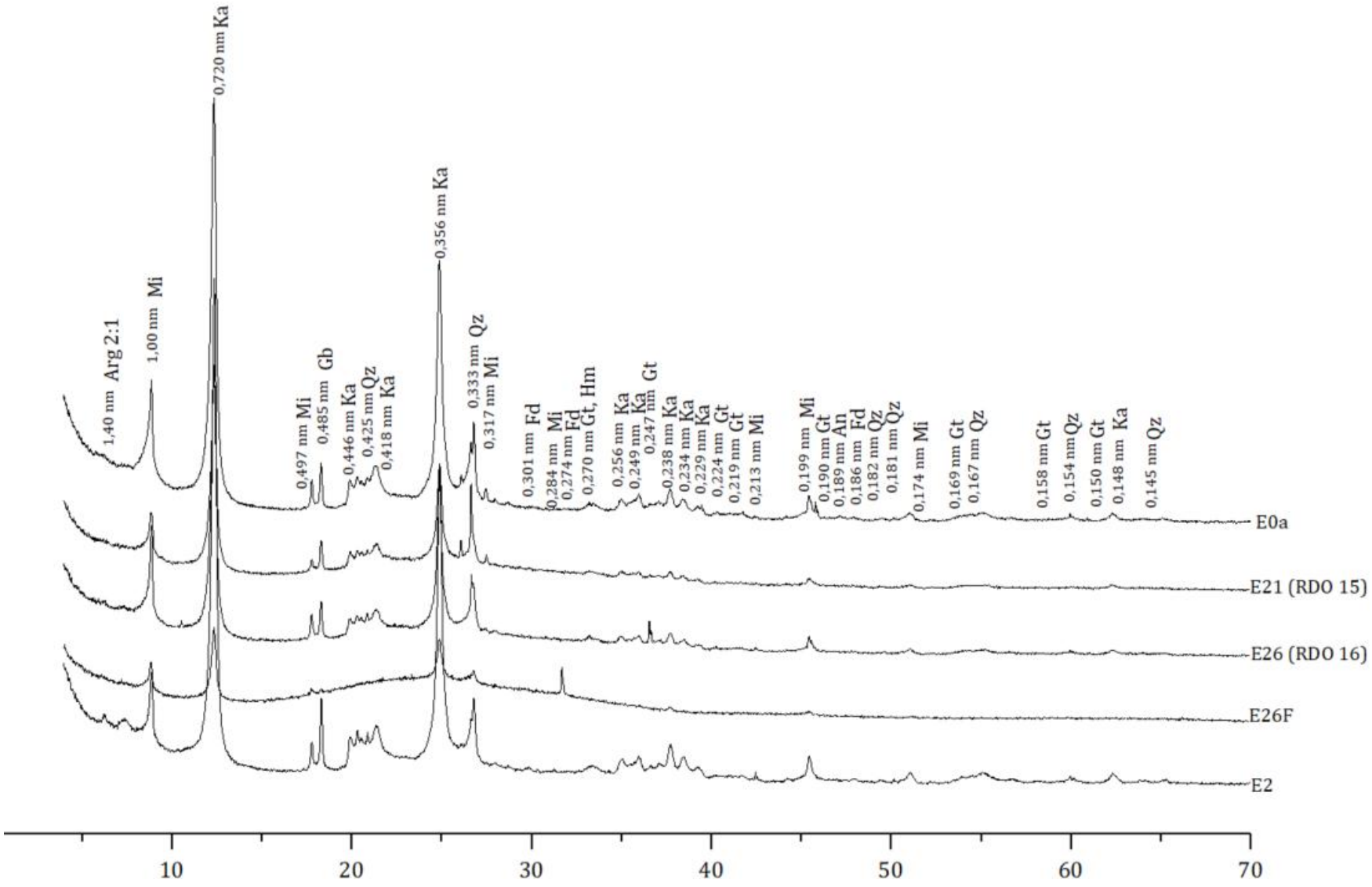
Figura 15: Teores de manganês extraídos por ditionito-citrato-bicarbonato-Na (Mn_d) e oxalato ácido de amônio (Mn_o) na fração lama (partículas < 63 µm) de represas monitorados no PMBA/Fest-UFES, entre 08/22 a 01/26. i) período chuvoso (outubro a março) e período seco (abril a setembro). Para detalhes sobre a cronologia e os códigos das estações, consultar o Quadro 1.



Assim como nos ambientes fluviais e lacustres, as estações dos reservatórios também apresentaram maiores teores de manganês associados aos oxihidróxidos de ferro cristalinos (Mnd) e pobremente cristalinos (Mno) durante o período seco 7 (Figura 15). Isso reforça a premissa de alterações nas condições ambientais em toda a região do Baixo rio Doce, resultando na liberação de manganês associado. Essas mudanças podem estar relacionadas à redução do potencial redox do ambiente, o que leva ao aumento das taxas de dissolução redutiva de oxihidróxidos de ferro ligados ao manganês.

3.4 COMPOSIÇÃO MINERALÓGICA (MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO – MPS)

Figura 16: Padrões de raios-X obtidos de amostras (orientadas) de MPS (Material Particulado em Suspensão). As estações fluviais incluem tributário rio Manhuaçu (RMH01, E2); o rio Guandu (RGU02, E17), estações E0a e RDO11 (realocada, E0), E21 (Colatina, ES), E26 (Regência, ES). Os reservatórios monitorados são Aimorés (ERA) e Mascarenhas (ERM). Os ambientes lacustres foram: Laguna Monsarás (E25). Observação: em razão da quantidade insuficiente do Material Particulado em Suspensão, não foi possível conduzir a difração de raios x em algumas estações amostrais. Minerais identificados nos padrões de raios-X: Ka = caulinita, Mi = mica (muscovita e/ou biotita), Qz = quartzo, Gb = gibbsita, Gt = goethita, Hm = Hematita.



As análises mineralógicas das amostras de Material Particulado em Suspensão (MPS) revelaram que os principais componentes são silicatos, incluindo caulinita, mica e quartzo (Figura 16). Entre esses minerais, a caulinita apresentou os picos de difração mais intensos nos padrões de raios-X, sugerindo maior participação relativa nas amostras analisadas. A mica e o quartzo também foram identificados de forma recorrente, embora com menor intensidade, caracterizando-se como constituintes secundários importantes do MPS.

Em contraste, os oxihidróxidos de ferro cristalinos, representados principalmente por goethita e hematita, apresentaram picos de difração menos intensos em relação aos silicatos. Esse resultado indica que essas fases ocorrem em proporções reduzidas no MPS, especialmente quando comparadas aos sedimentos de fundo dos ambientes estudados. Essa diferença pode estar relacionada à dinâmica de transporte e deposição das partículas em suspensão, uma vez que o MPS representa a fração sedimentar dispersa na coluna d'água, enquanto os oxihidróxidos de ferro tendem a apresentar maior potencial de agregação, floculação e deposição. Assim, minerais silicáticos finos, como a caulinita, podem permanecer mais facilmente em suspensão e ser transportados pelas correntes fluviais e lacustres, ao passo que fases ferruginosas mais densas ou floculadas tendem a se concentrar preferencialmente nos sedimentos de fundo (Cornell and Schwertmann, 2003).

Durante o novo ciclo do PMBA/Fest-UFES, a composição mineralógica das amostras de MPS manteve-se relativamente consistente, com predominância de caulinita, mica e quartzo. Além desses minerais, foram observados picos de difração característicos da gibbsita, indicando participação relevante dessa fase nas amostras analisadas. A presença de gibbsita, juntamente com caulinita, reforça a contribuição de materiais derivados do intemperismo intenso de solos tropicais presentes na bacia do rio Doce.

De modo geral, a composição mineralógica do MPS mostrou relação direta com a dos sedimentos de fundo, uma vez que ambas as matrizes refletem produtos do intemperismo, erosão e transporte de solos e rochas da bacia de drenagem. No entanto, a menor expressão relativa dos oxihidróxidos de ferro no MPS indica que esses minerais tendem a ser menos persistentes na fração em suspensão, possivelmente devido à maior tendência à floculação e deposição. Ressalta-se, ainda, que a difração de raios-X identifica preferencialmente fases cristalinas, de modo que formas pouco cristalinas ou amorfas de ferro podem estar sub-representadas nos padrões difratométricos.

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

Diversos estudos indicam que os Materiais Ligados ao Desastre de mineração de ferro provenientes do rompimento da Barragem de Fundão apresentam concentrações significativamente elevadas de elementos potencialmente tóxicos em comparação com sedimentos e solos não impactados da Bacia do rio Doce (Carmo et al., 2017; Costa et al., 2022; Davila et al., 2020; Duarte et al., 2021; Gomes et al., 2017; Marta-Almeida et al., 2016; Queiroz et al., 2018). Camêlo et al. (2024) identificaram riscos cancerígenos associados a níveis elevados de arsênio (As), cromo (Cr) e níquel (Ni) nos Materiais Ligados ao Desastre, com os oxihidróxidos de ferro cristalinos, particularmente a goethita, sendo apontados como a principal fonte desses contaminantes. Apesar de sua alta estabilidade química, esses minerais podem se dissolver em condições redutivas, elevando o risco de liberação de elementos potencialmente tóxicos, especialmente em áreas de maior vulnerabilidade, como ambientes próximos a comunidades e ecossistemas frágeis.

Ao longo dos anos de monitoramento do PMBA/Fest-UFES, os indicadores mineralógicos permitiram acompanhar a dinâmica espaço-temporal dos sedimentos e do material particulado em suspensão nos ambientes dulcícolas da porção capixaba da bacia do rio Doce. De modo geral, os resultados indicam que a assembleia mineralógica dos sedimentos manteve relativa estabilidade qualitativa ao longo da série, sem substituição expressiva das principais fases minerais identificadas. Entretanto, foram observadas variações quantitativas relevantes nos teores relativos de caulinita, oxihidróxidos de ferro, gibbsita, quartzo e mica, refletindo diferenças entre compartimentos ambientais, posição na calha fluvial, influência de tributários, dinâmica de reservatórios, proximidade da foz e efeitos sazonais.

A caulinita permaneceu como a principal fase mineral dos sedimentos na maior parte das estações monitoradas, especialmente nos ambientes fluviais, lagos e parte das lagoas. Essa predominância é compatível com a forte contribuição de materiais finos derivados do intemperismo de solos tropicais da bacia do rio Doce. As oscilações observadas ao longo da série, especialmente após o início do Novo Ciclo, indicam que a caulinita responde de forma sensível aos processos de transporte, remobilização e deposição de partículas finas. Em alguns períodos secos, a menor energia hidrodinâmica pode favorecer a deposição desse mineral nos sedimentos de fundo, enquanto períodos chuvosos ou eventos de maior vazão podem promover sua ressuspensão e transferência parcial para o material particulado em suspensão.

Os oxihidróxidos de ferro, representados principalmente por goethita e hematita, ocorreram em menores proporções na maior parte dos sedimentos fluviais, lacustres e de reservatórios, mas mantêm elevada relevância ambiental por sua capacidade de adsorver, coprecipitar e reter elementos potencialmente tóxicos. As maiores participações relativas dessas fases foram observadas nas lagoas Areal e Cacimbas, que se diferenciam dos demais ambientes dulcícolas pela forte contribuição ferruginosa. Essa característica pode refletir tanto a influência de materiais associados ao desastre quanto condições ambientais locais favoráveis à formação, transformação e acúmulo de fases de ferro,

incluindo processos autigênicos, variações redox e interação com ambientes de transição flúvio-estuarina.

Os indicadores Fed, Feo e Feo/Fed complementam a interpretação mineralógica ao demonstrar que os oxihidróxidos de ferro presentes nos sedimentos são, em geral, predominantemente cristalinos. No entanto, as variações da relação Feo/Fed indicam que mudanças nas condições físico-químicas do ambiente, especialmente pH e potencial redox, podem modificar a proporção entre fases cristalinas e pobremente cristalinas. Esse aspecto é ambientalmente relevante porque fases ferruginosas menos cristalinas tendem a apresentar maior reatividade geoquímica, enquanto condições redutoras podem favorecer a dissolução parcial de oxihidróxidos de ferro e a liberação de elementos associados. Assim, embora os resultados não indiquem alteração qualitativa ampla da assembleia mineral, reforçam a necessidade de acompanhamento contínuo da dinâmica redox dos sedimentos.

A suscetibilidade magnética atuou como indicador complementar da presença e variação relativa de minerais ferrimagnéticos e fases associadas aos óxidos de ferro. Sua interpretação integrada aos dados de DRX e extrações seletivas permite diferenciar variações relacionadas à composição mineralógica de alterações associadas à concentração, cristalinidade e origem das fases ferruginosas. Dessa forma, o indicador contribui para o entendimento da distribuição espacial e temporal de materiais ricos em ferro, especialmente em setores sujeitos à deposição preferencial de partículas finas ou à influência de materiais associados ao desastre.

No Material Particulado em Suspensão (MPS), a composição mineralógica foi dominada por silicatos, principalmente caulinita, mica e quartzo, com participação também de gibbsita. Os oxihidróxidos de ferro cristalinos, como goethita e hematita, foram identificados como fases minoritárias. Essa diferença entre MPS e sedimento de fundo é coerente com a dinâmica de transporte das partículas: minerais silicáticos finos, como a caulinita, tendem a permanecer mais facilmente em suspensão, enquanto fases ferruginosas apresentam maior tendência à agregação, floculação e deposição. Portanto, a composição do MPS reforça a importância dos processos hidrossedimentológicos na redistribuição mineral entre a coluna d'água e o sedimento de fundo.

De modo geral, os indicadores avaliados mostram que a mineralogia dos ambientes dulcícolas monitorados é controlada por uma combinação de fatores naturais e antrópicos, incluindo a composição dos solos da bacia, o transporte de sedimentos finos, a sazonalidade hidrológica, a dinâmica dos reservatórios, a influência de tributários e os processos flúvio-estuarinos próximos à foz. Embora algumas oscilações coincidam com períodos secos ou chuvosos, os padrões observados não indicam um controle sazonal uniforme para todas as estações. As respostas são locais e dependem da posição da estação, da disponibilidade de partículas finas e das condições geoquímicas do sedimento.

Assim, os anos de monitoramento demonstram que os indicadores mineralógicos são ferramentas importantes para interpretar a evolução ambiental da bacia do rio Doce após o rompimento da Barragem de Fundão. A manutenção da assembleia mineral principal sugere estabilidade composicional em escala ampla, enquanto as variações quantitativas dos minerais e dos indicadores de ferro evidenciam processos ativos de redistribuição, deposição, remobilização e transformação geoquímica.

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

A análise mineralógica quantitativa por difração de raios-X necessita de concentração razoável, aproximadamente 1 grama, de material sólido para preencher o porta-amostra (lâmina escavada) no modo de pó não orientado. No entanto, devido às variações nas concentrações de MPS ao longo dos períodos de cheia e seca, há situações em que não se consegue coletar material em quantidade suficiente para realizar essa análise, a qual está relacionada a meta 1 do plano de trabalho atual do Tema Mineralogia. Ajustes operacionais (ex., ampliação do volume de água coletado), além de impraticáveis pela equipe campo, não implicaram na execução da análise pois infelizmente tais limitações são impostas pelas condições ambientais da bacia do rio Doce.

6 REFERÊNCIAS

BARBOSA, J.Z., POGGERE, G., SILVA, S.H.G., MANCINI, M., MOTTA, A.C.V., MARQUES, J.J.G., CURI, N., 2021. National-scale spatial variations of soil magnetic susceptibility in Brazil. Journal of South American Earth Sciences 108, 103191. https://doi.org/10.1016/j.jsames.2021.103191

BARCELLOS, D., QUEIROZ, H.M., FERREIRA, A.D., BERNARDINO, A.F., NÓBREGA, G.N., OTERO, X.L., FERREIRA, T.O., 2022. Short-term Fe reduction and metal dynamics in estuarine soils impacted by Fe-rich mine tailings. Applied Geochemistry 136, 105134. https://doi.org/10.1016/J.APGEOCHEM.2021.105134

BISH, D.L., REYNOLDS JUNIOR, R.C., 1989. Sample preparation for x-ray diffraction. In: BISH, D. L.; POST, J. E. (Ed.). Modern powder diffraction. 2nd ed. Washington, DC: Mineralogical Society of America, 73-97.

BOLAN, N.S., NAIDU, R., SYERS, J.K., TILLMAN, R.W., 1999. Surface Charge and Solute Interactions in Soils. p. 87-140. https://doi.org/10.1016/S0065-2113(08)60514-3

BRASIL. Ministério da Agricultura e Pecuária. Instituto Nacional de Meteorologia**.** Estado do clima no Brasil em 2022. Brasília, DF: INMET, 2023. 20 p. Edição digital.

CAMÊLO, D.L.; KER, J.C.; FONTES, M.P.F.; CORRÊA, M.M.; COSTA, A.C.S.; MELO, V.F., 2017. Pedogenic iron oxides in iron-rich Oxisols developed from mafic rocks. Revista Brasileira de Ciência do Solo 41, e0160379. https://doi.org/10.1590/18069657rbcs20160379

CAMÊLO, D.L., KER, J.C., FONTES, M.P.F., COSTA, A.C.S., CORRÊA, M.M., LEOPOLD, M., 2018. Mineralogy, magnetic susceptibility and geochemistry of Fe-rich Oxisols developed from several parent materials. Scientia Agricola 75, 410-419. https://doi.org/10.1590/1678-992X-2017-0087

CAMÊLO, D.L., SILVA FILHO, L.A., ARRUDA, D.L., CYRINO, L.M., BARROSO, G.F., CORRÊA, M.M., BARBEIRA, P.J.S., MENDES, D.B., PASA, V.M.D., PROFETI, D., 2024. Mineralogical fingerprint and human health risk from potentially toxic elements of Fe mining tailings from the Fundão dam. Science of the Total Environment 912, 169328. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.169328

CARMO, F.F., KAMINO, L.H.Y., TOBIAS JUNIOR, R., CAMPOS, I.C., CARMO, F.F., SILVINO, G., CASTRO, K.J.S.X., MAURO, M.L., RODRIGUES, N.U.A., MIRANDA, M.P.S, PINTO, C.E.F., 2017. Fundão tailings dam failures: the environment tragedy of the largest technological disaster of Brazilian mining in global context. Perspect Ecol Conserv. 15, 145-51. https://doi.org/10.1016/J.PECON.2017.06.002

CHIBOWSKI, E., 2011. Flocculation and Dispersion Phenomena in Soils. p. 301-4. https://doi.org/10.1007/978-90-481-3585-1_59

CORNELL, R.M., SCHWERTMANN, U., 2003. The Iron Oxides: structure, properties, reactions, occurrences and uses. 2nd ed. Weinheim, Germany: Wiley-VHC Verlag GmbH and Co. KGaA.

COSTA, P.G., MARUBE, L.C., ARTIFON, V., ESCARRONE, A.L., HERNANDES, J.C., ZEBRAL, Y.D., BIANCHINI, A., 2022 Temporal and spatial variations in metals and arsenic contamination in water, sediment and biota of freshwater, marine and coastal environments after the Fundão dam failure. Science of The Total Environment 806, 151340. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2021.151340

DAVILA, R.B., FONTES, M.P.F., PACHECO, A.A., FERREIRA, M.S., 2020. Heavy metals in iron ore tailings and floodplain soils affected by the Samarco dam collapse in Brazil. Science of The Total Environment 709, 136151. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.136151

DEARING, J., 1999. Environmental Magnetic Susceptibility. Using the Bartington MS2 system, 2nd edition. ed. Chi Publishing, Kenilworth, UK.

DU LAING, G., RINKLEBE, J., VANDECASTEELE, B., MEERS, E., TACK, F.M.G., 2009. Trace metal behaviour in estuarine and riverine floodplain soils and sediments: A review. Science of The Total Environment 407, 3972-85. https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2008.07.025

DUARTE, E.B., NEVES, M.A., DE OLIVEIRA, F.B., MARTINS, M.E., DE OLIVEIRA, C.H.R., BURAK, D.L., ORLANDO, M.T.D.A., RANGEL, C.V.G.T., 2021. Trace metals in rio Doce sediments before and after the collapse of the Fundão iron ore tailing dam, Southeastern Brazil. Chemosphere 262, 127879. https://doi.org/10.1016/J.CHEMOSPHERE.2020.127879

GARCIA, J.M., MANTOVANI, P., GOMES, R.C., LONGO, R.M., DEMANBORO, A.C., BETTINE, S.C., 2018. Degradação ambiental e qualidade da água em nascentes de rios urbanos. Sociedade & Natureza 30, 228–254. http://dx.doi.org/10.14393/SN-v30n1-2018-10

GARCÍA-GAMERO, V., VANWALLEGHEM, T., PEÑA, A., ROMÁN-SÁNCHEZ, A., FINKE, P.A., 2022. Modelling the effect of catena position and hydrology on soil chemical weathering. SOIL 8, 319–335. https://doi.org/10.5194/SOIL-8-319-2022

GOMES, L.E.O., CORREA, L.B., SÁ, F., NETO, R.R., BERNARDINO, A.F., 2017. The impacts of the Samarco mine tailing spill on the rio Doce estuary, Eastern Brazil. Marine Pollution Bulletin 120, 28–36. https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2017.04.056

KIRK G., 2004. The biogeochemistry of submerged soils.

MARTA-ALMEIDA, M., MENDES, R., AMORIM, F.N., CIRANO, M., DIAS, J.M., 2016. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. Mar Pollut Bull 112, 359-64. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.07.039

MCBRIDE, M.B., 2018. Surface Chemistry of Soil Minerals. Minerals in Soil Environments 35–88. https://doi.org/10.2136/SSSABOOKSER1.2ED.C2

MCKEAGUE, J.A., DAY, J.H., 1966. Dithionite and oxalate-extractable Fe and Al as aids in differentiating various classes of soils. Canadian Journal of Soil Science 46, 13–22.

MEHRA, J.P., JACKSON, M.L., 1960. Iron oxides removal from soils and clays by a dithionite-citrate-bicarbonate system buffered with bicarbonate sodium. Clays and Clay Minerals 7, 317–27.

MELO, V. F. D.; NOVAIS, R. F.; SCHAEFER, C.; FONTES, M.; SINGH, B. Mineralogia das frações areia, silte e argila de sedimentos do grupo Barreiras no município de Aracruz, estado do Espírito Santo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, v. 26, p. 29-41, 2002.

MINCRYST. Crystallographic and Crystallochemical Database for Minerals and their Structural Analogues. Disponível em: <http://database.iem.ac.ru/mincryst/>. Acesso em: 04 abr. 2024.

MISSANA, T.; ALONSO, U.; GARCÍA-GUTIÉRREZ, M. Evaluation of component additive modelling approach for europium adsorption on 2:1 clays: Experimental, thermodynamic databases, and models. *Chemosphere*, v. 272, p. 129877, 2021.

NUNES, F.C., SILVA, E.F., VILAS BOAS, G.S., 2011. Grupo Barreiras: Características, Gênese e Evidências de Neotectonismo. Rio de Janeiro.

ORLANDO, M.R.A., GALVÃO, E.S., CAVICHINI, A.A., RANGEL, C.V.G.T., ORLANDO, C.G.P., GRILO, C.F., SOARES, J., OLIVEIRA, K.S.S., SÁ, F., JUNIOR, A.C., BASTOS, A.C., QUARESMA, V.S., 2020. Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. Chermosphere 257, 127184. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2020.127184

PACHECO, A.A., 2015. Avaliação da contaminação em solos e sedimentos da bacia hidrográfica do rio Doce por metais pesados e sua relação com o fundo geoquímico natural. Tese (doutorado) – Universidade Federal de Viçosa. 184f.

PIRES, J.M.M., LENA, J.C. DE, MACHADO, C.C., PEREIRA, R.S., 2003. Polluting potential of Samarco Mineração S.A. solid waste: a Germano dam case study. Revista Árvore 27, 393-397. https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000300017

PONNAMPERUMA, F.N., 1984. Effects of Flooding on Soils. Flooding and Plant Growth. Elsevier, p. 9-45. https://doi.org/10.1016/b978-0-12-424120-6.50007-9

PUTZ. H., BRADENBURG, K., 2015. Match! -phase identification from powder diffraction. Crystal Impact Software.

QUEIROZ, H.M., YING, S.C., BERNARDINO, A.F., BARCELLOS, D., NÓBREGA, G.N., OTERO, X.L., FERREIRA, T.O., 2021. Role of Fe dynamic in release of metals at rio Doce estuary: Unfolding of a mining disaster. Mar Pollut Bull. 166, 112267. https://doi.org/10.1016/J.MARPOLBUL.2021.112267

QUEIROZ, H.M., NÓBREGA, G.N., FERREIRA, T.O., ALMEIDA, L.S., ROMERO, T.B., SANTAELLA, S.T., BERNARDINO, A.F., OTERO, X.L., 2018. The Samarco mine tailing disaster: A possible time-bomb for heavy metals contamination? Science of The Total Environment 637–638, 498–506. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.370

QUEIROZ, H.M., RUIZ, F., DENG, Y., SOUZA JÚNIOR, V.S., FERREIRA, A.D., OTERO, X.L., CAMÊLO, D.L., BERNARDINO, A.F., FERREIRA, T.O., 2022. Mine tailings in a redox-active Environment: Iron geochemistry and Potential environmental consequences. Science of The Total Environment 807, 151050. https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.151050

SCHAEFER, C.E.G.R., FABRIS, J.D., KER, J.C., 2008. Minerals in the clay fraction of Brazilian Latosols (Oxisols): a review. Clay Miner 43, 137–154. https://doi.org/10.1180/CLAYMIN.2008.043.1.11

SCHWERTMANN, U.; TAYLOR, R. M. Iron oxides. In: DIXON, J. B.; WEED, S. B. (Eds.). *Minerals in soil environments*. 2nd ed. Madison, WI: Soil Science Society of America, 1989. p. 379-438.

SEGURA, F.R., NUNES, E.A., PANIZ, F.P., PAULELLI, A.C.C., RODRIGUES, G.B., BRAGA, G.Ú.L., PEDREIRA FILHO, W.R., BARBOSA, F., CERCHIARO, G., SILVA, F.F., BATISTA, B.L., 2016. Potential risks of the residue from Samarco's mine dam burst (Bento Rodrigues, Brazil). Environmental Pollution 218, 813–825. https://doi.org/10.1016/j.envpol.2016.08.005

SHAHEEN, S.M., RINKLEBE, J., FROHNE, T., WHITE, J.R., DELAUNE, R.D., 2016. Redox effects on release kinetics of arsenic, cadmium, cobalt, and vanadium in Wax Lake Deltaic freshwater marsh soils. Chemosphere 150, 740-8. https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2015.12.043

VEPRASKAS, M.J., POLIZZOTTO, M., FAULKNER, S.P., 2016. Redox chemistry of hydric soils, in: Wetland Soils: Genesis, Hydrology, Landscapes, and Classification: Second Edition. CRC Press, pp. 105–132. https://doi.org/10.1201/b18996-9

VISSER, J.W., WOLFF, P.M., 1964. Absolute intensities. Report 641.109. Technisch Physische Dienst, Delft, Netherlands.

YANG, D., LIU, J., ZHAO, W., HUANG, Q., XUE, L., YAN, C., LU, H., 2020. Iron mineralogy and speciation of sediment iron-bearing minerals in mangrove forest: Case study of Zhangjiang estuary, China. Marine Pollution Bulletin 151, 110800. https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2019.110800

YOUNG, R.A., 1995. The Rietveld Method. I. U. C. Oxford University Press Inc., New York, 298 p.