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

Material Suplementar Ambiente Marinho

Tema: Sedimentação Marinha

RT-55/OUT 26

RA2025 PMBA/FEST-UFES

Vitória,

Outubro de 2026

EQUIPE TÉCNICA

Prof. Alex Cardoso Bastos (coordenador)

Profa. Valéria Quaresma

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Anita Gomes Ruschi

Arthur Sant'Ana Cavichini

Flávia Acypreste Alfredo Garonce

Jordan Syllas Saraiva Leite

Lara Ferreira Peçanha

Livia Rodrigues Garcez

Lorena Ferreira Monteiro

SUMÁRIO

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL 4

2 METODOLOGIA 4

2.1 COLETA 5

2.1.1 Sedimentologia (Marinho Integrado) 5

2.2 ANÁLISE 5

2.2.1 Análise de Material Particulado em Suspensão (MPS) 5

2.2.2 Análise de sedimento superficial de fundo 6

2.2.3 Análise de densidade 6

2.2.4 Análise de mobilidade do fundo 6

2.2.5 Análise mineralógica do sedimento superficial 7

2.2.6 Análise estatística 8

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS 9

2.4 ALTERAÇÕES NA MALHA/FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADOS EM OUTUBRO DE 2024: SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES. 9

3 RESULTADOS DOS INDICADORES 10

3.1 MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA (% MO) 12

3.2 POTENCIAL DE MOBILIDADE DO SEDIMENTO SUPERFICIAL DE FUNDO 37

3.3 VALORES DE IMS (*IRON MINERALOGICAL SET*) E PRESENÇA DO SINAL DE REJEITO NO SEDIMENTO DE FUNDO 45

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO A CERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO 57

5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS 61

6 REFERÊNCIAS 61

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

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

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

Segue o detalhamento temporal, como forma de esclarecer a execução dentro dos marcos históricos: "Ano 1" (setembro de 2018 e setembro de 2019); "Transição" (outubro de 2019 e julho de 2020); "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.

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

2.1.1 Sedimentologia (Marinho Integrado)

Para as análises realizadas por esse Tema, são coletadas amostras de água, de sedimento superficial de fundo e de densidade do sedimento superficial.

As amostras de água são coletadas em 3 profundidades da coluna d'água, por meio de garrafas de Van Dorn acopladas um rack de amostragem. Amostras de superfície são coletadas entre 15 e 30 cm de profundidade; amostras do meio da coluna d'água são coletadas na profundidade média de cada estação; e amostras do fundo da coluna d'água são coletadas a cerca de 1 m acima do fundo. Para cada profundidade, 1 L de água é amostrada. A água coletada é armazenada em garrafas de plástico de 1 L, devidamente limpas e identificadas, e acondicionadas sob refrigeração (≈ 4 °C) e ao abrigo da luz até análise do material particulado em suspensão no laboratório.

As coletas de sedimento superficial são realizadas com um amostrador busca fundo do tipo Van Veen. Quando as amostras coletadas se apresentam lamosas, uma alíquota de 10 ml para a análise de densidade do sedimento superficial (primeiro centímetro do pacote) é subamostrada. As amostras de sedimento e de densidade são acondicionadas sob refrigeração (≈ 4 °C) e ao abrigo da luz até análise em laboratório para evitar produção de matéria orgânica.

Os resultados dos indicadores Material Particulado em Suspensão (MPS), mobilidade do sedimento de fundo e Valores de IMS (Iron Mineralogical Set) e Presença do sinal de rejeito no sedimento de fundo, estão apresentados de forma setorizada, considerando as similaridades hidrodinâmicas e sedimentológicas entre as estações e, do Setor de menor latitude (Abrolhos) para o de maior latitude (Sul). As estações amostrais na foz do rio Doce e na APA Costa das Algas foram ainda subdivididas para a apresentação dos dados, também baseadas na similaridade hidrodinâmica e depósito sedimentar.

2.2 ANÁLISE

2.2.1 Análise de Material Particulado em Suspensão (MPS)

O processo de filtragem das amostras de água é realizado em filtros de fibra de vidro de 47 mm de diâmetro e 0,45µm de diâmetro, previamente secos em estufa à 40°C por 24h, para determinação de seu peso original. Após a filtragem das amostras, os filtros são novamente levados à estufa à 40°C por 48h e pesados para a determinação do peso do MPS retido. A concentração do MPS é calculada através da diferença entre o peso do filtro antes e após a filtração, corrigido pelo volume filtrado de cada amostra (Mitchell *et al.*, 2017). Após a determinação do MPS, os filtros seguem para queima da matéria orgânica por combustão em mufla à 450°C por 4h (Mook e Hoskin, 1982) para a determinação do teor de matéria orgânica (MO) do MPS.

2.2.2 Análise de sedimento superficial de fundo

As amostras sedimentares (amostras superficiais) foram lavadas até a completa remoção de sal e depois foram secas em estufa à 40°C para aquisição do peso seco. A separação das frações grossas e finas foi realizada através do método de separação via úmida pela lavagem do sedimento com água destilada em uma peneira de malha com abertura de 63 µm. O sedimento que passa pela peneira é a fração fina (ou lama) enquanto o retido é a fração mais grossa (areia e cascalho) (Dias, 2004).

A determinação da granulometria das frações arenosas (> 63 µm) foi realizada pelo método de peneiramento via seca com peneiras intercaladas por malhas com abertura de 0,5 em 0,5 phi. Para as frações lamosas (< 63 µm) a granulometria foi determinada por um analisador de partículas a laser (*Malvern Mastersizer* 2000), também de 0,5 em 0,5 phi, após queima da matéria orgânica com peróxido de hidrogênio para evitar floculação e alteração da granulometria durante a análise. O parâmetro granulométrico utilizado foi o diâmetro médio do grão (D50) e foi calculado pelo software Gradistat 8.0 (Blott e Pye, 2001) versão para Excel 2007-2010.

O teor de matéria orgânica do sedimento foi determinado pelo método de combustão em mufla à 450°C por 4h (Mook e Hoskin, 1982). O teor de carbonato de cálcio ($CaCO_3$) foi determinado a partir da queima com ácido clorídrico (30%) (Dias, 2004; Komada *et al.*, 2008; Quaresma *et al.*, 2015). Para a descrição ao longo do texto foram utilizadas as médias com os respectivos desvios padrão para dados de teores de cascalho, areia, lama, $CaCO_3$ e MO do sedimento superficial.

2.2.3 Análise de densidade

A amostragem foi feita de forma a coletar apenas a camada superficial de lama do pacote sedimentar, já que esta metodologia é aplicada apenas para sedimento lamoso. Quando o sedimento coletado pelas dragas se apresenta arenoso, a amostragem para esta análise não é realizada. Após coleta, as amostras são acondicionadas em recipientes de 10mL, previamente pesados em balança de precisão (4 casas decimais), e mantidas resfriadas até chegada ao laboratório. Em laboratório os recipientes são pesados para obtenção do peso úmido e, então, levados à estufa à 40°C por 48h ou até a amostra estar completamente seca. Após essa etapa os recipientes contendo as amostras, já secas, são novamente pesados. Para a determinação da densidade do sedimento superficial de fundo, foi utilizado o método descrito por Amos e Sutherland, (1994) e Soulsby, (1997), onde a densidade é igual a massa úmida pelo volume da mesma. Os dados foram apresentados sob a forma de densidade e em kg/m^3. Para a apresentação gráfica, uma linha vermelha foi inserida onde delimita valores abaixo de 1200 kg/m^3, os quais indicam a presença de lama fluida (McAnally *et al.*, 2007; Winterwerp e Kersteren, 2004). Estações que não apresentaram dados foram decorrentes da ausência de lama no sedimento.

2.2.4 Análise de mobilidade do fundo

A mobilidade do sedimento de fundo foi avaliada para os setores Norte, Foz Norte, Foz Central e Foz Sul. Eventos de mobilidade, para cada mês, foram contabilizados sempre que a tensão de cisalhamento

de fundo foi maior que a tensão crítica de ressuspensão local. O cálculo do percentual de mobilidade seguiu a seguinte metodologia:

1) Primeiramente, a Tensão crítica de ressuspensão média mensal para cada setor, calculada a partir da equação de Mitchener e Torfs (1996); 0,015*(densidade úmida - 1000)^{0,73}. Para o cálculo foram considerados somente os dados de densidade coletados durante o PMBA/Fest-UFES.

2) Para cada medida horária de corrente próxima ao fundo, a tensão de cisalhamento de fundo foi calculada. O cálculo da tensão de cisalhamento de fundo foi feito através da equação de Reynolds (τ= -ρ<u^' w^'>), e utilizou os dados do ADCP 4 para o setor Norte e dados do ADCP 3 (ambos ADCPs vinculados ao Ambiente Marinho - Tema - Modelagem Numérica) para os setores Foz Norte, Foz Central e Foz Sul.

3) Para cada mês, a tensão de cisalhamento de fundo horária foi comparada à tensão crítica de ressuspensão mensal, e então foi calculada a porcentagem de tempo em que houve evento de mobilidade ao longo do mês.

2.2.5 Análise mineralógica do sedimento superficial

As análises mineralógicas foram realizadas nas frações lamosas (tamanho do grão < 0,63 μm), após peneiramento via úmida dos sedimentos de fundo (metodologia de separação descrita no Item 2.2.2). O limite de detecção é relacionado ao sinal/ruído das amostras quando lidas pelo difratômetro. Dessa forma, o limite de detecção de medidas mais simples é de 2.5% e nas mais apuradas é de 0.5%. No protocolo de análises laboratoriais estabelecido, após 2 horas no difratômetro, os resultados são comparados aos resultados obtidos nas análises de anos anteriores. Uma vez confirmados os resultados, as amostras seguem para análise de susceptibilidade magnética.

O procedimento analítico interpretativo das fases minerais na difratometria de Raios-X, têm como fontes principalmente fichas e bases minerais existentes na literatura e WEB, a principal base de dados utilizadas é a COD – Crystallography Open Database (Grazulis *et al.*, 2009) onde são listados parâmetros relativos aos distanciamentos dentro dos retículos cristalinos, além das relações angulares e axiais em diferentes espécies minerais. Neste sentido, o volume relativo de fases minerais percentualmente pode ser verificado através de uma análise semiquantitativa da forma e intensidade dos picos apresentados na medida de difração e comparadas as intensidades apresentadas nas fichas cristalográficas dos minerais.

Seguindo a convenção usual para representação geoquímica elementar de rochas e sedimentos (Rollinson, 1993), os elementos nos resultados das análises de fluorescência de raios-X estão expressos em óxidos e recalculados para 100% em peso em base anidra. O ferro total está expresso em FeO total. São considerados minerais essenciais aqueles que são superiores a 10%. Os minerais são aqueles que possuem teores menores de 10% e maiores que 1%. Os minerais que apresentam teores < 1% são considerados traço.

O erro máximo encontrado até o momento através desta técnica é de ± 5% em volume. A química por fluorescência de raios-X complementa as informações da difração, fornecendo os principais constituintes químicos presentes em porcentagem em peso e partes por milhão (ppm), além de parâmetros quantitativos ao longo do tempo. A montagem que realiza a medida da susceptibilidade magnética ac (χac) foi totalmente construída na UFES, onde a precisão de configuração é de 1 ppm.

Os resultados foram ratificados pelas medições de susceptibilidade magnética nas fases minerais que contém ferro (principalmente óxidos e hidróxidos). Os dados adquiridos em amostras prévias ao rompimento da barragem (2012) foram utilizados como amostras controle para fins de comparação, nomeadas de valor de referência.

A verificação da presença do Material Ligado ao Desastre (MLD) da Barragem de Fundão em sedimentos marinhos foi realizada através do reconhecimento do aumento relativo total de fases minerais como hematita, goethita, grenalita-T, maghemita e magnetita, as quais representam óxidos de ferro e silicatos contendo ferro das amostras analisadas (suíte de minerais com ferro), comparativamente aos dados de amostras anteriores ao rompimento da barragem (Orlando *et al.*, 2020). Da mesma forma, verificou-se aumentos nas susceptibilidades magnéticas totais e nas quantidades totais de ferro (FeO_{total}). Para caracterização da química mineral foram considerados como parâmetro o ferro total (FeO_{total}), a alumínio ($Al2O3$), a sílica ($SiO2$) e o cálcio (CaO) por representarem os principais componentes presentes nas fases minerais encontradas nas amostras identificadas.

A presença/ausência do sinal do rejeito da Barragem de Fundão em sedimentos marinhos é avaliada a partir da razão entre o valor de susceptibilidade magnética medida nas amostras ao longo do Monitoramento e o valor de referência, conforme Orlando *et al.* (2020). A presença do sinal do rejeito da Barragem de Fundão é estabelecida quando ocorre um aumento de 20% (1,2 vezes) em relação ao valor de referência, como explicado por Orlando *et al.* (2020).

Quanto ao indicador IMS (*Iron Mineralogical Set*) foi com base na técnica de SRXRD que se determinou a presença de conjunto mineralógico de ferro (IMS) que tem a assinatura mineralógica da fonte e sua abundância relativa; e o conjunto mineralógico de carbonatos, silicatos, hidróxido de alumínio e outros minerais não ferrosos (CSMS). Assim, O IMS (%) é o marcador da presença de rejeito de minério de ferro no sedimento.

As análises aqui descritas foram realizadas no laboratório de Nanometria Fotônica da UFES.

2.2.6 Análise estatística

Foi realizado o Teste de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975) para determinar se as séries de dados possuem tendência temporal de alteração estatisticamente significativa (p-valor < 0,05), utilizando o software PAST - Palaeontological Statistics. Por tratar-se de um método não paramétrico, ele não requer distribuição normal dos dados (Yue *et al.*, 2002).

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

A partir do Ano 2, a análise de susceptibilidade magnética passou a integrar as análises mineralógicas. Nesse mesmo período, o equipamento LISST (Laser In-Situ Scattering and Transmissometry), utilizado para medir concentração e diâmetro de partículas em suspensão) deixou de ser empregado.

A partir da campanha de agosto/2022 (Ano 4) onde iniciou-se o Novo Ciclo, ocorreram outras alterações metodológicas relevantes:

- As amostras de sedimento de fundo destinadas às análises de granulometria do Tema Bentos de Fundos Inconsolidados deixaram de ser coletadas e analisadas nesse âmbito;
- Os Temas Sedimentologia e Mapeamento de Habitats passaram a ser tratados conjuntamente sob a nomenclatura Sedimentação Marinha;
- A coleta e análise de testemunhos foi retirada do escopo do projeto, uma vez que as análises realizadas até então já evidenciaram o acúmulo de MLD nos diferentes pontos de coleta (conforme apresentado neste material suplementar). O monitoramento da presença ou ausência de MLD permanece sendo realizado no sedimento superficial.

2.4 ALTERAÇÕES NA MALHA/FREQUÊNCIA AMOSTRAL E ESCOPO REALIZADOS EM OUTUBRO DE 2024: SUAS CONSEQUÊNCIAS NAS ANÁLISES DA SÉRIE HISTÓRICA DE INDICADORES.

Ainda conforme mencionado no item 1, no âmbito da Deliberação CIF nº 803, de 08 de agosto de 2024, o Tema de Sedimentação Marinha passou por uma alteração com a exclusão da macroatividade de Mapeamento de Habitat. Com isso, todas as seções do relatório relacionadas a essa macroatividade estarão suprimidas, incluindo metodologia, resultados e considerações finais.

O tema mapeamento de habitats foi planejado para atender a necessidade de ampliar o conhecimento sobre a fundo marinho potencialmente afetado pelo material ligado ao desastre, sendo seus produtos e resultados utilizados pelos demais temas como base para caracterização do ambiente. Este indicador era responsável por apontar a distribuição, estrutura e integridade de habitats no fundo marinho, principalmente a extensão de substratos rígidos e tridimensionais, que ao longo do monitoramento, mostrou regiões vulneráveis na plataforma, como os fundos de rodolitos e bioconstruções nas regiões APA/Rio Doce.

A continuidade do mapeamento foi retirada por decisão da CTBio, já que o mapeamento de habitats não necessariamente tinha indicadores diretos sobre o nexo causal, mas sustentava uma base ecossistêmica que nenhum outro tema do PMBA/Fest-UFES realiza. A decisão foi por um critério estabelecido, e não porque o mapeamento não deu resultado. O mapeamento gerou uma base de dados inédita como mapeamento de mais de mil estruturas recifais ao largo de São Mateus, mapeou pela primeira vez estruturas lineares como bancos transversais na foz do rio Doce, sendo que muitos desses bancos suportam fundos de rodolitos, mapeou 100% o fundo da APA Costa das Algas,

mostrando a paisagem submarina, a importância dos canais como habitats mais profundos na plataforma e o extenso banco de rodolitos. Na APA, foi ainda mapeado pela primeira vez mais de 2000 depressões circulares que suportam uma alta biodiversidade que não vem sendo estudada pelo PMBA/Fest-UFES ou por outros pesquisadores. Da mesma maneira, a morfologia do fundo adjacente à foz do rio Doce mostrou uma série de feições erosivas que indicam claramente que o material depositado pode ser transportado em direção offshore.

Considerando uma abordagem de gestão baseada no ecossistema, o principal impacto da interrupção do mapeamento de habitats é a ausência do conhecimento sobre o fundo marinho, o que prejudica a implementação de ações voltadas aos ambientes mais vulneráveis. O conhecimento em alta resolução dos habitats é importante para entender o potencial risco e vulnerabilidade da paisagem submarina, tais como padrões de distribuição de regiões vulneráveis em termos de estruturas recifais e presença de rodolitos ao longo da região estudada. O grande prejuízo é o mapeamento da área adjacente à Degredo e em direção norte, justamente uma área onde há um alto impacto ambiental, tanto que o tema Marinho Integrado aumentou sua amostragem. Os habitats marinhos nesta região ainda não foram mapeados em alta resolução, logo essa interrupção é uma perda significativa para o entendimento da paisagem submarina e a biodiversidade associada.

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.

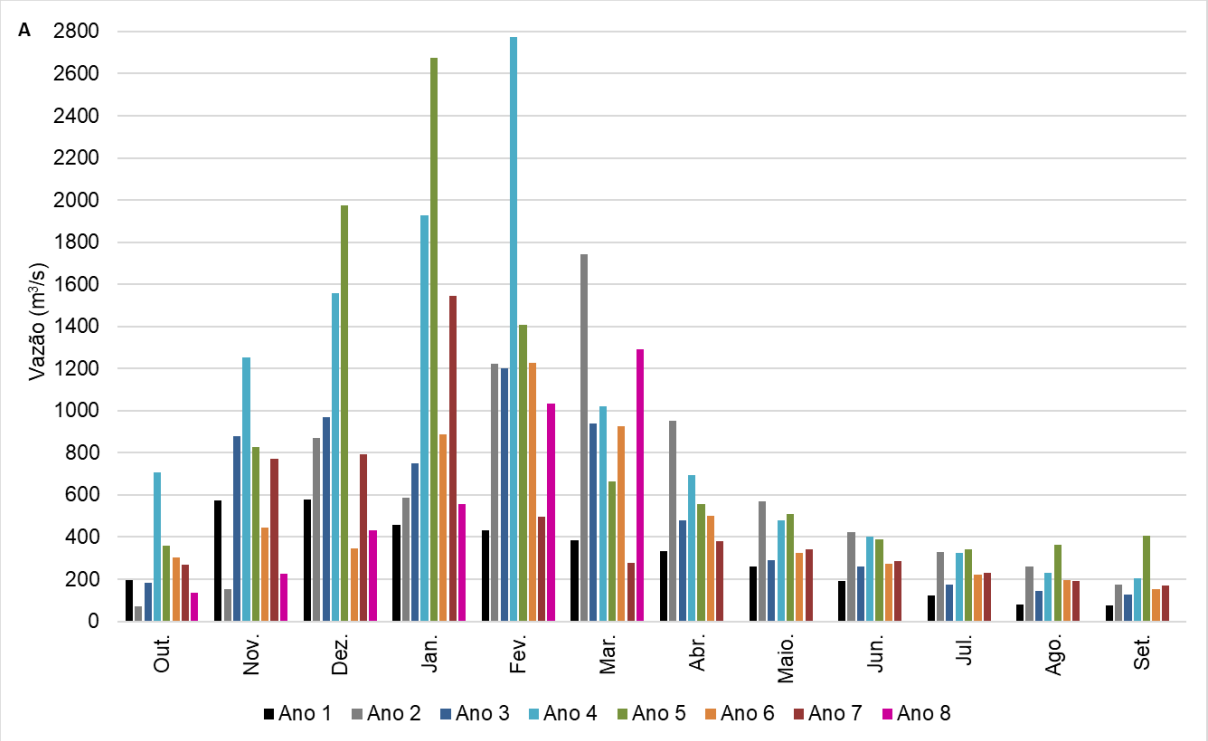
Para o presente relatório, vale considerar que, durante a campanha amostral de abril de 2025, foi registrada atividade contínua de transporte e disposição de material dragado entre o canal de acesso da Portocel e uma área de despejo situada a aproximadamente 360 m da estação SDS19. Diante da possibilidade de interferência sobre as condições ambientais e os resultados do monitoramento, a FEST encaminhou ao IEMA o Ofício CE GP nº 173/2025 (05 de agosto de 2025), sendo respondida por meio do Ofício nº 056/2025-DT/IEMA (27 de agosto de 2025), que confirmou o histórico de utilização da região para atividades de dragagem e disposição de sedimentos desde o ano 2000. Posteriormente,

no Ofício CE GP nº 24/2026 (20 de março de 2026), a FEST oficializou as alterações relevantes encontradas nos resultados da estação SDS19.

Considerando o comportamento discrepante observado nos resultados da estação SDS19, a possível influência das atividades de dragagem e a necessidade de garantir um tratamento homogêneo entre os Temas do Ambiente Marinho do PMBA/Fest-UFES, cujos resultados também contemplam essa estação, a Coordenação do Ambiente Marinho deliberou pela desconsideração dos dados da SDS19 obtidos a partir de abril de 2025 no RA2025. Essa medida visa preservar a consistência metodológica e a comparabilidade das análises.

3.1 MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO (MPS) E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA (% MO)

Figura 1: **(A)** Vazões medianas mensais (m^3/s) do rio Doce. **(B)** Carga de sedimento em suspensão total mensal (QSS - ton/mês) do rio Doce. Os dados foram coletados na estação P21 em Linhares (Ambiente Dulcícola - PMBA/Fest-UFES) e representam o período do Ano 1 (barra preta; outubro de 2018 a setembro de 2019), do Ano 2 (barra cinza; outubro de 2019 a setembro de 2020), do Ano 3 (barra azul escuro; outubro de 2020 a setembro de 2021), Ano 4 (barra azul; outubro de 2021 a setembro de 2022), do Ano 5 (barra verde; outubro de 2022 a setembro de 2023, do Ano 6 (barra laranja; outubro de 2023 a setembro de 2024), do Ano 7 (barra vinho; outubro de 2024 a setembro de 2025) e do ano 8 (barra rosa; outubro de 2025 a janeiro de 2026) PMBA/Fest-UFES.



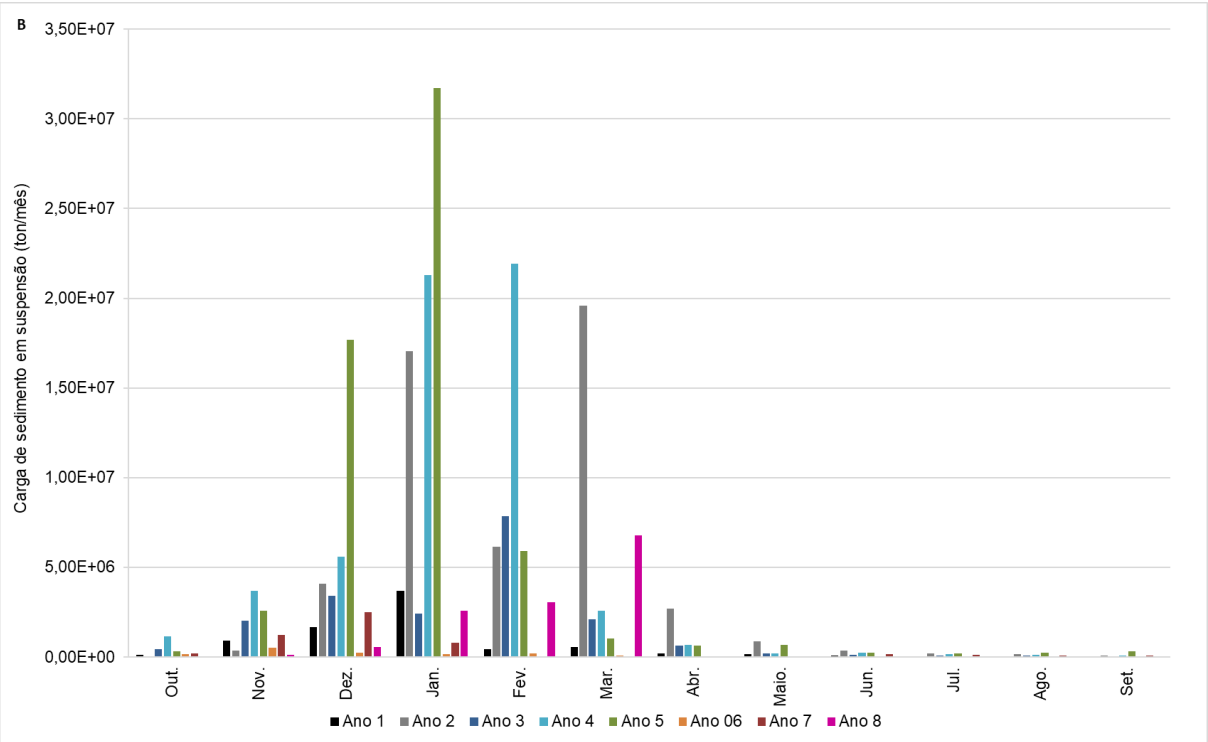


Figura 2: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS; caixas vermelhas) e teor de matéria orgânica (MO; caixas azuis) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Abrolhos. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022), e não ocorreram mais coletas para esse setor devido a uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais o setor.

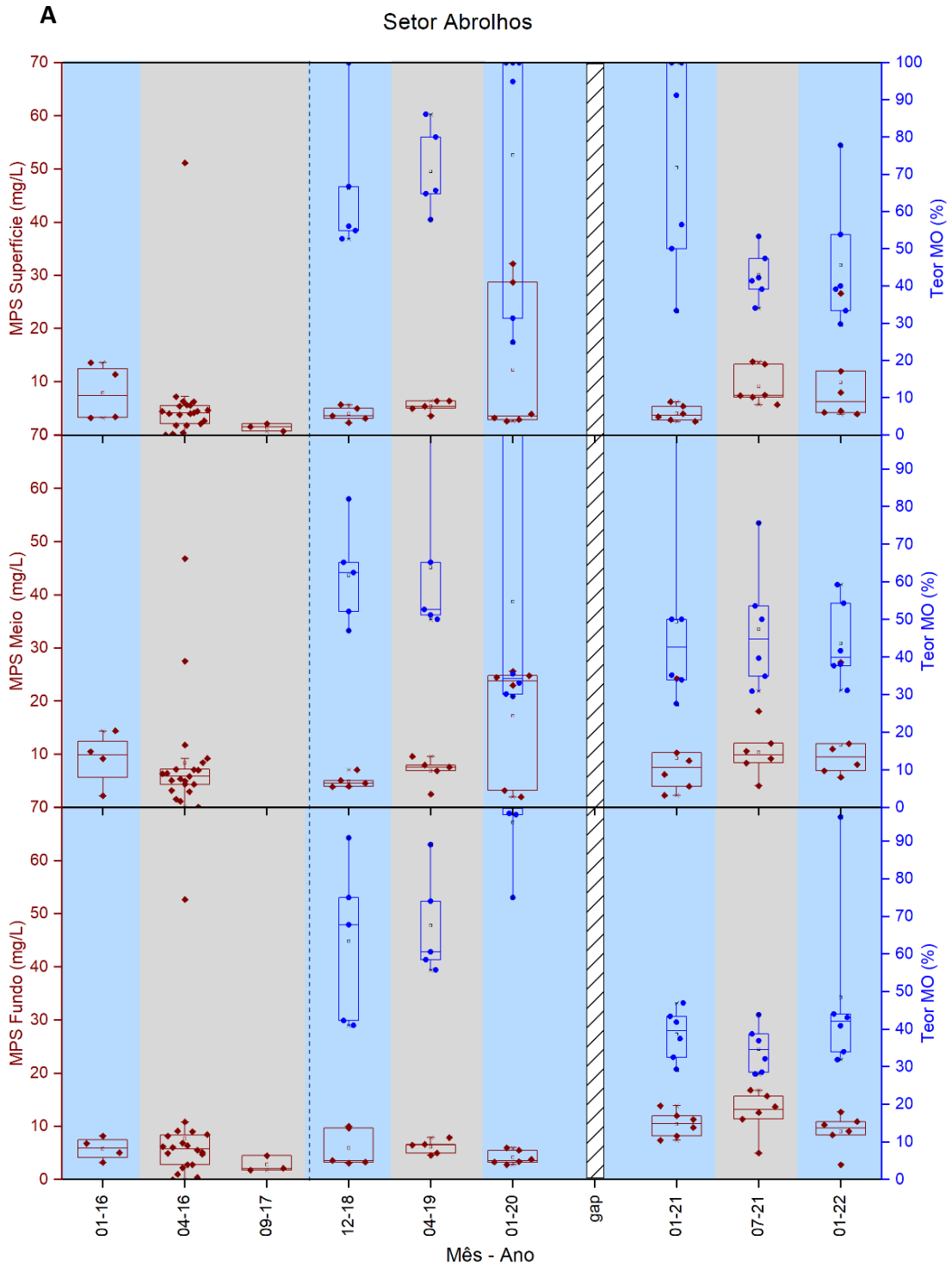
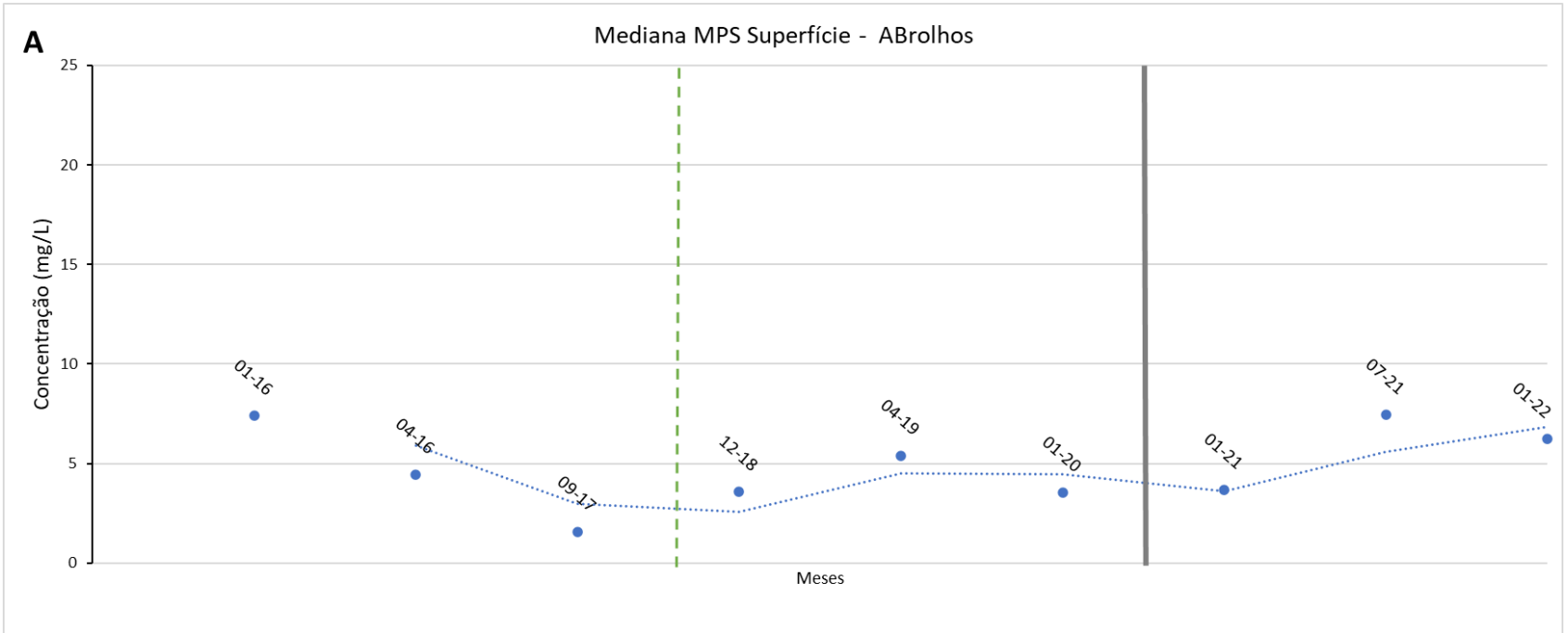


Figura 3: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Abrolhos. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Não ocorreram coletas para esse setor a partir de 01/22 devido a uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais o setor.



O Setor Abrolhos mostrou influência dos eventos hidrológicos dos rios que ali deságuam, assim o aumento das concentrações de MPS foi observado durante ou logo após chuvas de moderada a forte intensidade no centro – norte do Espírito Santo e sul da Bahia. A Figura 2 e a Figura 3 mostram que o Setor Abrolhos apresentou as maiores concentrações de MPS para as profundidades Superfície e Meio no Ano 2 e Ano 4, enquanto as maiores concentrações de MPS próximo ao fundo (Fundo) foram observados no Ano 3 (julho de 2021). As maiores concentrações de MPS na superfície e meio da coluna d'água no Ano 2 e 4 decorrem do fato dos meses mais chuvosos terem sido dezembro de 2019, janeiro 2020 (Ano 2), dezembro de 2021 e janeiro de 2022 (Ano 4), quando comparados aos meses de dezembro de 2018, janeiro de 2019 (Ano 1), dezembro de 2020 e janeiro de 2021 (Ano 3), para todo centro – norte do Espírito Santo e sul da Bahia.

Figura 4: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS; caixas vermelhas) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos vermelhos correspondem aos valores de cada estação amostral.

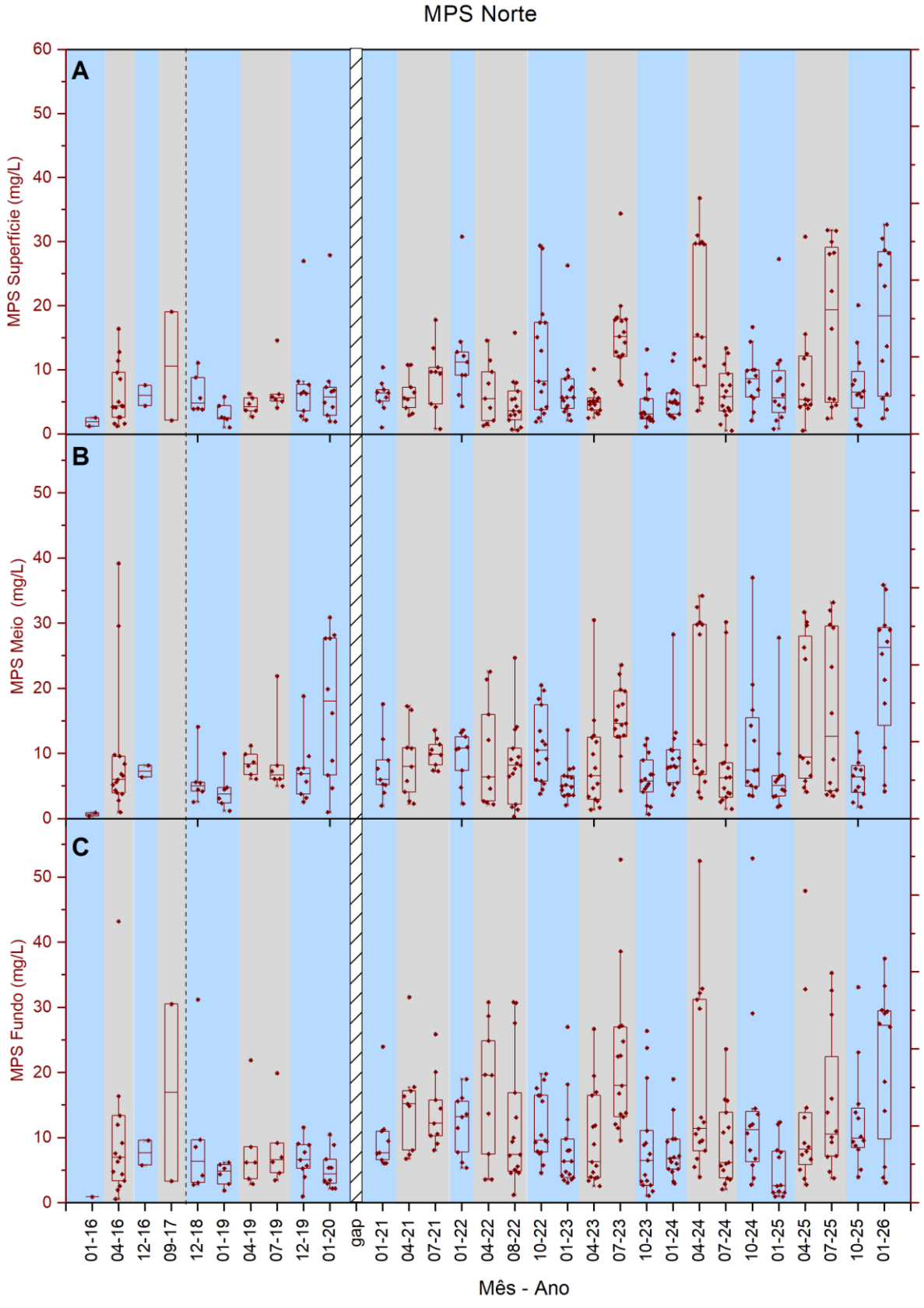


Figura 5: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na superfície (A), meio (B) e fundo (C), da coluna d'água para o Setor Norte. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

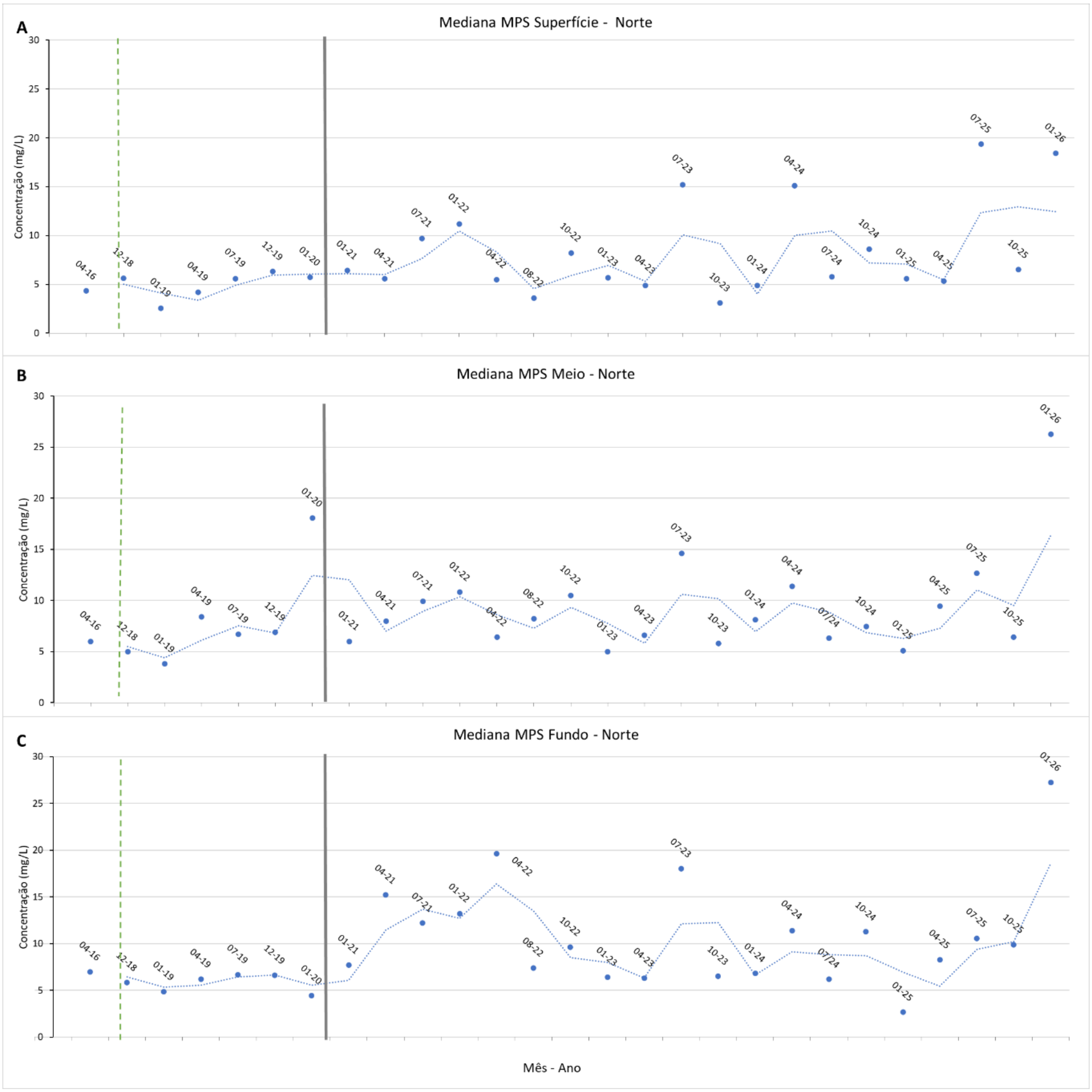
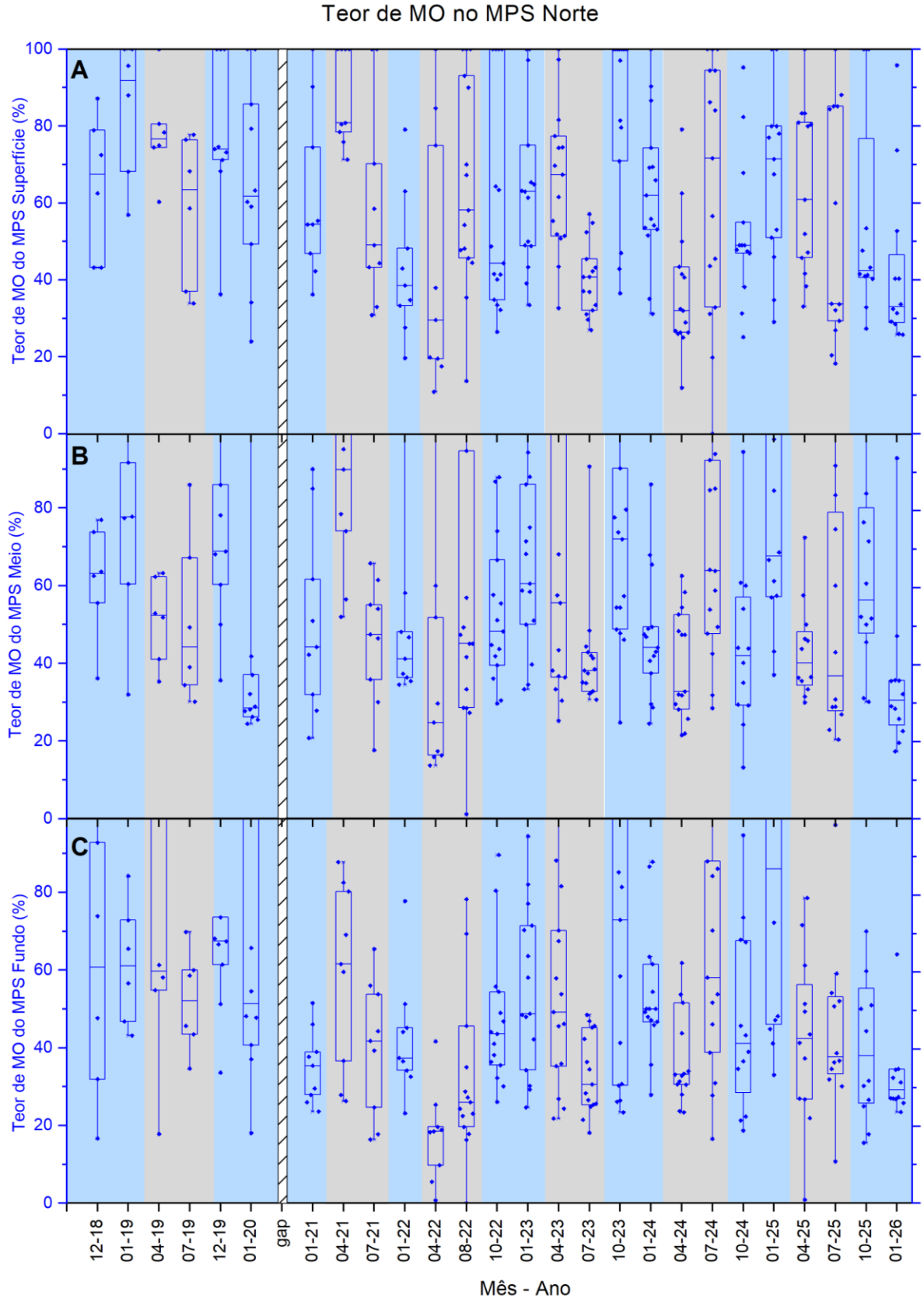


Figura 6: Teor de matéria orgânica (MO; caixas azuis) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos azuis correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.



Observou-se uma tendência crescente estatisticamente significativa do MPS no setor Norte (p-valor < 0,05). Assim como no Ano 5, no período seco do Ano 6 foram registradas concentrações de MPS superiores às do período chuvoso do mesmo ano, associadas à diminuição do teor de Matéria Orgânica (MO) no MPS (Figura 4). Seguindo o mesmo padrão observamos no período chuvoso do Ano 7 (coletas de outubro/2024 e janeiro/2025), concentrações de MPS inferiores às dos períodos secos dos Anos 5 e 6 associados a um aumento de teor de MO. Os valores superficiais de MPS foram superiores aos do período chuvoso do ano 6. Registrou-se elevação nas concentrações de MPS junto ao fundo em outubro/2024, contrastando com os valores obtidos durante os períodos chuvosos dos anos 5 e 6 (Figura 6).

O período seco do Ano 7 (coletas de abril e julho/2025) manteve o padrão observado nos demais períodos secos da série, caracterizado por concentrações de material particulado em suspensão (MPS) superiores às registradas no período chuvoso do mesmo ano. Esse comportamento esteve associado à redução dos teores de matéria orgânica no MPS, possivelmente relacionada à atuação de frentes frias durante o período seco. Destaca-se que, nas duas campanhas realizadas no período seco do Ano 7, houve registro da passagem de frentes frias poucos dias antes das coletas, o que pode ter intensificado a ressuspensão de sedimentos minerais e contribuído para a diminuição relativa da fração orgânica no material particulado em suspensão.

O período chuvoso do Ano 8 destacou-se pelo estabelecimento de novos máximos históricos de medianas das concentrações MPS, especialmente nas camadas mais profundas da coluna d'água (Figura 5). Na camada de fundo, o valor da mediana (27,3 mg/L) registrado em janeiro de 2026 representa a maior mediana de toda a série temporal do monitoramento, superando o máximo anterior de aproximadamente 19,4 mg/L observado no Ano 4 (abril/2022). De forma semelhante, na camada intermediária registrado em janeiro de 2026, o valor de 26,25 mg/L também configura o maior já registrado, ultrapassando o pico anterior de cerca de 18 mg/L no Ano 2 (janeiro/2020). Na superfície, embora o valor de 18 mg/L observado no Ano 8 seja elevado, ele não constitui o máximo da série, que foi registrado no período seco do Ano 7 (julho/2025), com aproximadamente 19 mg/L. Esses resultados indicam uma intensificação recente dos eventos de alta concentração de MPS, sobretudo nas camadas de meio e fundo, sugerindo alterações nos processos de ressuspensão e na dinâmica do sistema. Destaca-se que, antes das campanhas de outubro de 2025 e janeiro de 2026, foram registradas ondas superiores a 2 m, possivelmente contribuindo para o aumento da ressuspensão sedimentar (Dados obtidos do Fundeio 4 - ADCPs vinculados ao Ambiente Marinho - Tema: Modelagem Numérica / PMBA / Fest-UFES).

Figura 7: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Os limites superiores para os eixos Y são diferentes entre cada profundidade da coluna d'água e para parte da série de dados (dados em vermelho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

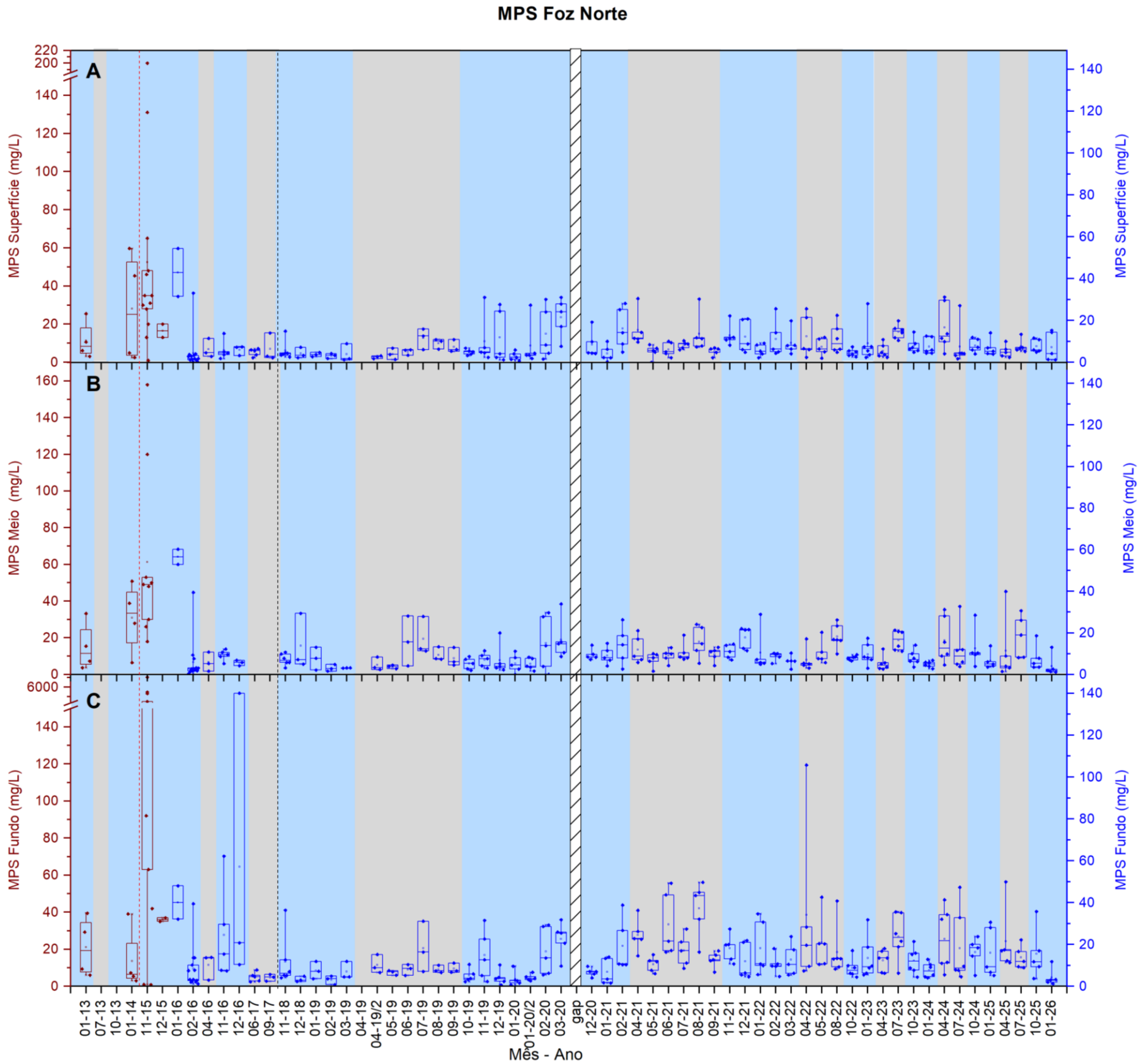


Figura 8: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo, da coluna d'água para o Setor Foz Norte desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

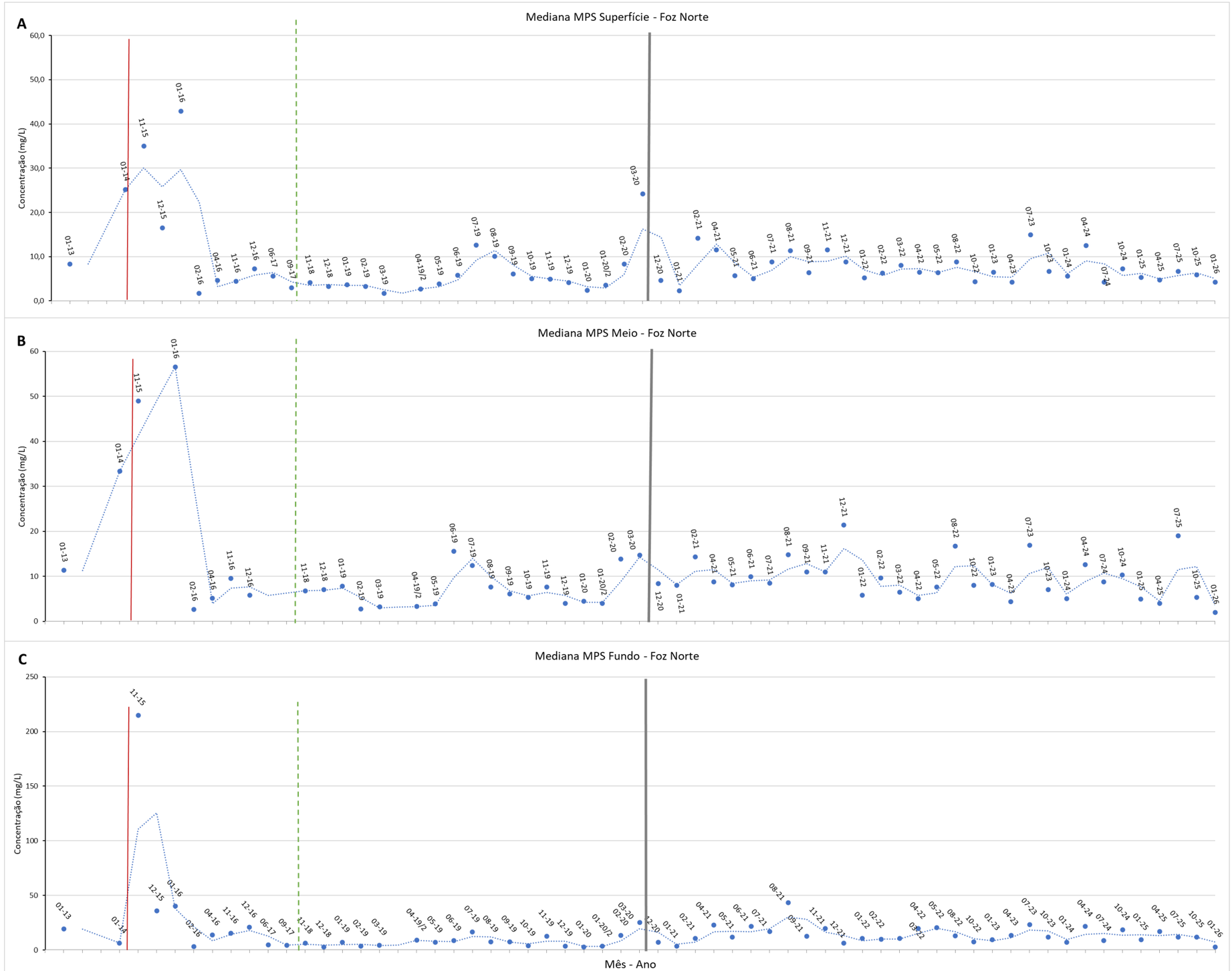
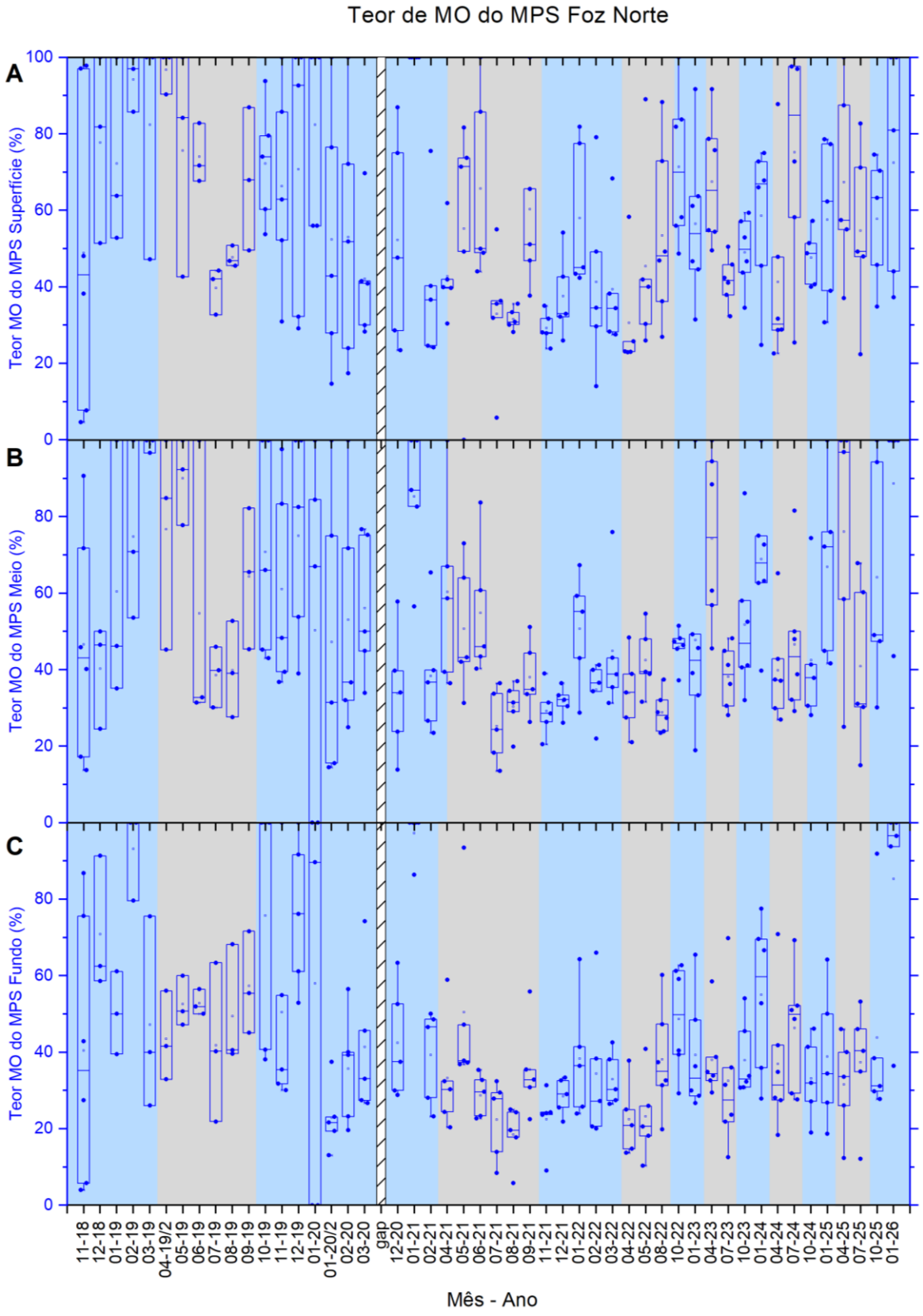


Figura 9: **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m acima do fundo) da coluna d'água para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.



As condições combinadas de vazão do rio Doce e os padrões de vento sobre a plataforma continental são fatores determinantes no comportamento espaço-temporal das concentrações de material particulado em suspensão (MPS) neste setor. O aumento na concentração de MPS associado a condições específicas de vento favorece a dispersão desse material na coluna d'água. Para a Foz Norte, essa dispersão ocorre predominantemente durante eventos de ventos provenientes do quadrante sul.

Conforme ilustrado na Figura 1, ao longo do PMBA/Fest-UFES, o comportamento da vazão do rio Doce apresentou uma tendência próxima à climatologia descrita por Oliveira e Quaresma (2017). Observou-se um aumento das vazões máximas diárias e da mediana mensal no período chuvoso, entre os meses de outubro e março, e uma redução no período seco, que ocorre de abril a setembro (Oliveira e Quaresma, 2017).

Dados pretéritos do setor Foz Norte indicam concentrações elevadas de MPS na superfície e meio em janeiro de 2014 (Figura 7), associadas à cheia histórica do rio Doce. Os demais valores de concentração de MPS permanecem dentro da variabilidade natural sazonal. Vale destacar que, em janeiro de 2014, as concentrações de MPS junto ao fundo apresentaram valores relativamente baixos, o que é característico em situações em que a maior parte do MPS é transportada nas camadas média e superficial da coluna d'água. Entretanto, após o rompimento da barragem e a chegada do material de lama de dragagem (MLD) na foz, durante um período de grande seca no rio Doce, observou-se uma alta concentração de MLD dispersa nas camadas mais profundas (Quaresma *et al.*, 2020).

Durante o PMBA/Fest-UFES, os maiores valores de vazão foram registrados em janeiro do Ano 2 (5179 m³/s) e em janeiro de 2022, no Ano 4 (5595 m³/s), dados obtidos da estação P21, em Linhares (Tema – Integração Fluvio-Estuarina/ PMBA/Fest-UFES). No setor Foz Norte observamos na camada superficial da coluna D'água baixos valores nas concentrações de Material Particulado em Suspensão (MPS) ao longo de todo monitoramento, e com discretos aumentos nos períodos secos (evidenciando que a dispersão de sedimentos ocorre predominantemente durante eventos de ventos provenientes do quadrante sul). Para as camadas intermediária e próximo ao fundo observamos o padrão sazonal de maiores valores de MPS nos períodos secos.

No Ano 6 (outubro de 2023 a setembro de 2024), as vazões fluviais apresentaram valores baixos, comparáveis às condições hidrológicas observadas no Ano 1 do monitoramento (Figura 1). Essa redução resultou nas menores cargas de sedimentos em suspensão já registradas ao longo do monitoramento. Contudo, no Ano 6, as concentrações de MPS foram mais elevadas (Figura 7) durante o período seco em comparação ao período chuvoso, especialmente na campanha de abril de 2024, associadas a uma redução no teor de matéria orgânica nesse período (Figura 9). Similar ao Ano 6, o período chuvoso do Ano 7 manteve vazões significativamente baixas. Na análise do material particulado em suspensão (MPS) no setor Foz Norte do rio Doce, observou-se que o período chuvoso do Ano 7 manteve concentrações similares às do Ano 6 nas camadas superficial e intermediária da coluna d'água. Contudo, registraram-se valores significativamente mais elevados no fundo.

Paralelamente, detectou-se uma redução no teor de MO na camada de fundo do Ano 7 (janeiro de 2025 com 30,6% de MO no MPS) em relação ao mesmo período do ano 6 (janeiro de 2024 com 66,6% de MO no MPS).

O padrão sazonal caracterizado por maiores concentrações no período seco (associado a frentes frias e eventos meteo-oceanográficos) permaneceu evidente. Entretanto, as medianas do período chuvoso do Ano 7 superaram as do Ano 6 em toda a coluna d'água (superfície, meio e fundo).

O período seco (abril e julho/2025), observou-se vazão reduzida, similar à dos Anos 1 e 6, e valores de mediana de MPS inferiores aos do Ano 6. Em abril/2025, foram registradas medianas de MPS inferiores às observadas no mesmo período do ano anterior, associadas ao maior teor de MO. Em julho de 2025, observou-se uma inversão no perfil vertical da coluna d'água, com a camada intermediária apresentando mediana de MPS superior à do fundo (Figura 8). Esse comportamento está associado à ressuspensão induzida por ondas do quadrante sul, que promovem o transporte do material particulado da foz em direção ao norte. Destaca-se que, nos dias que antecederam a coleta, foram registradas ondas desse quadrante com alturas superiores a 2 metros, reforçando a influência dos forçantes meteo-oceanográficas no padrão observado (Dados obtidos do Fundeio 3 - ADCPs vinculados ao Ambiente Marinho - Tema: Modelagem Numérica / PMBA / Fest-UFES).

No Ano 8, as coletas de outubro/2025 e janeiro/2026 revelaram um período chuvoso caracterizado por concentrações reduzidas de MPS, em níveis comparáveis aos observados nos períodos chuvosos dos Anos 1 e 2.

As concentrações de MPS no Setor Foz Norte (Figura 7), para todas as profundidades, apresentaram tendência de aumento significativo (p-valor < 0,05) ao longo do período do monitoramento.

Figura 10: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Os limites superiores para os eixos Y são diferentes para cada profundidade da coluna d'água e para parte da série de dados (dados em vermelho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

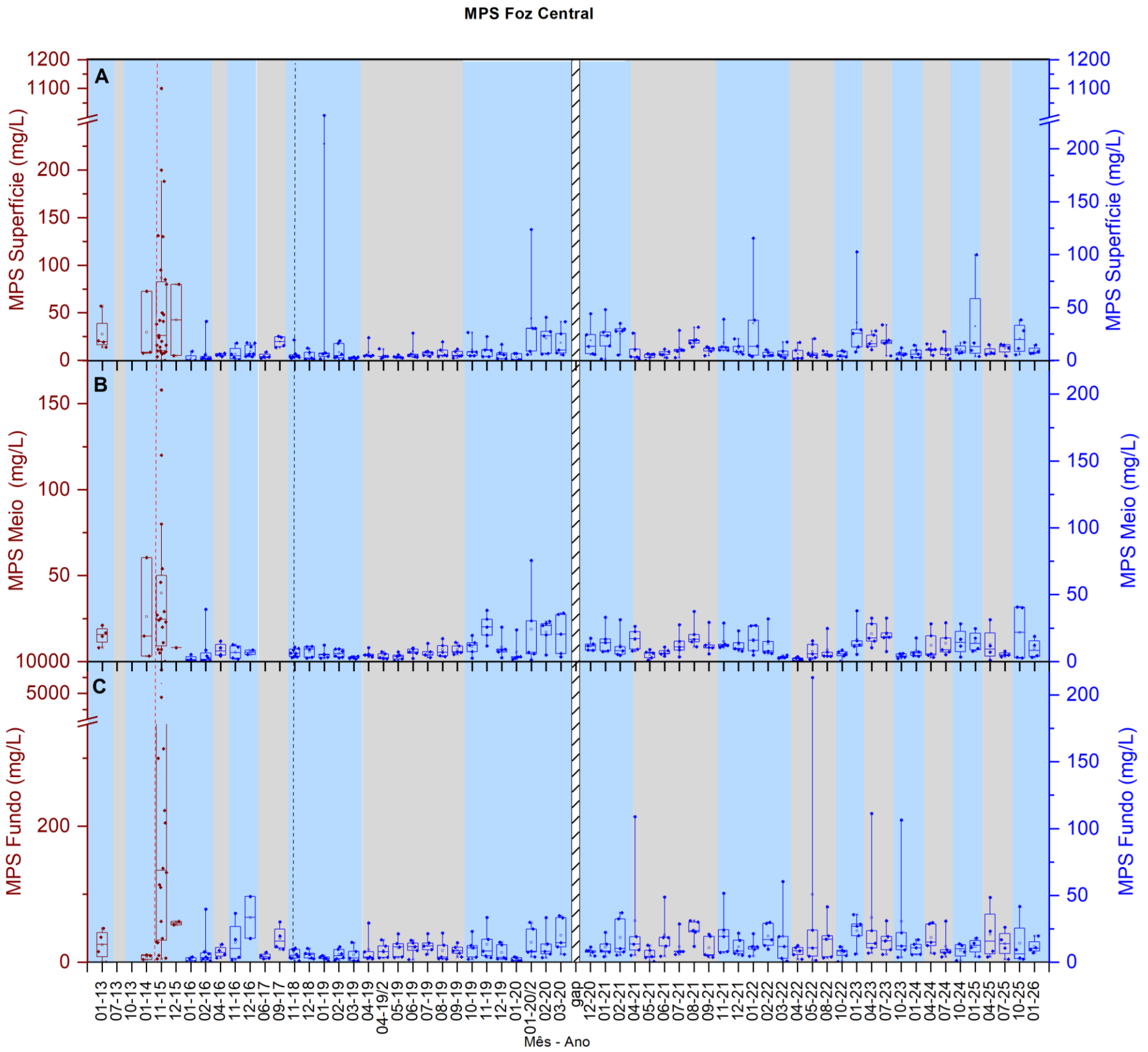


Figura 11: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo da coluna d'água, para o Setor Foz Central desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

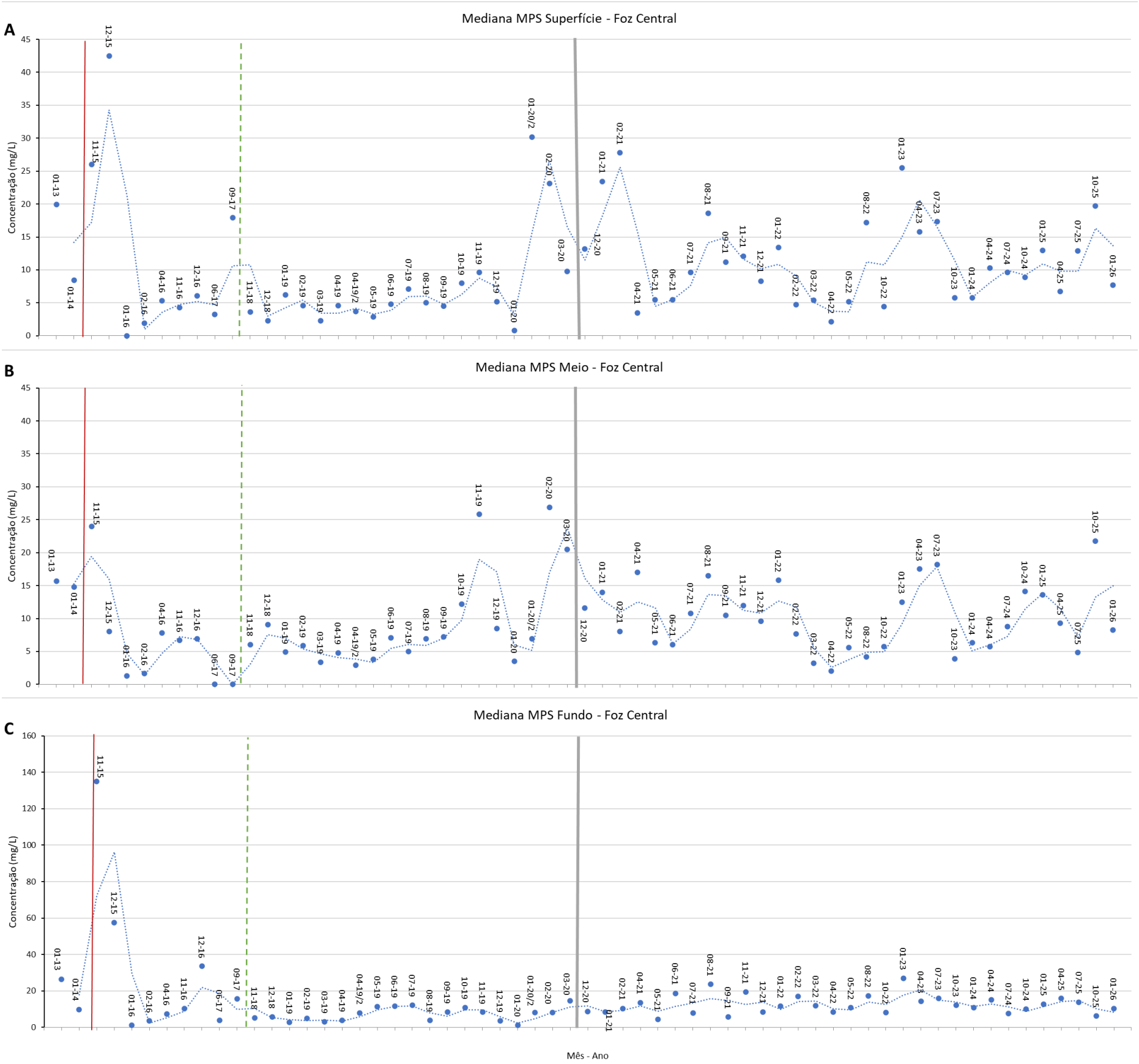
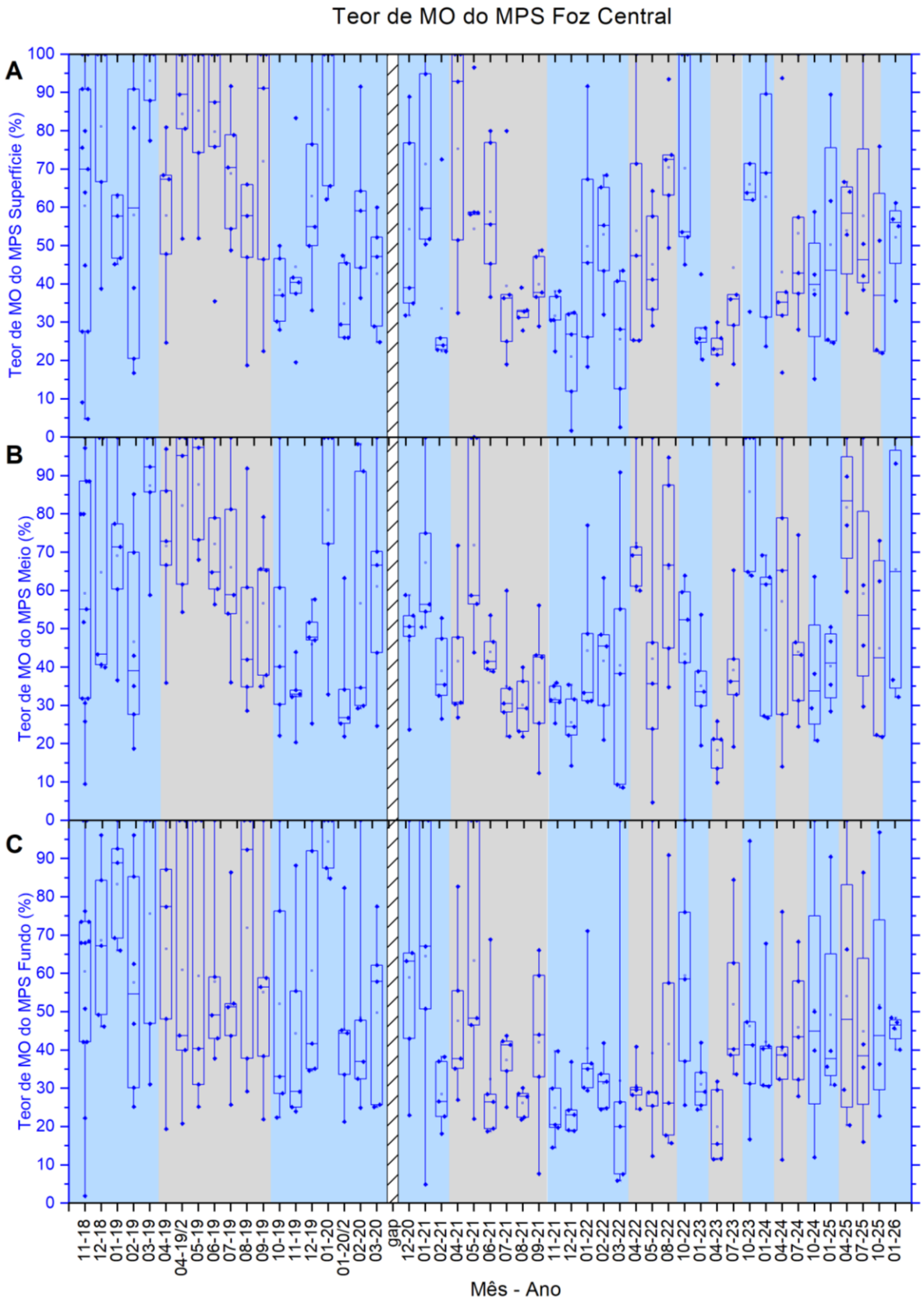


Figura 12: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.



As concentrações de MPS no Setor Central (Figura 10 a Figura 12) apresentaram uma tendência de aumento significativo (p-valor < 0,05) ao longo do período de monitoramento, para todas as profundidades da coluna d'água. Esse padrão indicou maiores concentrações de MPS na superfície da coluna d'água durante o período chuvoso, associado ao aporte fluvial, e no fundo da coluna d'água durante os períodos secos, devido à ressuspensão do sedimento do fundo. Esses resultados evidenciam a influência direta das condições hidro-meteoceanográficas sobre a dinâmica do MPS na região da foz.

As concentrações de MPS foram mais altas nos Anos 2 e 4, mas no Ano 5 houve um aumento das medianas de MPS tanto na superfície quanto no fundo da coluna d'água (Figura 11). Esse aumento pode ser atribuído ao maior aporte de sedimentos em suspensão proveniente do rio Doce entre dezembro de 2022 e janeiro de 2023 (Figura 1), refletindo a influência do aporte fluvial sobre as concentrações de MPS nesse setor. Um exemplo representativo disso ocorreu durante a campanha de janeiro de 2022, que foi realizada logo após o pico do evento hidrológico de cheia, registrado no dia 13 de janeiro de 2022, com uma vazão máxima de 5595 m³/s na estação P21, em Linhares (Tema – Integração Fluvio-Estuarina/ PMBA/Fest-UFES). Nesse mesmo dia, a carga de sedimento em suspensão atingiu 1,5 x 10^5 toneladas/dia.

Durante o período chuvoso do Ano 4, a concentração de MPS (Figura 10) na estação SD 01 (superfície da coluna d'água) atingiu 115 mg/L, enquanto no Ano 5, o valor foi de 102 mg/L na mesma estação e profundidade, indicando a continuidade do comportamento do MPS. No Anos 6, por outro lado, as concentrações de MPS foram inferiores aos valores observados no ano 5 em todos os estratos da coluna d'água, refletindo a redução da carga de sedimentos em suspensão registrada ao longo desse período. Esse comportamento evidencia a variação das concentrações de MPS de acordo com as condições hidrológicas e sedimentares, reforçando o papel significativo do aporte fluvial e da ressuspensão nos processos dinâmicos do MPS na região da foz do rio Doce.

No período chuvoso do Ano 7 (outubro de 2024 e janeiro de 2025), a Foz Central apresentou aumento nas concentrações de material particulado em suspensão (MPS) em relação ao mesmo período do Ano 6, com destaque para o pico de 99 mg/L no ponto SD 01, valor equivalente ao registrado no Ano 5 Esses valores elevados de MPS estão associados ao aumento da vazão do rio Doce, sendo recorrente a ocorrência desses picos durante o período chuvoso. Destaca-se que a campanha de janeiro de 2025 foi realizada logo após o pico de cheia, registrado em 10 de janeiro de 2025, quando a vazão atingiu 2361,4 m³/s na estação P21, em Linhares (Tema – Integração Flúvio-Estuarina/ PMBA/Fest-UFES), evidenciando a influência direta dos eventos hidrológicos extremos no incremento do material em suspensão. Apesar desses picos, os valores gerais permaneceram inferiores aos registrados nos anos 2, 4 e 5, com redução do percentual de matéria orgânica associada ao MPS nas camadas superficial e intermediária em relação ao Ano 6. No período seco do Ano 7 (abril e julho de 2025), as concentrações de material particulado em suspensão (MPS) mantiveram-se, de modo geral, semelhantes às observadas no Ano 6, porém inferiores aos valores registrados no Ano 5. (Figura 11).

No período chuvoso do Ano 8 (outubro de 2025 e janeiro de 2026), as duas campanhas evidenciaram forte contraste nas condições ambientais. Em outubro de 2025, foram registrados valores de MPS superiores aos observados nos Anos 6 e 7, mesmo sob menor vazão do rio Doce (Figura 1), o que indica predominância de eventos meteo-oceanográficos; dias antes da coleta houve a passagem de frente fria do quadrante sul, com ondas superiores a 1,7 m, condição que persistiu durante a amostragem e favoreceu a ressuspensão sedimentar. Em janeiro de 2026, por sua vez, observou-se redução das concentrações de MPS, associada à menor ocorrência de ondas provenientes do quadrante sul, refletindo condições hidrodinâmicas mais estáveis. Em conjunto, os resultados demonstram que a Foz Central é altamente dinâmica e sensível a eventos episódicos, alternando entre condições de intensa ressuspensão e aporte sedimentar pelo rio e momentos em que não se observa transporte sedimentar em maiores dimensões.

Figura 13: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Os limites superiores para os eixos Y são diferentes entre para cada profundidade da coluna d'água e para parte da série de dados (dados em vermelho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

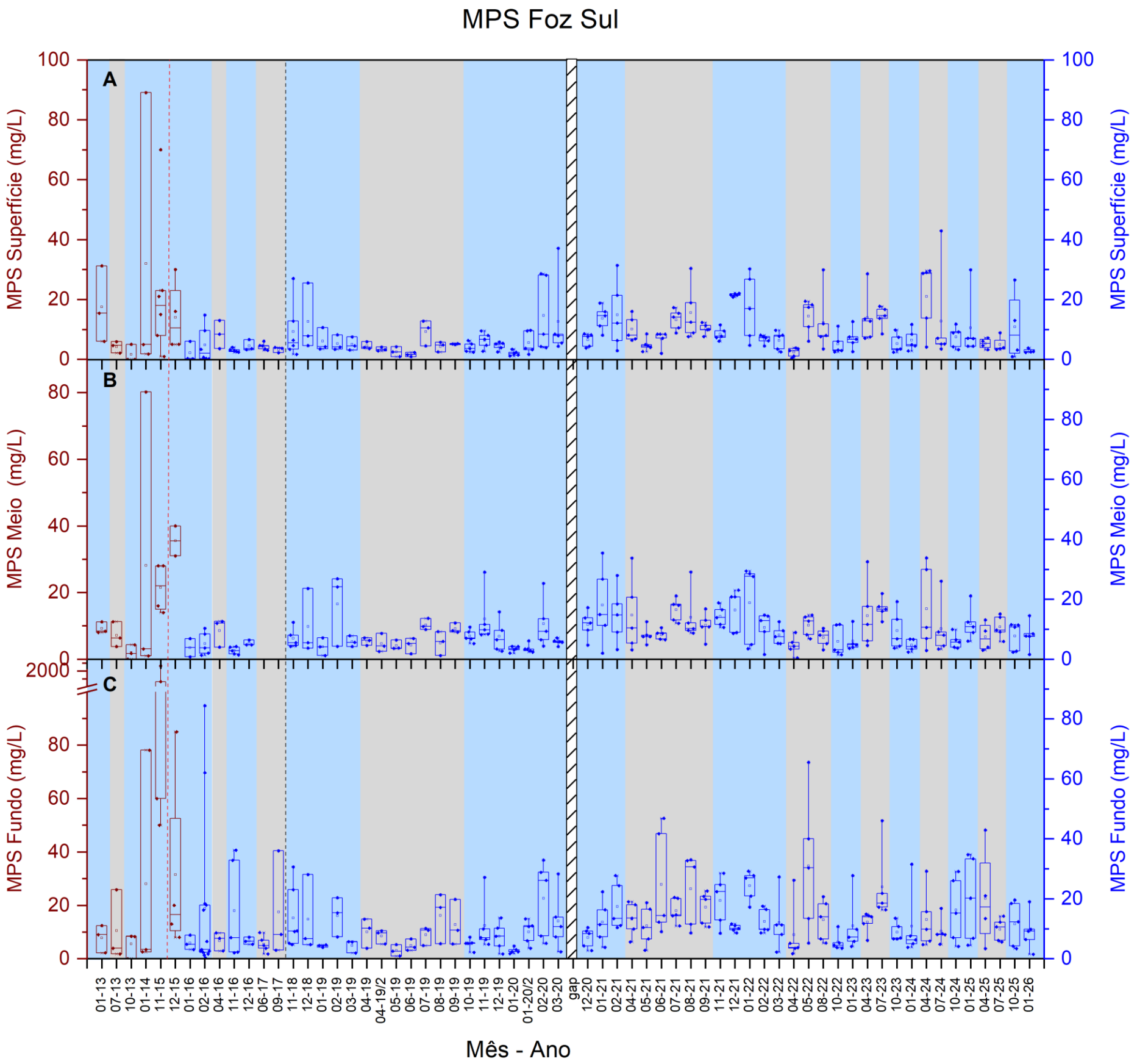


Figura 14: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo da coluna d'água, para o Setor Foz Sul desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de Fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

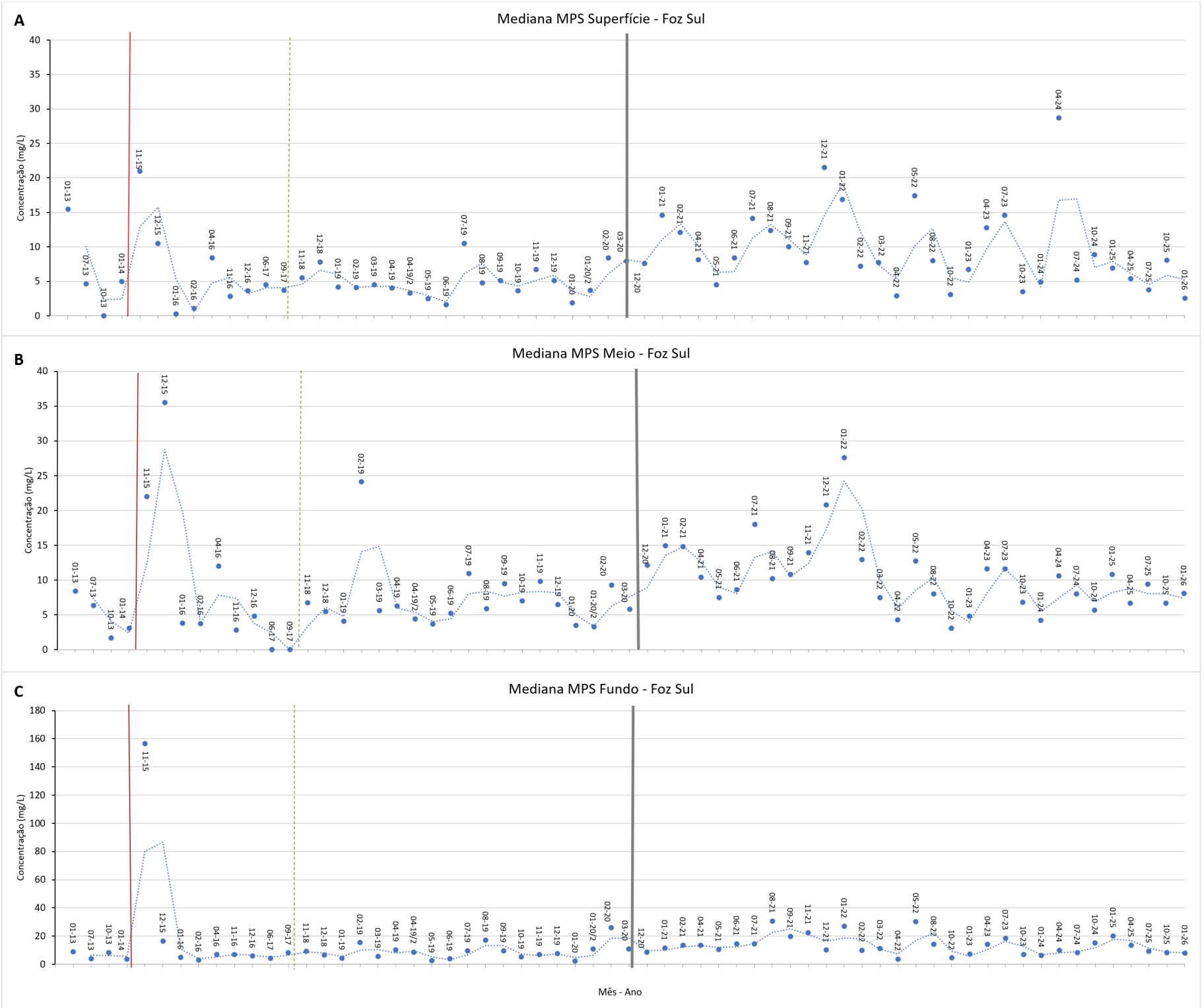
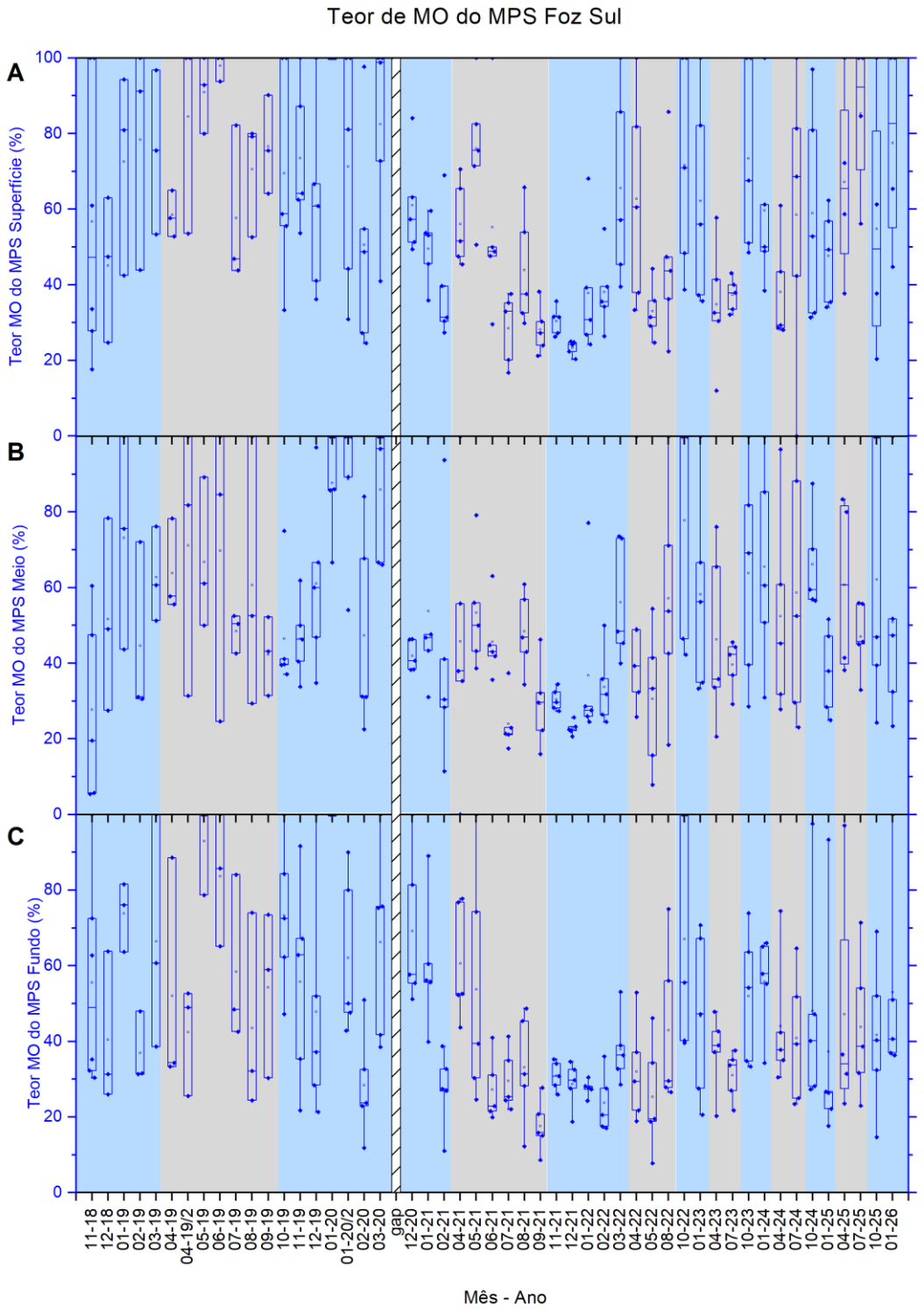


Figura 15: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.



O Setor Foz Sul é marcado pelo depocentro (Quaresma *et al.*, 2015), ou seja, área onde ocorre o maior acúmulo de sedimento terrígeno aportado pelo rio Doce. Observando a série temporal de MPS, verifica-se que, neste setor, há um aumento na variabilidade das concentrações de MPS após o evento de rompimento da barragem, se estendendo ao longo de todo o monitoramento, principalmente nos dados medidos junto ao Fundo e Meio da coluna d'água.

As concentrações de MPS para o Setor Foz Sul (Figura 13 a Figura 15) também apresentam uma tendência de aumento significativo (p-valor < 0,05) ao longo do período de monitoramento. No período seco dos Anos 5 e 6, verificou -se um aumento das concentrações de MPS em todos os estratos da coluna d'água. Destaque para a campanha de abril de 2024 (Ano 6), na qual as medianas das concentrações de MPS na superfície apresentaram os maiores valores registrados ao longo do monitoramento para esse estrato da coluna d'água**.** Esse aumento foi acompanhado de uma redução no teor de matéria orgânica no MPS (Figura 15), resultando em valores de concentrações superiores aos observados nos períodos chuvosos dos anos correspondentes.

Embora o comportamento das concentrações de MPS no período chuvoso, a partir do Ano 5, continuem refletindo a influência direta das condições hidro-meteoceanográficas, observa-se uma redução nas medianas das concentrações de MPS durante os Anos 5 e 6, quando comparado ao ano 4. Para o período chuvoso do Ano 7 observou-se um aumento nas concentrações de material particulado em suspensão (MPS) em toda a coluna d'água em comparação ao mesmo período do Ano 5 e 6, com destaque para a camada de fundo, onde os valores se aproximaram de 20 mg/L. Paralelamente, observou-se uma redução no percentual de matéria orgânica (MO) associada ao MPS em todas as profundidades em relação ao período chuvoso do Anos 5 e 6.

No período seco do Ano 7, as concentrações de MPS próximo ao fundo foram superiores às observadas no período seco do Ano 6, porém foram inferiores na superfície e similares na camada do meio (Figura 14). Na campanha de abril de 2025 observamos valor de 42,90 (mg/L) no ponto SDS 20, analisando a data da coleta com a Hs de onda tivemos a passagem de uma frente fria na semana da coleta com ondas acima de 2 metros (ADCPs vinculados ao Ambiente Marinho - Tema - Modelagem Numérica/ PMBA/Fest-UFES), explicando esses maiores valores próximo ao fundo (ressuspensão).

No período chuvoso do Ano 8, observou-se atenuação dos valores de MPS, com concentrações de fundo inferiores às registradas no Ano 7 e baixa concentração superficial em janeiro de 2026 (mediana de 2,6 mg/L) (Figura 14), sugerindo condições de menor energia hidrodinâmica e reduzida ressuspensão e aporte fluvial sedimentar em relação ao período chuvoso do Ano 7, embora ainda superiores às observadas no Ano 6.

Figura 16: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. As estações rasas estão localizadas mais próximas à costa até 36 m de profundidade e as estações profundas estão localizadas a partir de 36 m até cerca de 55m de profundidade. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Não há dados pretéritos de MPS para esse setor. Dados em vermelho correspondem às estações Rasas. Dados em azul correspondem às estações Profundas. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral.

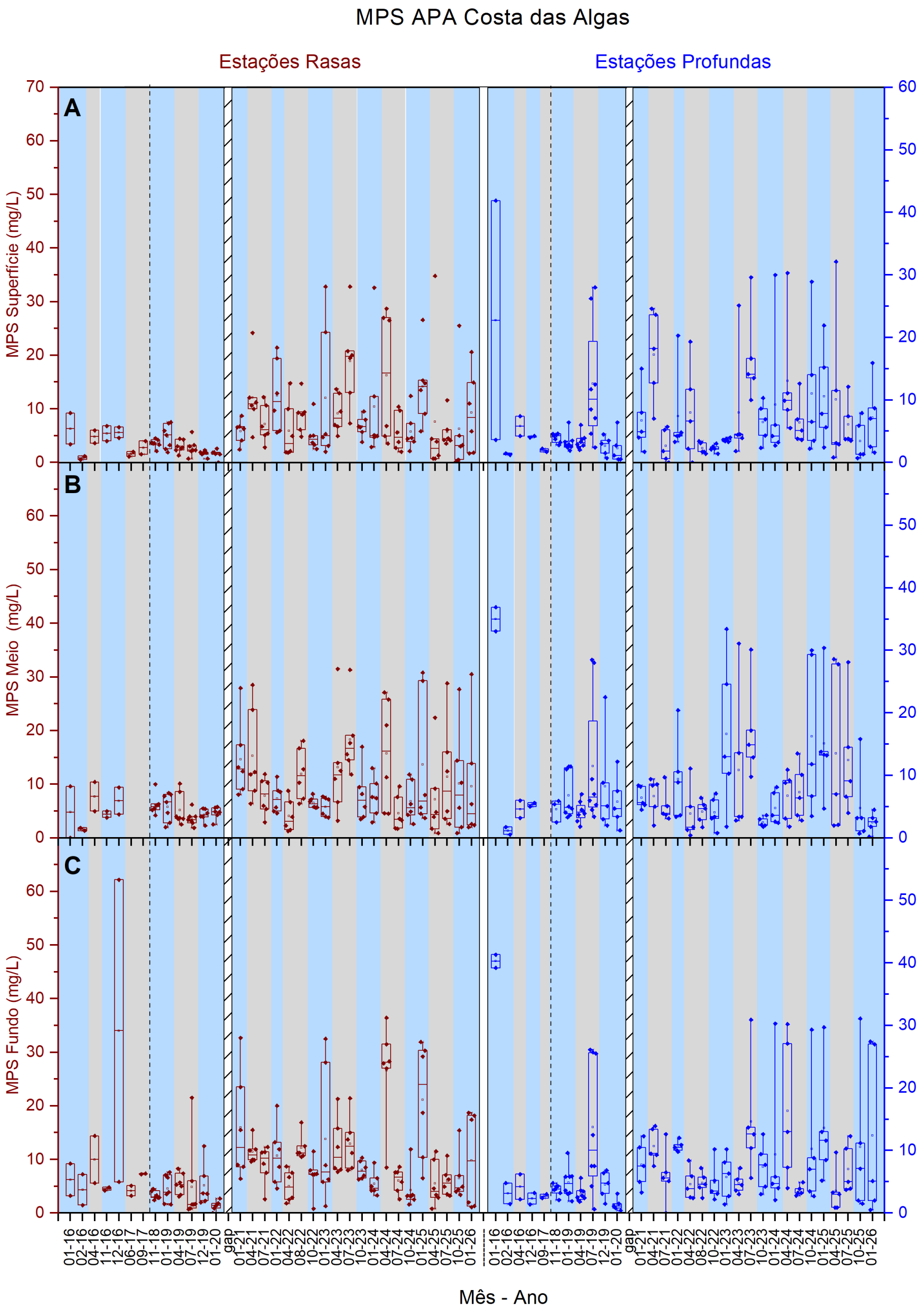


Figura 17: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest-UFES e a linha cinza indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

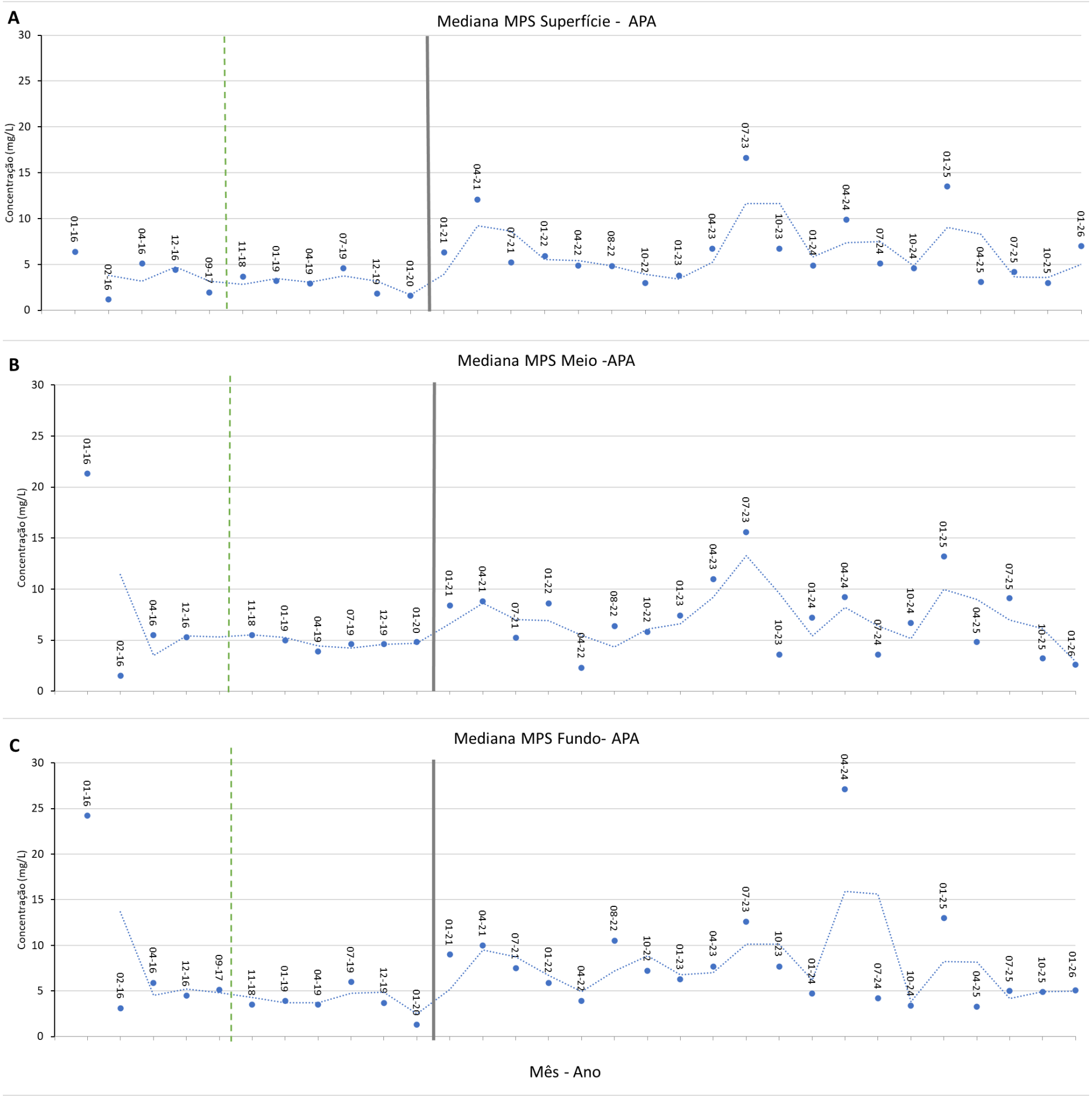
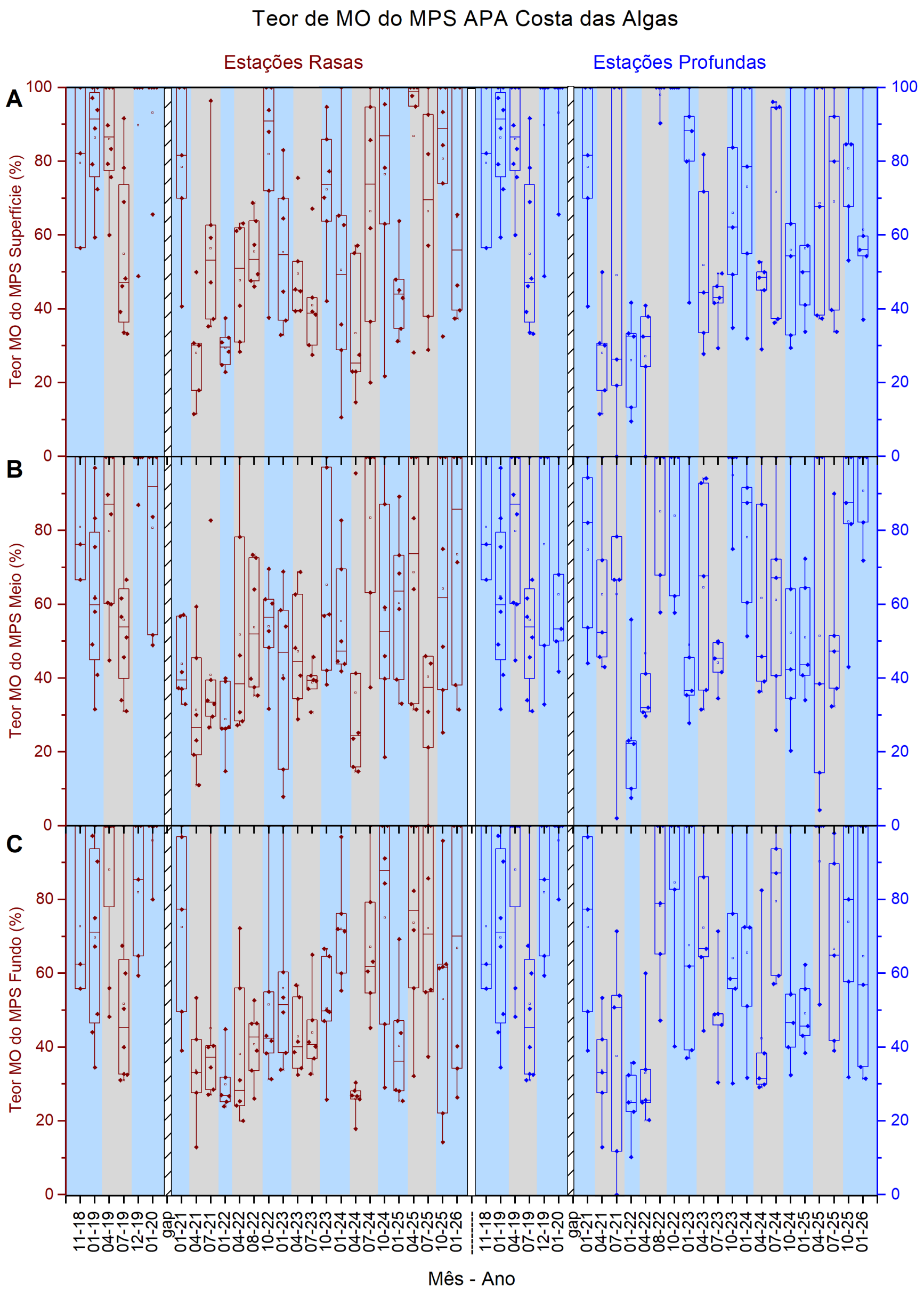


Figura 18: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas na **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. As estações rasas estão localizadas mais próximas à costa até 36 m de profundidade e as estações profundas estão localizadas a partir de 36 m até cerca de 55m de profundidade. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Não há dados pretéritos de teor de MO do MPS para esse setor. Dados em vermelho correspondem às estações Rasas. Dados em azul correspondem às estações Profundas. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral.



Nas estações APA Rasa (até 36m) foi observado um aumento significativo (*p*-valor < 0,05) das concentrações de MPS ao longo do período do Monitoramento (Figura 16). Nas estações APA profunda (36m<profundidade<55m) não foi observado esse padrão. Como discutido por estudos prévios e em relatórios anteriores, no Setor APA Costa das Algas a concentração de MPS é fortemente influenciada pelo material exportado pelo rio Doce durante condições conjuntas de eventos de cheia e ventos do quadrante norte (Oliveira, 2018; RRDM, 2021; Quaresma *et al.*, 2021). As maiores concentrações de MPS para as estações rasas ocorreram no período chuvoso do Ano 5 e no período seco do Ano 6. Dessa forma, no Ano 6, assim como no setor Foz Sul, ocorreu um aumento das concentrações de MPS no período seco em relação ao período chuvoso desse mesmo ano. Além disso, na campanha de abril de 2024 (Ano 6), o fundo da coluna d'água apresentou a maior mediana de concentração de sedimentos em suspensão registrada ao longo de todo o período do monitoramento.

Para o período chuvoso do Ano 7 (out/2024 e jan/2025) observou-se concentrações mais elevadas de MPS em comparação ao mesmo período do Ano 6, tanto na região profunda (APA Profunda) quanto na rasa (APA Rasa) (Figura 16). Enquanto as medianas do percentual de matéria orgânica (% MO) mantiveram-se estáveis nos pontos da APA Rasa, observou-se redução significativa na % MO na APA Profunda durante o período chuvoso do Ano 7 em relação ao ano anterior (Figura 18).

Altas concentrações de MPS registradas na APA rasa e profunda ocorreram na campanha de janeiro de 2025 (período chuvoso do ano 7), superadas apenas pelos valores de julho de 2023 (período seco do ano 5) (Figura 17). No ano 7, o período seco apresentou medianas de MPS inferiores às observadas no período seco do ano 6. Observou-se, ainda, redução dos teores de MPS entre o período chuvoso do ano 7 e o período chuvoso do ano 8, tanto na APA rasa quanto na profunda (Figura 17).

3.2 POTENCIAL DE MOBILIDADE DO SEDIMENTO SUPERFICIAL DE FUNDO

Figura 19: Percentual de Mobilidade do sedimento superficial (base) ao longo do PMBA/Fest-UFES, para os setores Foz Norte, Foz Central e Foz Sul. Áreas em azul indicam o período chuvoso e em cinza, o período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

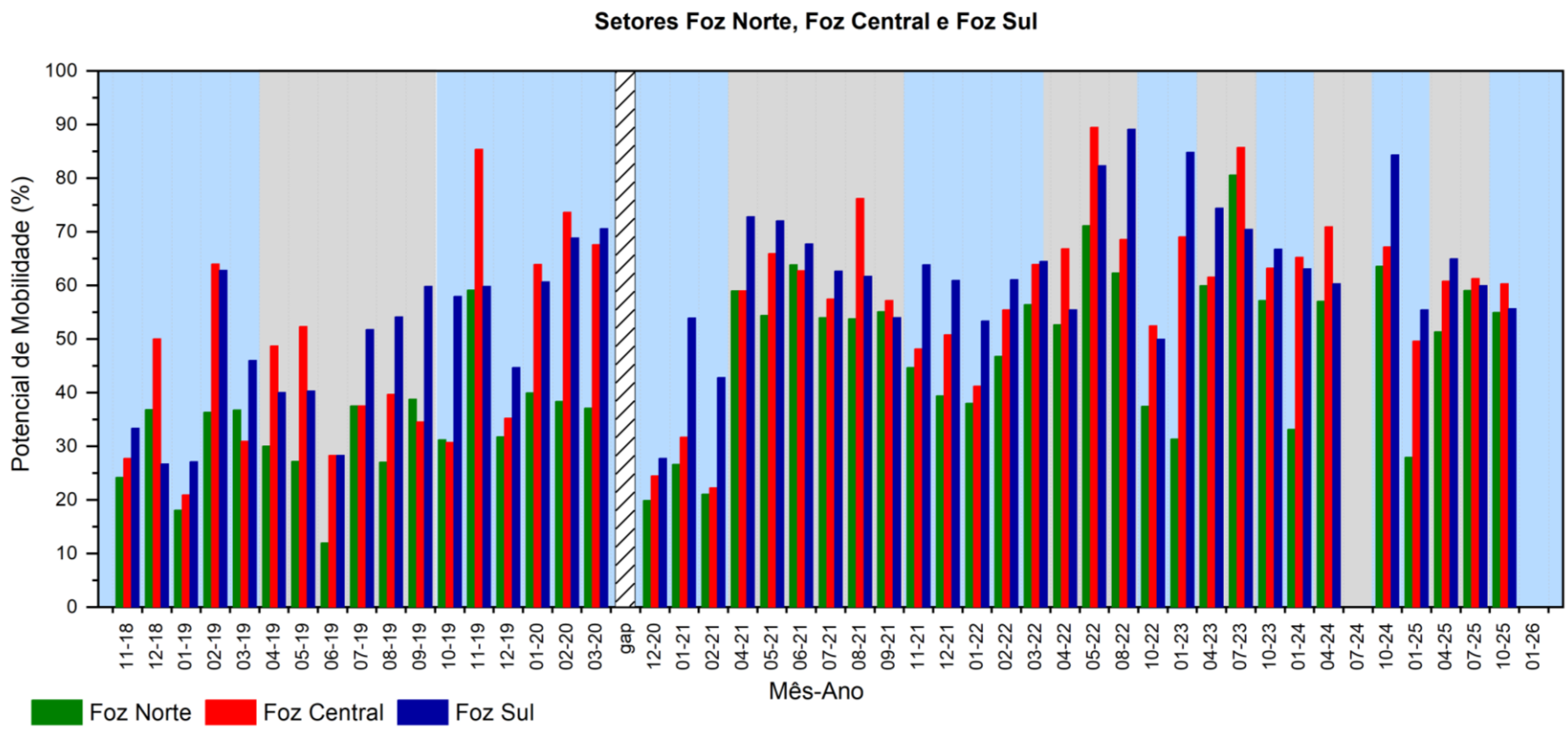


Figura 20: Percentual de Mobilidade do sedimento superficial (base) ao longo do PMBA/Fest-UFES, para o setor Norte. Áreas em azul indicam o período chuvoso e em cinza, o período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020.

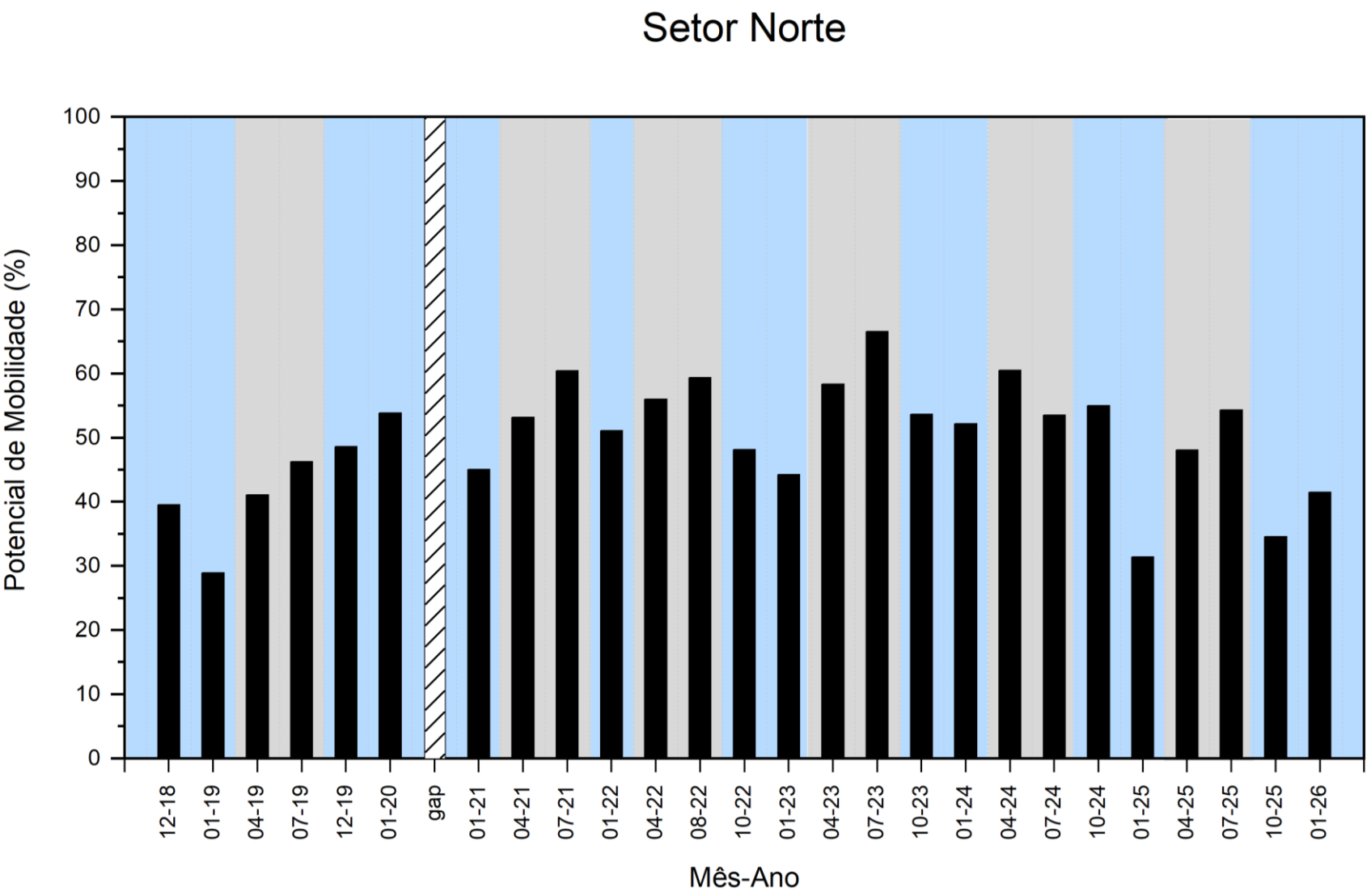


Figura 21: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um “X” são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022). Não ocorreram coletas para esse setor devido uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais esse setor. A informação de tipos de fundo foi produzida através de dados compilados do Labogeo/UFES.

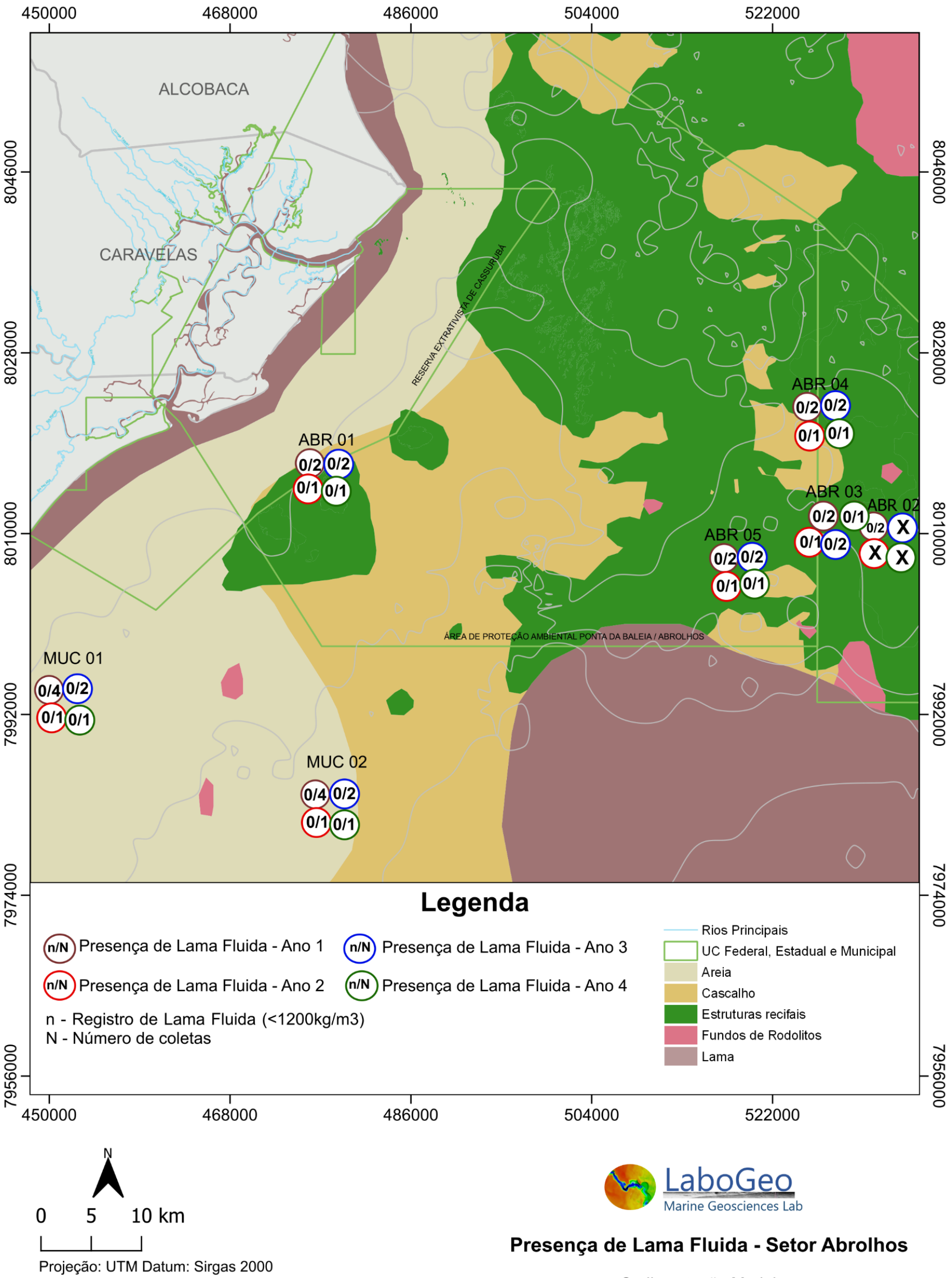


Figura 22: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor Norte para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um “X” indicam que a estação não fazia parte da malha amostral no referente ano. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.

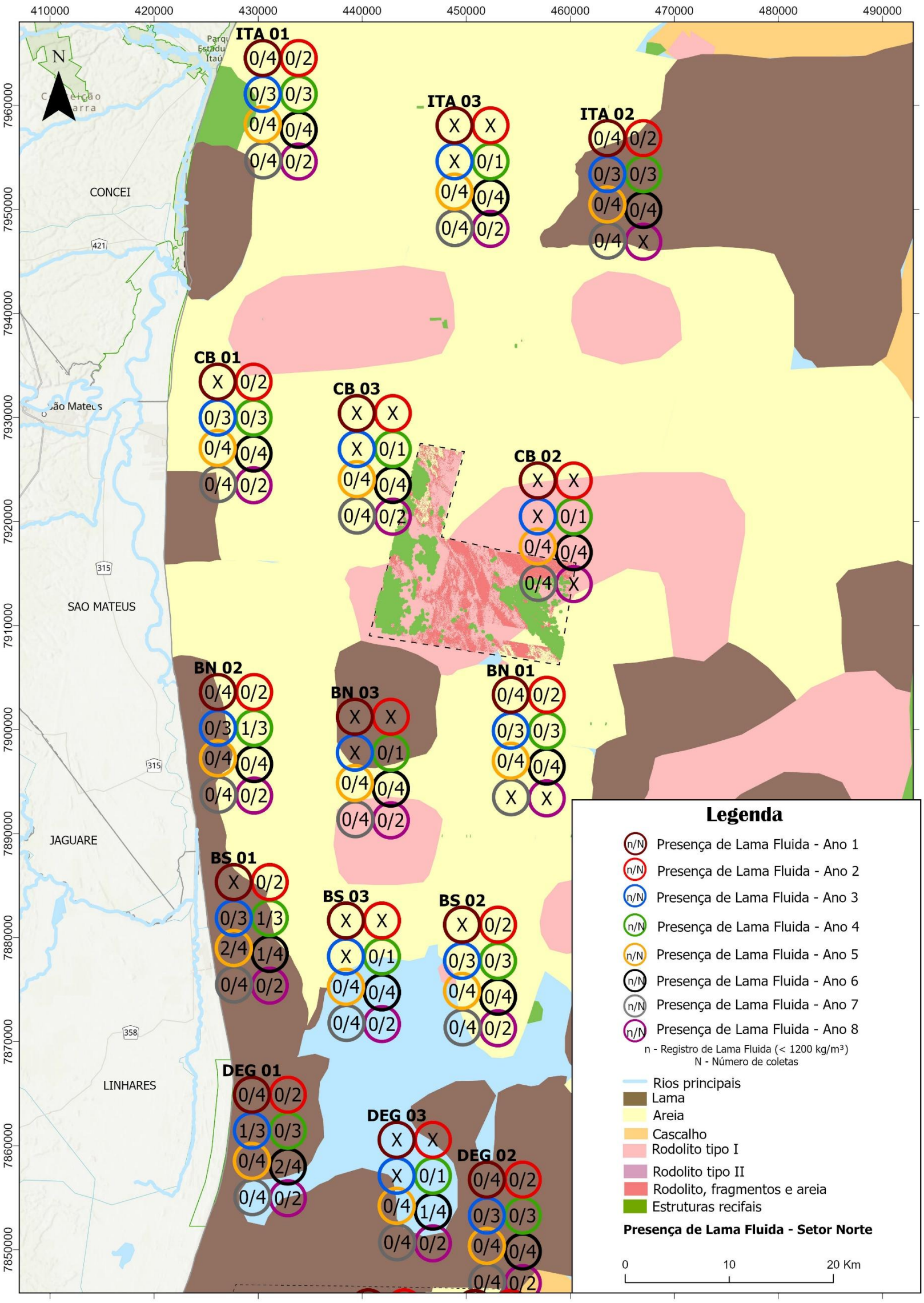


Figura 23: Indicativo da presença de lama fluida para o Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" indicam que a estação não fazia parte da malha amostral no referente ano. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES. N/A refere-se à exclusão dos resultados de SDS19 a partir de abril de 2025, conforme detalhado no Item 3.

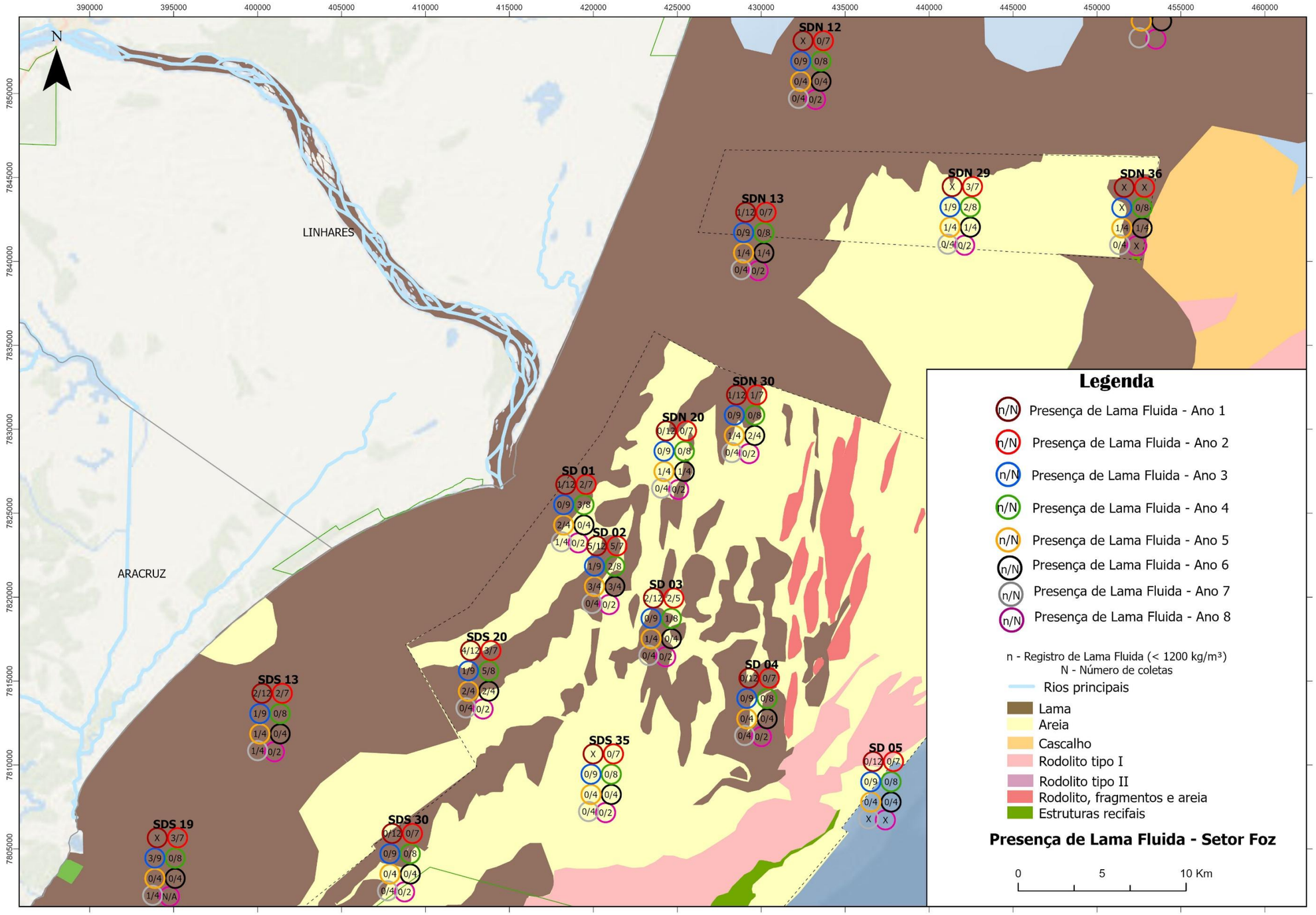
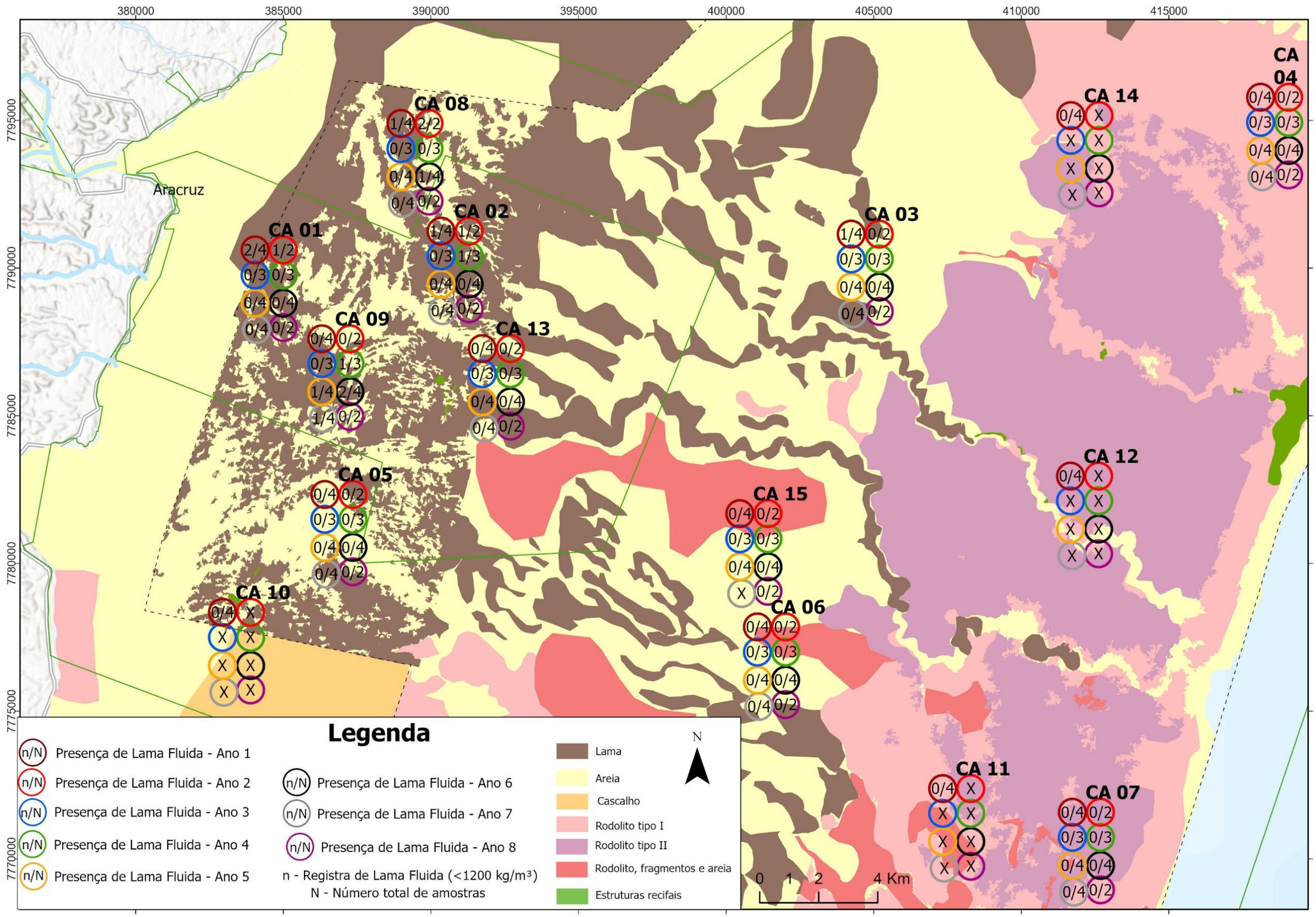


Figura 24: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor APA Costa das Algas para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um “X” são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção das estações do monitoramento. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. Os mosaicos com detalhamento de tipos de fundo foram produzidos pelo tema Sedimentação Marinha (Mapeamento de Habitat) do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.



A densidade do sedimento superficial tem sido utilizada para identificar fundos com lama fluida (Figura 21). Estudos realizados antes do rompimento da Barragem de Fundão já haviam registrado a presença de lama fluida na região da Foz do rio Doce, principalmente no Setor Foz Sul, identificado como o principal depocentro de lama da plataforma continental adjacente (Quaresma et al., 2015). Após o rompimento da barragem, em novembro de 2015, fundos de lama fluida foram novamente observados na região, desta vez apresentando valores inéditos de densidade úmida (≤ 1099 kg/m³; Quaresma et al., 2020), indicativos de sedimentos em estágio de pré-consolidação, com elevado teor de água intersticial e baixa resistência ao cisalhamento. O monitoramento demonstrou que os baixos valores de densidade não se restringiram aos anos imediatamente posteriores ao desastre, persistindo ao longo de todo o período de monitoramento (2018–2025). Além disso, a ocorrência de lama fluida foi registrada não apenas na Foz Sul, mas também nos setores Foz Central, Foz Norte, Norte e APA, evidenciando uma ampla distribuição espacial dos sedimentos fluidizados na região da foz do rio Doce.

Na escala interanual, a ocorrência de fundos com lama fluida variou significativamente entre os anos de monitoramento (Figura 21 a Figura 24). Nos Anos 1 e 2 foram registrados os maiores números de ocorrências, concentradas principalmente nos setores Foz Central e Foz Sul, que apresentaram respectivamente 8 e 9 registros no Ano 1 e 9 registros cada no Ano 2. Nesse período destacaram-se os pontos SD02, na Foz Central, e SDS20, na Foz Sul, ambos com elevada recorrência de lama fluida. No Ano 3 houve uma redução acentuada das ocorrências em todos os setores, mantendo-se apenas registros pontuais, principalmente nos pontos SDS19 (Foz Sul) e SD02 (Foz Central). No Ano 4 observou-se uma recuperação parcial dos registros, com destaque para o ponto SDS20, responsável por todas as ocorrências da Foz Sul nesse ano, e para os pontos SD01 e SD02 na Foz Central. No Ano 5 as ocorrências voltaram a aumentar e passaram a ser registradas em todos os setores monitorados, com maior destaque para a Foz Norte, onde foram observados registros nos pontos SDN13, SDN20, SDN29, SDN30 e SDN36.

No Ano 6 manteve-se elevada a ocorrência de lama fluida, novamente com predomínio na Foz Norte, setor que concentrou o maior número de registros, especialmente nos pontos SDN29, SDN30 e SDN36. Nesse mesmo ano, o Setor Norte apresentou seu pico de ocorrência, com registros nos pontos DEG01, DEG03 e BS01. Já no Ano 7 ocorreu uma redução expressiva da distribuição espacial da lama fluida, restringindo-se praticamente à Foz Sul e à APA, com destaque para o ponto CA09. No Ano 8 (outubro de 2025 a março de 2026) não foram registrados fundos com lama fluida em nenhum dos setores monitorados. Considerando todo o período de estudo, os pontos SD02 (Foz Central), SDS20 e SDS19 (Foz Sul), SDN29 e SDN30 (Foz Norte), além de CA09 (APA), destacaram-se pela maior recorrência de registros, caracterizando-se como áreas preferenciais para deposição e manutenção de sedimentos fluidizados ao longo do monitoramento (Figura 21 a Figura 24).

Além de auxiliar na identificação de fundos com lama fluida, a densidade do sedimento superficial é um parâmetro fundamental para o cálculo do potencial de mobilidade do sedimento. O indicador de mobilidade de fundo foi calculado mensalmente durante as campanhas realizadas nos setores Norte,

Foz Norte, Foz Central e Foz Sul, considerando a disponibilidade de dados hidrodinâmicos e a densidade, esta última medida exclusivamente para fundos lamosos.

Os resultados do monitoramento indicaram um aumento no potencial de mobilização do sedimento em todos os setores analisados, atribuído à redução da densidade superficial do sedimento de fundo. A análise demonstrou uma tendência significativa de aumento na mobilidade do sedimento (p-valor < 0,05) nos setores da Foz do rio Doce (Figura 19) e no Setor Norte (Figura 20), especialmente quando correlacionada com a diminuição nos valores de densidade do sedimento superficial e o aumento da tensão de cisalhamento de fundo. No ano 7, no mês de janeiro de 2025 observou-se uma diminuição no potencial de mobilidade em todos os setores, seguindo o padrão da série histórica. A adição dos dados do período seco do ano 7 à série temporal eliminou a tendência de aumento no Setor Norte, mas não alterou a tendência significativa de aumento no Setor Foz (p-valor < 0,05).

Adicionalmente, foi identificada uma variação sazonal no indicador de mobilidade, com maior mobilidade durante o período seco. Apesar dessa diferença sazonal ser evidente, apenas as estações localizadas na Foz Norte apresentaram uma diferença estatisticamente significativa (p-valor < 0,05) entre os períodos seco e chuvoso.

No Ano 7, o período chuvoso e o período seco mantiveram o padrão observado no Ano 6, com menores valores de mobilidade durante o período chuvoso e maiores durante o período seco. Esse comportamento também foi verificado no período chuvoso do Ano 8, cujos valores de potencial de mobilidade permaneceram semelhantes aos registrados anteriormente.

É importante destacar que os dados da campanha de julho de 2024 (Ano 6), referentes à foz do rio Doce, não foram incluídos na análise devido a inconsistências nos resultados. Durante a etapa de análise, identificamos que essas inconsistências estavam relacionadas a um erro de amostragem. As causas do erro foram devidamente identificadas e corrigidas, com ajustes necessários nos protocolos de coleta.

Os dados da campanha de janeiro de 2026 dos setores da Foz não foram incluídos na análise devido à troca do ADCP (de 1000 kHz para 500 kHz). Essa mudança de frequência alterou a magnitude das medições, inviabilizando a comparação com os dados obtidos nas campanhas anteriores com o equipamento de 1000 kHz.

Espacialmente, a Foz Norte foi a que apresentou os menores potenciais de mobilidade, enquanto os maiores potenciais de mobilidade ocorreram na Foz Sul, resultado da menor densidade do sedimento superficial observada no setor e consequentemente menor tensão crítica de ressuspensão. Isso também tem uma forte relação com a presença do depocentro lamoso ao sul da foz do rio Doce (Quaresma *et al.*, 2015).

No Setor Norte, foi identificado um aumento no percentual de mobilidade do sedimento de fundo durante o período seco do Ano 5, registrando os maiores valores durante o monitoramento nesse setor. Em contrapartida, no período chuvoso, no geral esse setor apresenta menores valores de potencial de

mobilidade. No Ano 6, os valores do potencial de mobilidade registrados durante o período chuvoso foram superiores aos dos anos 3 e 5. Contudo, no período seco, esses valores não ultrapassaram os observados no Ano 5. Já no período chuvoso do Ano 7, observou-se o segundo menor valor já registrado para esse setor (janeiro/25), ficando acima apenas do período chuvoso do Ano 1 (Figura 19 e Figura 20). O período seco do Ano 7 apresentou o segundo menor valor de potencial de mobilidade dentre os períodos secos, apresentando um percentual discretamente mais elevado que o do Ano 1. O período chuvoso do Ano 8 apresentou valores baixos, assim como os registrados em janeiro de 2025.

3.3 VALORES DE IMS (*IRON MINERALOGICAL SET*) E PRESENÇA DO SINAL DE REJEITO NO SEDIMENTO DE FUNDO

Figura 25**: (A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Abrolhos. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ($1.7x10^{-6}$) da susceptibilidade magnética. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022). Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor. A partir de janeiro de 2022 não houve mais coletas para esse setor devido uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais esse setor.

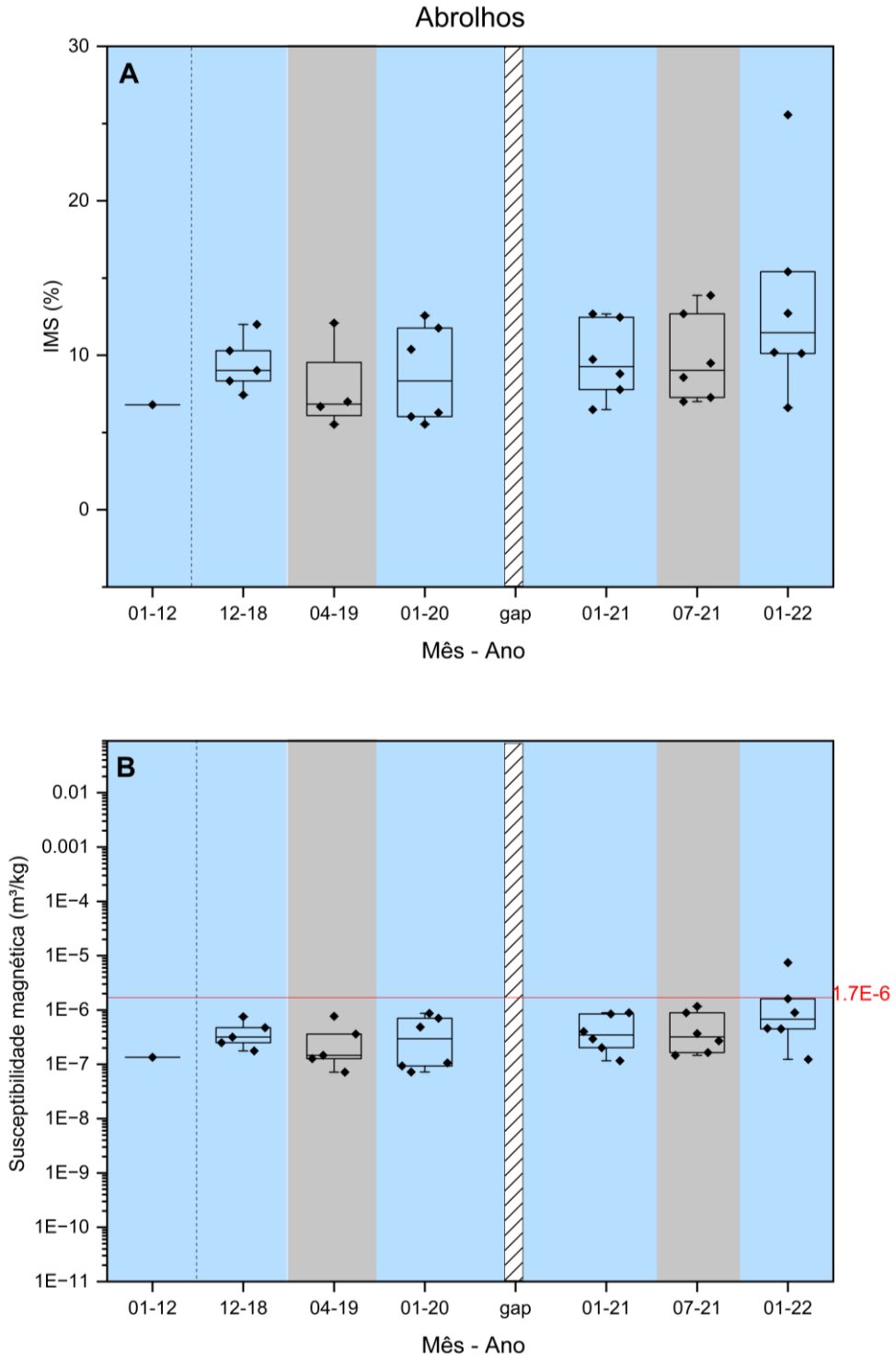
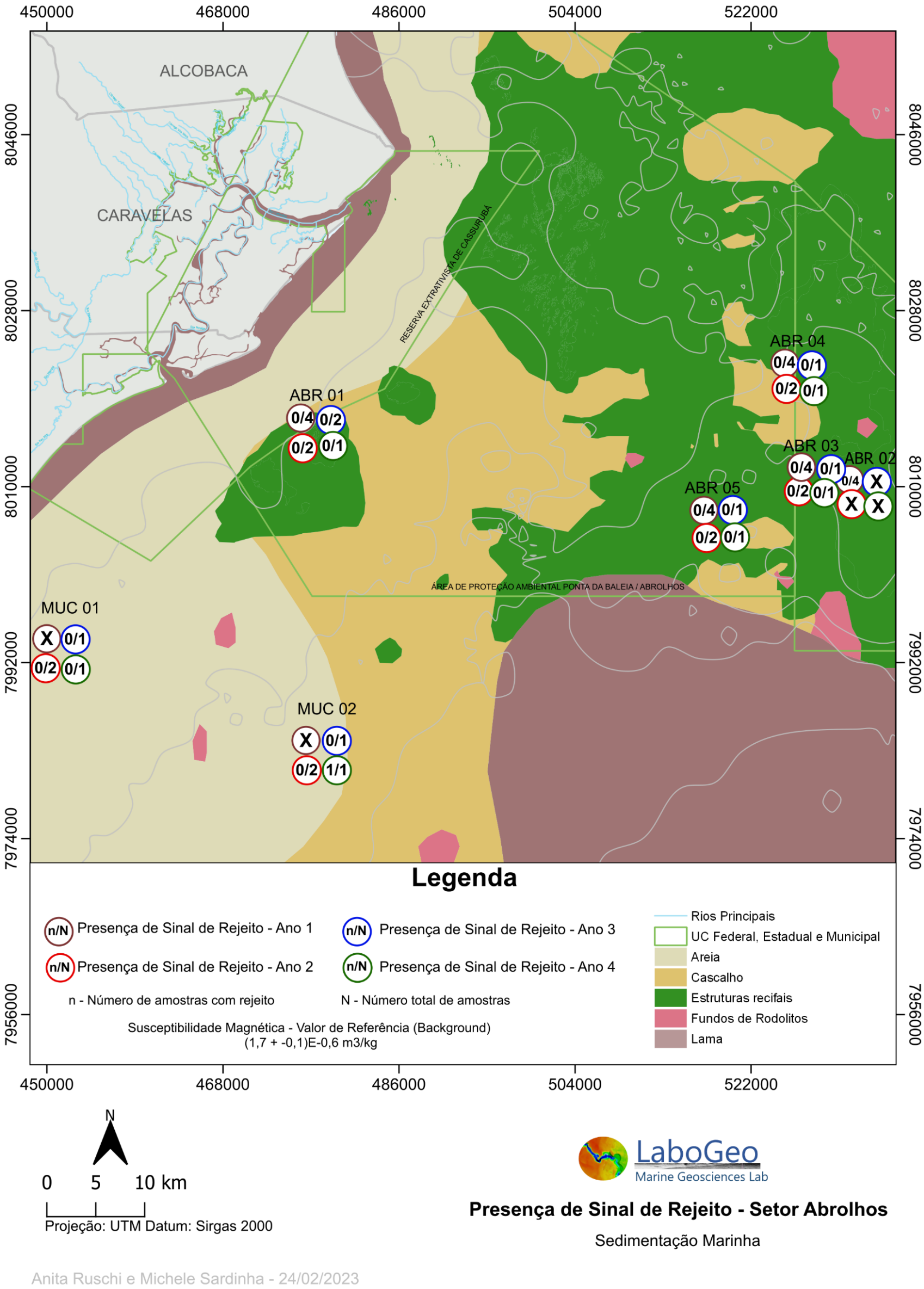
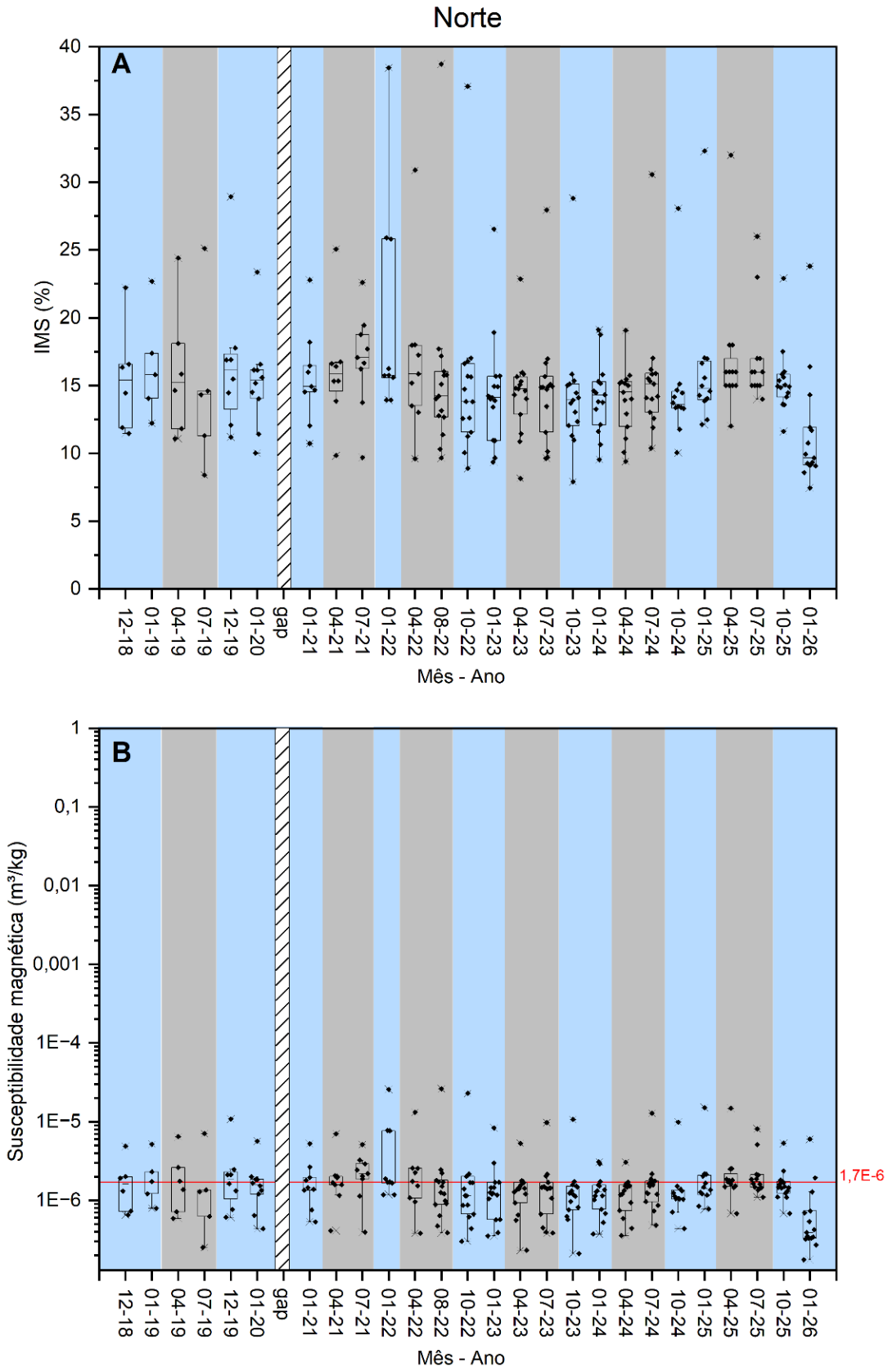


Figura 26: Indicativo da presença do sinal do rejeito para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um “X” são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do Ano 4 (janeiro/2022). Não ocorreram coletas no período seco para esse setor devido uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais esse setor. A informação de tipos de fundo foi produzida através de dados compilados do Labogeo/UFES.



A tendência geral no Setor Abrolhos é a manutenção dos valores de IMS e da susceptibilidade magnética menores ou próximos ao valor de referência nos pontos de monitoramento (Figura 25 e Figura 26), com maiores valores nos pontos mais ao sul e mais próximo à costa (ABR 01). Entretanto, a presença do sinal de rejeito para esse setor é inconclusiva, uma vez que foi observado aumento da susceptibilidade magnética acima do valor de referência (indicativo da presença do rejeito) apenas no período chuvoso do Ano 4, onde a presença do sinal do rejeito foi registrada em uma estação amostral (MUC 02) (Figura 26).

Figura 27: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do sinal do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ($1.7x10^{-6}$) da susceptibilidade magnética. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.



No Setor Norte, as concentrações de índice de material sedimentar (IMS) e de susceptibilidade magnética apresentaram valores ligeiramente acima dos de referência (Figura 27). Na comparação entre os períodos seco e chuvoso, não foram identificadas variações significativas, embora tenha sido observado um aumento nos valores de IMS (%) e de susceptibilidade magnética durante o período chuvoso do Ano 4, em relação aos anos anteriores.

No Ano 6, os valores de IMS foram similares aos registrados no Ano 5. Quanto ao sinal do rejeito (Figura 28), sua presença foi constatada em todas as campanhas realizadas, mas com maior frequência nas estações localizadas mais ao sul e próximas à costa, como DEG 01, DEG 02 e BS 01.

No Ano 7, os valores de IMS superaram os dos Anos 5 e 6, especialmente nos meses secos de abril e julho/2025, que igualaram os patamares do início da série. O sinal de rejeito (Figura 28) foi detectado em todas as campanhas, com frequência maior que nos Anos 5 e 6. A estação DEG 01 foi a mais afetada, seguida pela DEG 02, enquanto CB 01, BS 03, BS 02 e ITA 01 também apresentaram ocorrências.

No Ano 8, os valores de IMS sofreram uma queda drástica em relação aos Anos 5, 6 e 7, especialmente no mês chuvoso de janeiro/2026, que registrou o menor valor da série histórica (9,66%). O sinal de rejeito foi detectado em ambas as campanhas do ano 8, porém com frequência muito inferior à observada nos anos anteriores. A estação DEG 01 foi a única a apresentar contaminação em todas as campanhas, seguida pela BS 03 (apenas em outubro/2025).

Figura 28: Indicativo da presença de sinal do rejeito para o Setor Norte para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um “X” são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção das estações após o Ano 1 de monitoramento. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.

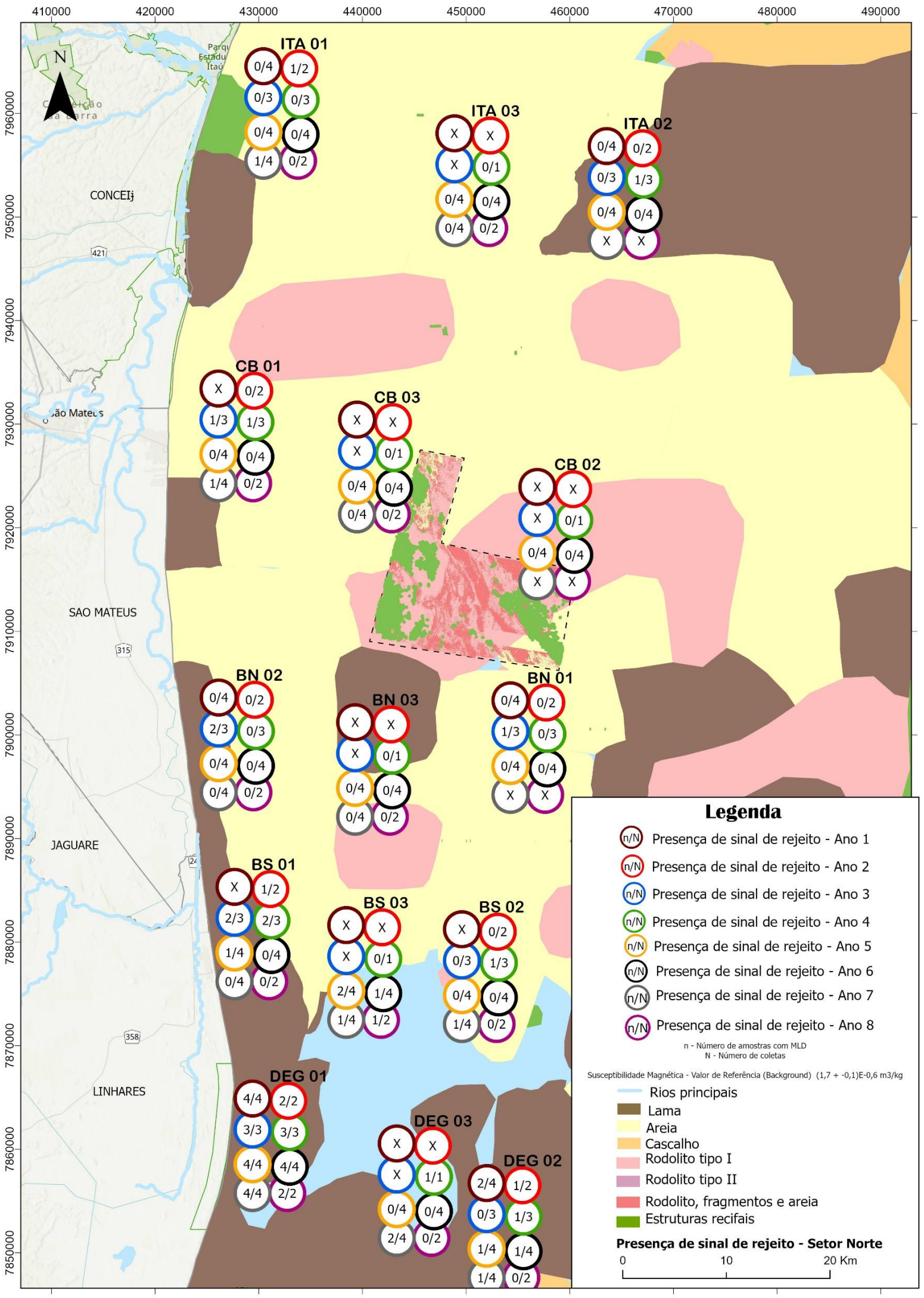


Figura 29: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ($1.7x10^{-6}$) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

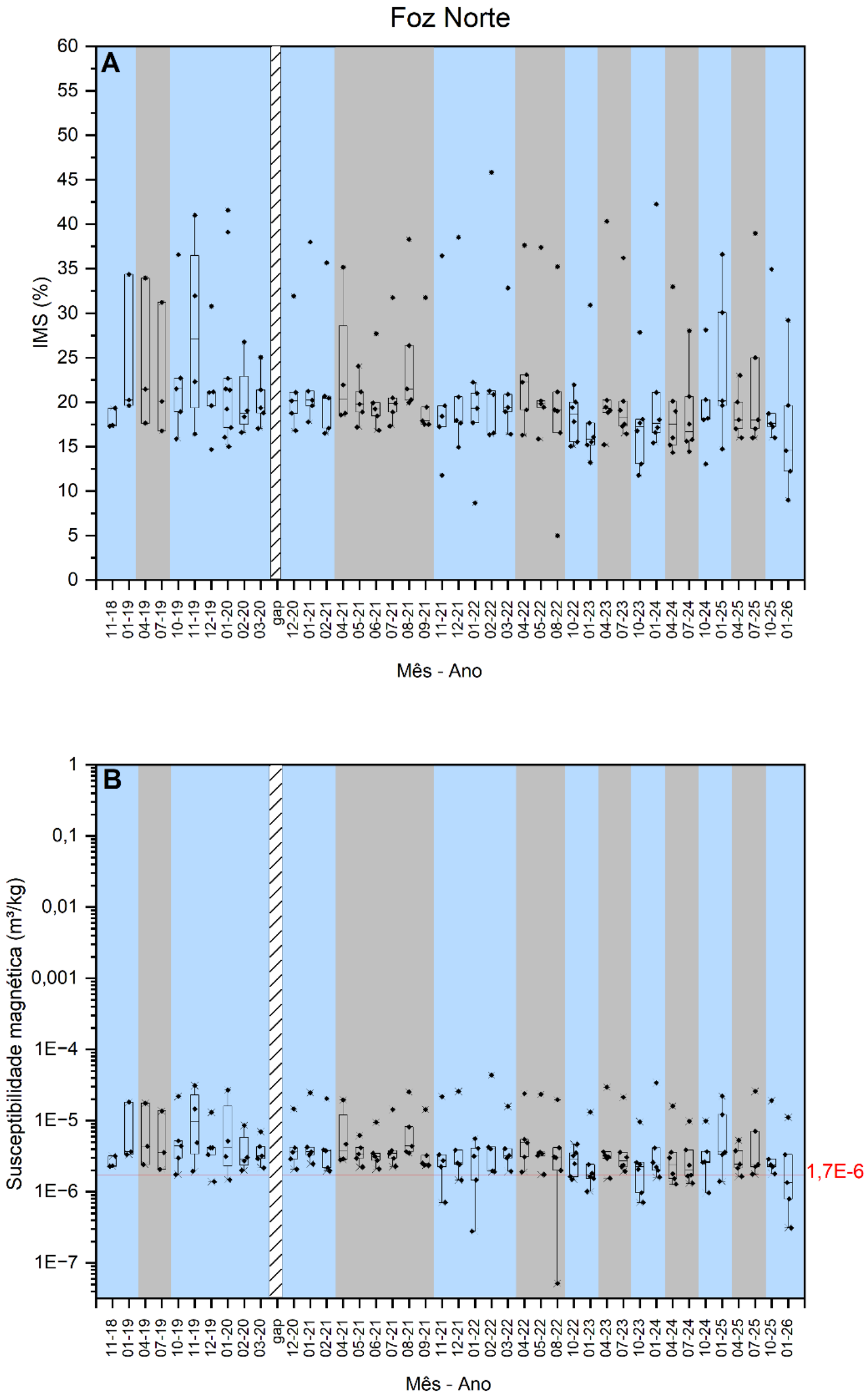


Figura 30: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ($1.7x10^{-6}$) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

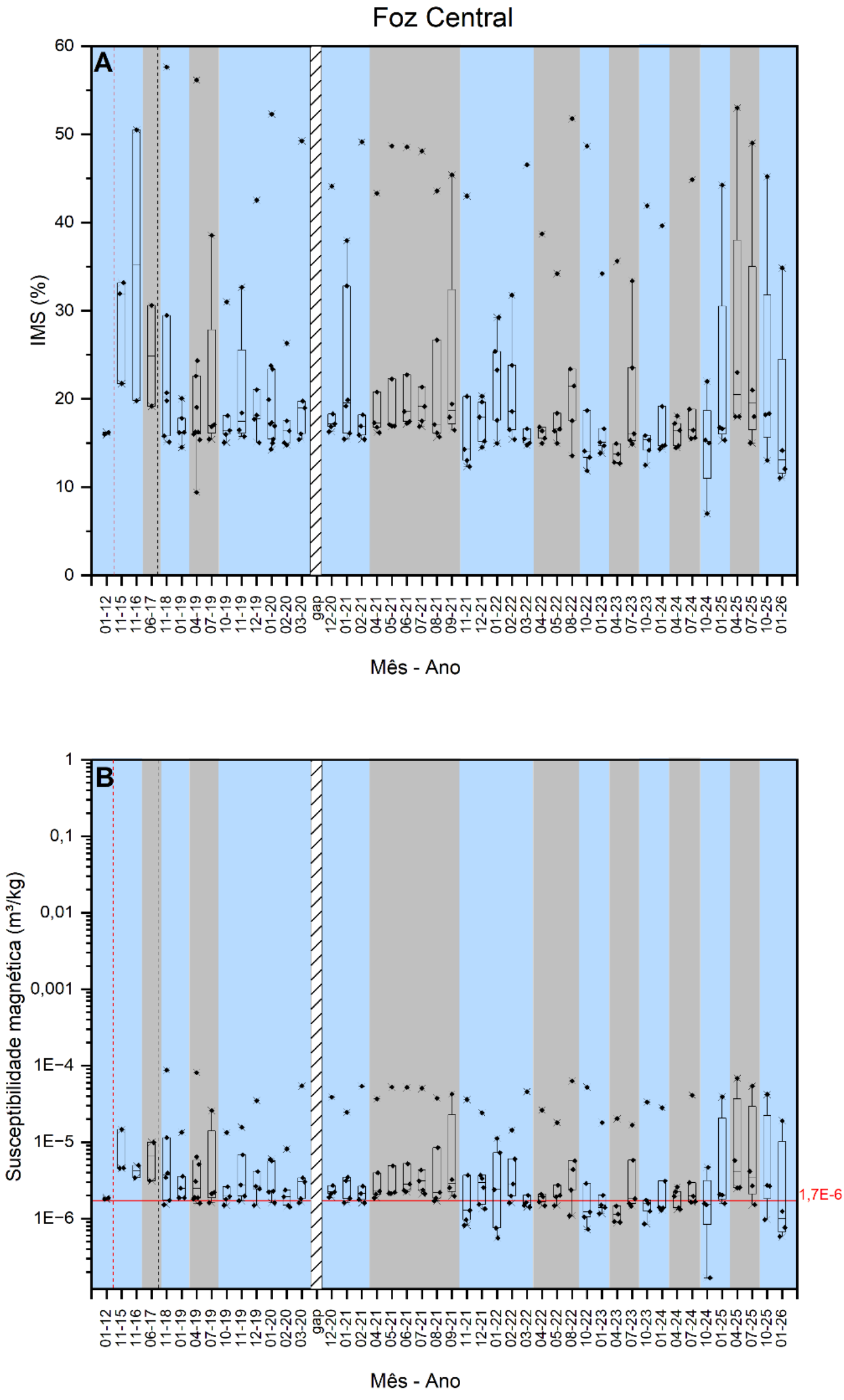


Figura 31**: (A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador do rejeito no sedimento); **B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest-UFES. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ($1.7x10^{-6}$) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

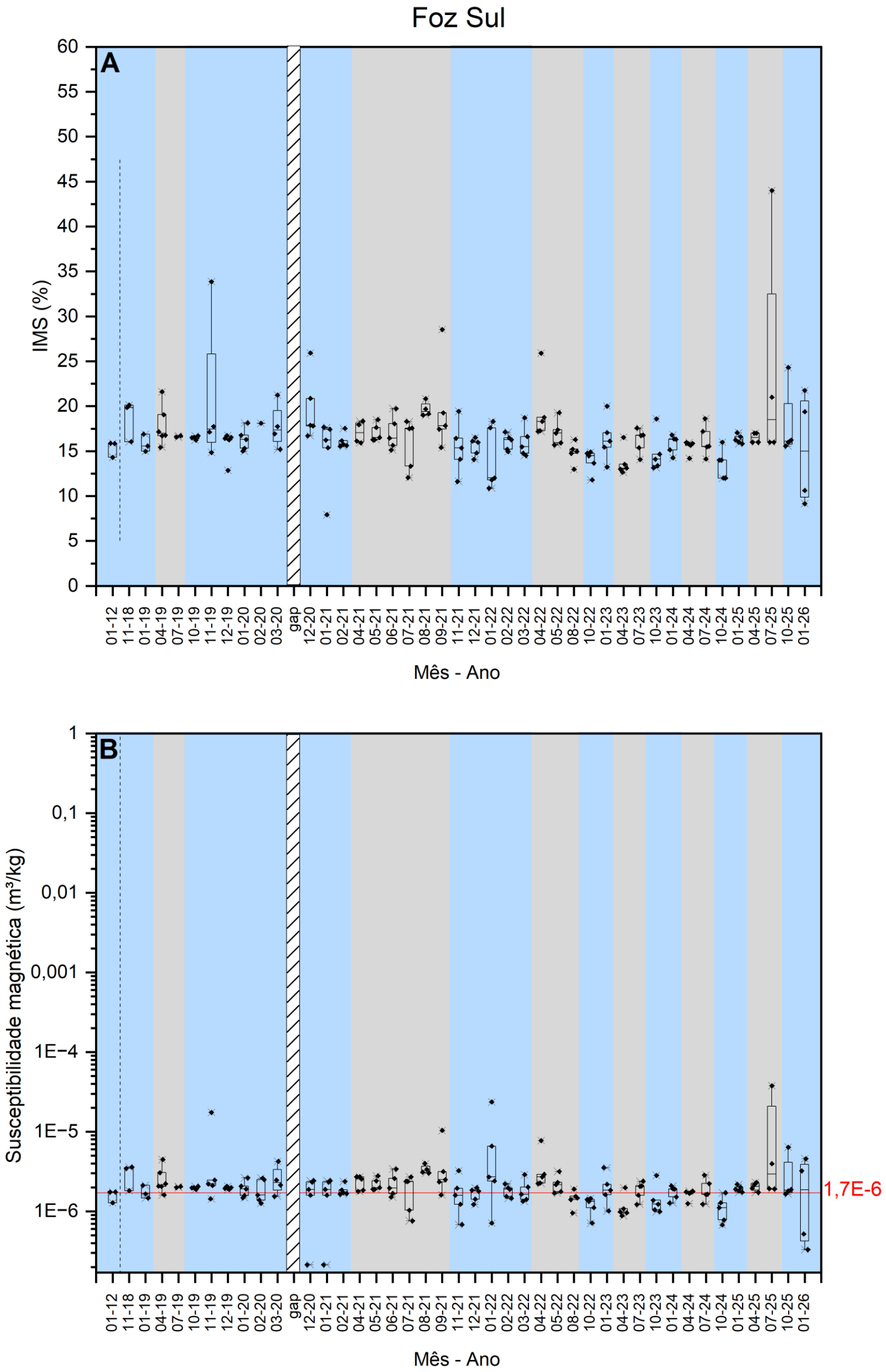
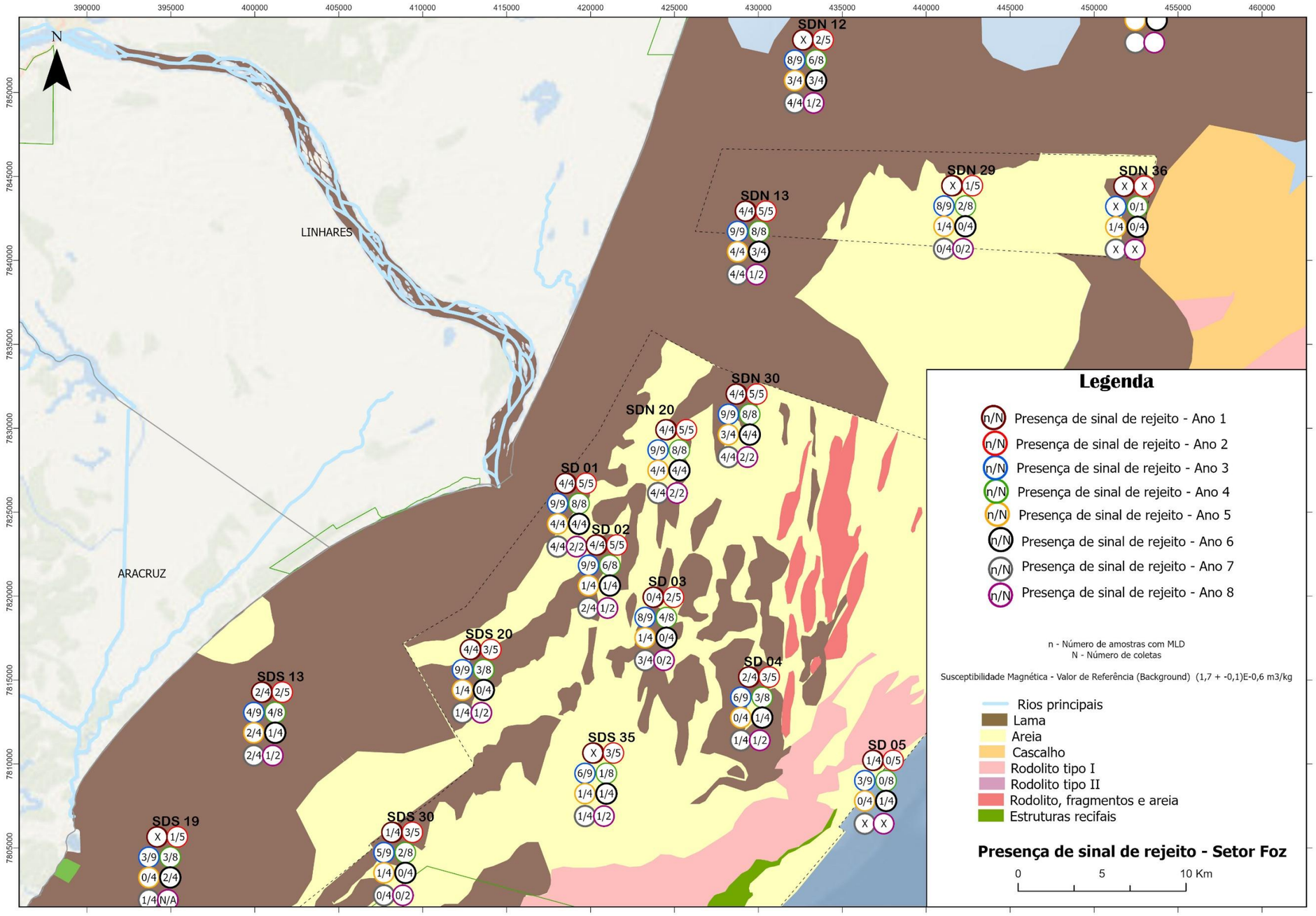


Figura 32: Indicativo da presença de sinal do rejeito para os Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um “X” são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção das estações após o Ano 1 de monitoramento. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES. N/A refere-se à exclusão dos resultados de SDS19 a partir de abril de 2025, conforme detalhado no Item 3.



O comportamento espaço-temporal do sinal de presença do rejeito no Setor Foz do rio Doce segue o padrão de transporte sedimentar na região marinha adjacente à foz do rio Doce, com maiores volumes sendo observados nas áreas mais rasas dos setores. O material apresenta uma direção preferencial de transporte para norte/nordeste, ocorrendo predominantemente em profundidades inferiores a 20 m a partir da Foz do rio Doce, conforme descrito por Quaresma *et al*. (2015). Esse padrão de transporte explica os valores mais elevados de sinal de rejeito no setor Foz Norte, quando comparados ao setor Foz Sul. Entre os setores da Foz do rio Doce (Figura 29 a Figura 31), os maiores valores de IMS (%) e de susceptibilidade magnética foram registrados no setor Foz Central (Figura 30). Apesar de o IMS (%) e a susceptibilidade magnética na Foz do rio Doce apresentarem uma redução em relação aos primeiros anos de monitoramento, os valores ainda permanecem acima dos de referência.

Os pontos mais rasos próximos à foz, como SD01, continuam apresentando altos valores de sinal de rejeito, sugerindo que o aporte de material associado ao MLD na região da foz tem se mantido constante. Esse padrão também é evidente nas estações do setor Foz Norte (Figura 29). A presença do sinal de rejeito (Figura 32) foi observada em todas as estações da Foz do rio Doce, sendo mais frequente nos pontos localizados em profundidades de até 20 m. O maior número de ocorrências da presença de sinal do rejeito na Foz, assim como no setor Norte, ocorreu no Ano 3. A partir do Ano 4, observa-se uma diminuição do número de ocorrências, porém, os pontos que ficam mais próximos a foz não apresentaram redução ao longo do período do monitoramento, indicando que o rejeito continua sendo aportado na região.

O Ano 6 marcou os menores números de ocorrência do sinal de rejeito para os setores Foz Norte e Foz Sul (Figura 32). O Ano 7 destacou-se como um período de intensificação da ocorrência do sinal de rejeito em todos os setores da Foz, com destaque para o Setor Foz Central (sendo registradas ocorrência da presença em todos os pontos). No Ano 8, observa-se uma nova queda, especialmente na Foz Norte, embora os números ainda se mantenham acima dos vales registrados nos Anos 5 e 6 (Figura 32).

Espacialmente, na região da Foz do rio Doce a maior ocorrência da presença de sinal do rejeito ocorre no setor Foz Norte seguido pela Foz Central.

Figura 33: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set-* o marcador de sinal do rejeito no sedimento) para o Setor APA Costa das Algas **(A)** Rasas e **(B)** Profundas; Valores de susceptibilidade magnética para o Setor APA Costa das Algas **(C)** Rasas e **(D)** Profundas. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados referente ao período de pandemia da COVID-19 onde as coletas foram interrompidas entre os meses de março e novembro de 2020. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ($1.7x10^{-6}$) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

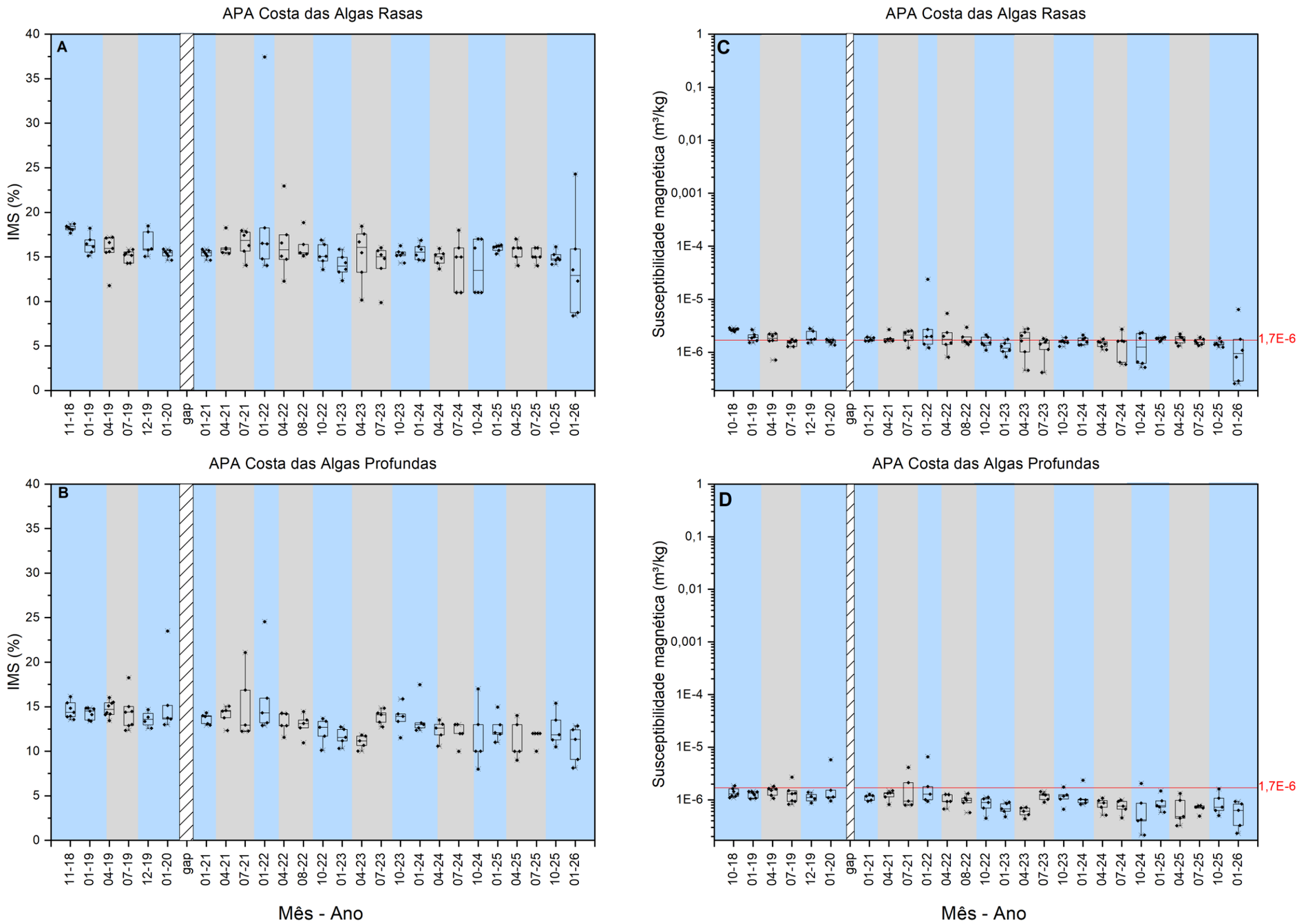
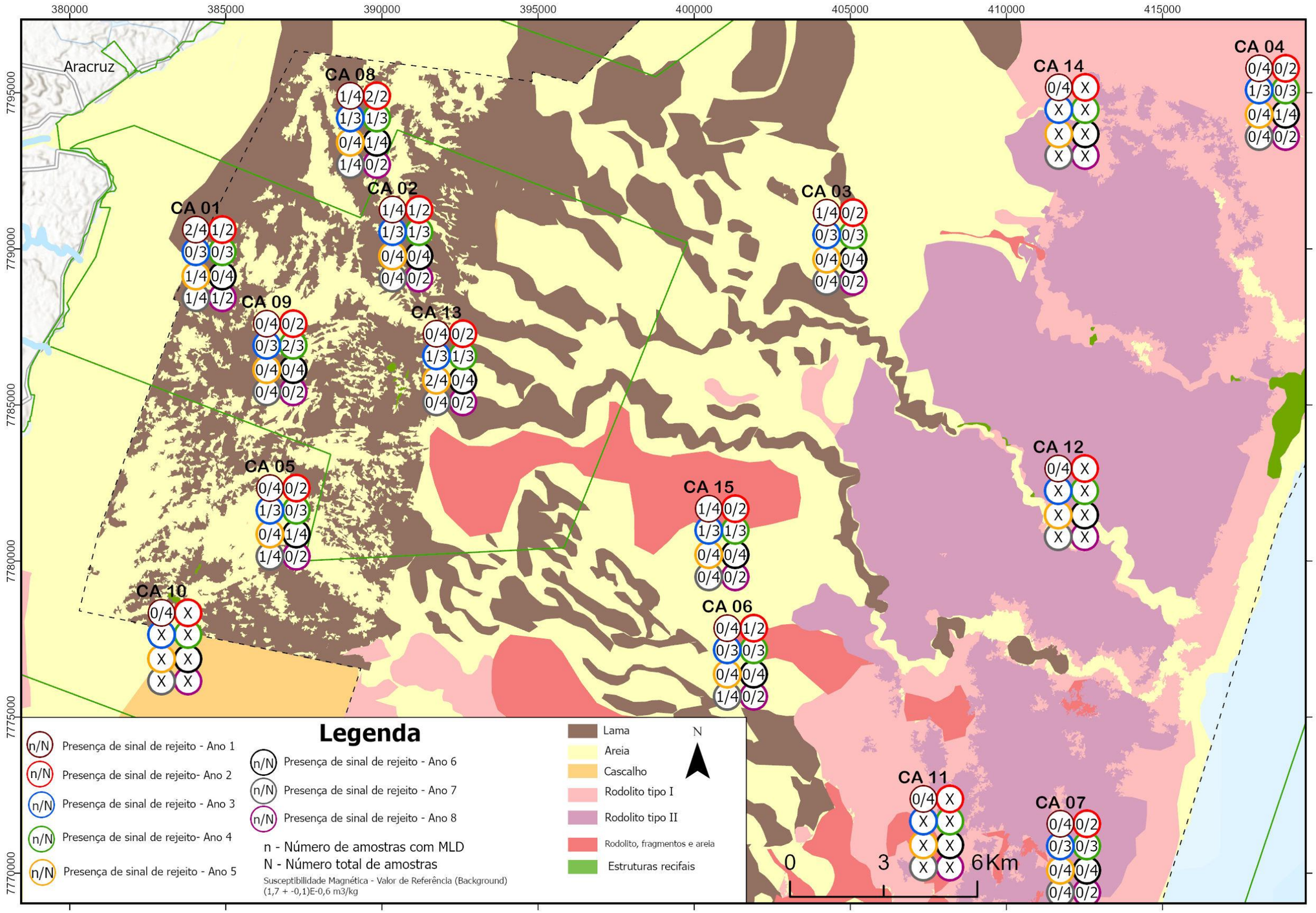


Figura 34: Indicativo da presença de sinal do rejeito para o Setor APA Costa da Algas para os Anos 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7 e 8 do PMBA/Fest-UFES. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Linha tracejada indica a área mapeada pelo tema. Os mosaicos com detalhamento de tipos de fundo foram produzidos pelo tema Sedimentação do PMBA/Fest-UFES e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.



Os valores de IMS e susceptibilidade magnética obtidos para o Setor APA Costa das Algas (Figura 33) mantiveram-se, predominantemente, próximos ao valor de referência, evidenciando estabilidade relativa ao longo do período monitorado. No entanto, observam-se diferenças marcantes entre os setores raso e profundo, tanto em magnitude quanto em tendência temporal.

No Setor APA Rasa, os valores da mediana de IMS variaram entre 12,91% e 18,20%. O máximo foi registrado no início da série (18,20%), enquanto a mediana mínima ocorreu no Ano 8 (12,91%). O setor apresentou relativa estabilidade até o Ano 4, seguida por declínio gradual nos anos subsequentes.

No Setor APA Profunda, os valores da mediana de IMS (%) foram sistematicamente mais baixos, variando entre 10% e 14,71%. O pico da mediana ocorreu no Ano 1 (14,71%), e os menores valores foram registrados no Ano 7 (10%). A tendência de declínio foi mais acentuada que no setor raso, com recuperação apenas parcial nos anos finais.

Os maiores valores de IMS para ambos os setores foram observados nos períodos chuvoso e seco do Ano 4, conforme indicado anteriormente.

Em relação à presença de sinal de rejeito (Figura 34), a análise espacial indicou maior ocorrência nas estações localizadas na região rasa do setor, até 36 m de profundidade (CA 01, CA 02, CA 05, CA 08, CA 09 e CA 13). Temporalmente, o pico de ocorrências ocorreu no Ano 3, seguido por tendência decrescente nos anos subsequentes. Essa redução manteve-se contínua, com exceção de um discreto incremento no Ano 7.

A correlação entre os valores de IMS e a presença de sinal de rejeito é consistente: o setor raso, com maiores percentuais de IMS, apresentou maior frequência espacial do sinal, enquanto o setor profundo, com valores mais baixos e declínio mais acentuado, registrou ausência total de sinal nos Anos 5 e 8 (Figura 34).

4. CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS ANOS DE MONITORAMENTO A CERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO

Considerando os processos sedimentares, observou-se uma diminuição nas concentrações de MPS após o grande aporte de material proveniente do rompimento da Barragem de Fundão nos primeiros meses (novembro de 2015 a janeiro de 2016). No entanto, os valores permaneceram superiores aos de referência (dados de 2013 e 2014 nos setores da Foz), especialmente durante eventos hidrológicos extremos no rio Doce. Segundo as observações realizadas, esses eventos hidrológicos representam o principal fator controlador dos picos de MPS no Setor Foz Central. Nos demais setores estudados, as variações de MPS estão associadas, não apenas à contribuição fluvial do rio Doce, mas também a um conjunto de fenômenos de alta energia na plataforma continental (como sistemas de frentes frias), que promovem a ressuspensão do sedimento de fundo. Na atualização mais recente da série histórica, observou-se tendência de aumento nas concentrações de MPS no setor Norte, atingindo, no Ano 8, nos maiores valores gerais da série para o período chuvoso, com destaque para a mediana registrada em janeiro de 2026.

Em contraste, os setores Foz Norte, Foz Sul e APA apresentaram redução expressiva no Ano 8, notadamente no período chuvoso, enquanto a Foz Central manteve elevada variabilidade e ocorrência de picos episódicos. De forma geral, os períodos secos apresentaram concentrações superiores às observadas nos períodos chuvosos, associadas à menor contribuição de matéria orgânica e maior ressuspensão sedimentar.

O setor Norte dos Recifes Esquecidos constitui um habitat de grande complexidade, caracterizado por estruturas recifais, vales incisos e formas de fundo diversas. Esta região representa a única evidência de recifes ao sul da plataforma de Abrolhos, formando pináculos e outras estruturas com mais de 5 metros de altura. Além das complexas características de um habitat recifal, a área se destaca pela presença de rodolitos, o que aumenta ainda mais sua importância ecológica. No que se refere aos indicadores analisados, observou-se um aumento significativo da concentração de MPS nas regiões de Barra Nova e Itaúnas, assim como um aumento na mobilidade do sedimento superficial de fundo. Também foi registrada uma maior frequência do sinal de rejeito nas estações mais rasas (DEG 01, DEG 02 e BS 01). Em decorrência disso, o impacto sobre a comunidade bentônica só foi observado no quarto ano de monitoramento, tanto no habitat arenoso e de rodolitos (Norte), quanto no de cascalho em Abrolhos (FEST, 2025). Contudo, os resultados não apresentaram consistência espaço-temporal durante os 7 anos de monitoramento ao longo desse setor.

A foz do rio Doce foi a área mais impactada pelo aporte do MLD, conforme evidenciado pelos indicadores analisados neste estudo e é caracterizada por uma diversidade de fundos, incluindo sedimentos lamosos e arenosos, com estruturas de rodolitos nas porções mais distantes da costa (FEST, 2025). Conforme descrito no anterior FEST (2025) observou-se uma série de barras arenosas lineares em direção offshore a partir da profundidade de 25 m sugerindo uma transição de fundos lamosos para os arenosos à medida que se afasta da costa. Esse padrão sugere que os materiais depositados nos fundos lamosos podem ser transportados para áreas mais profundas ou deslocados lateralmente. Essa dinâmica é corroborada pela detecção do MLD em amostras coletadas na região.

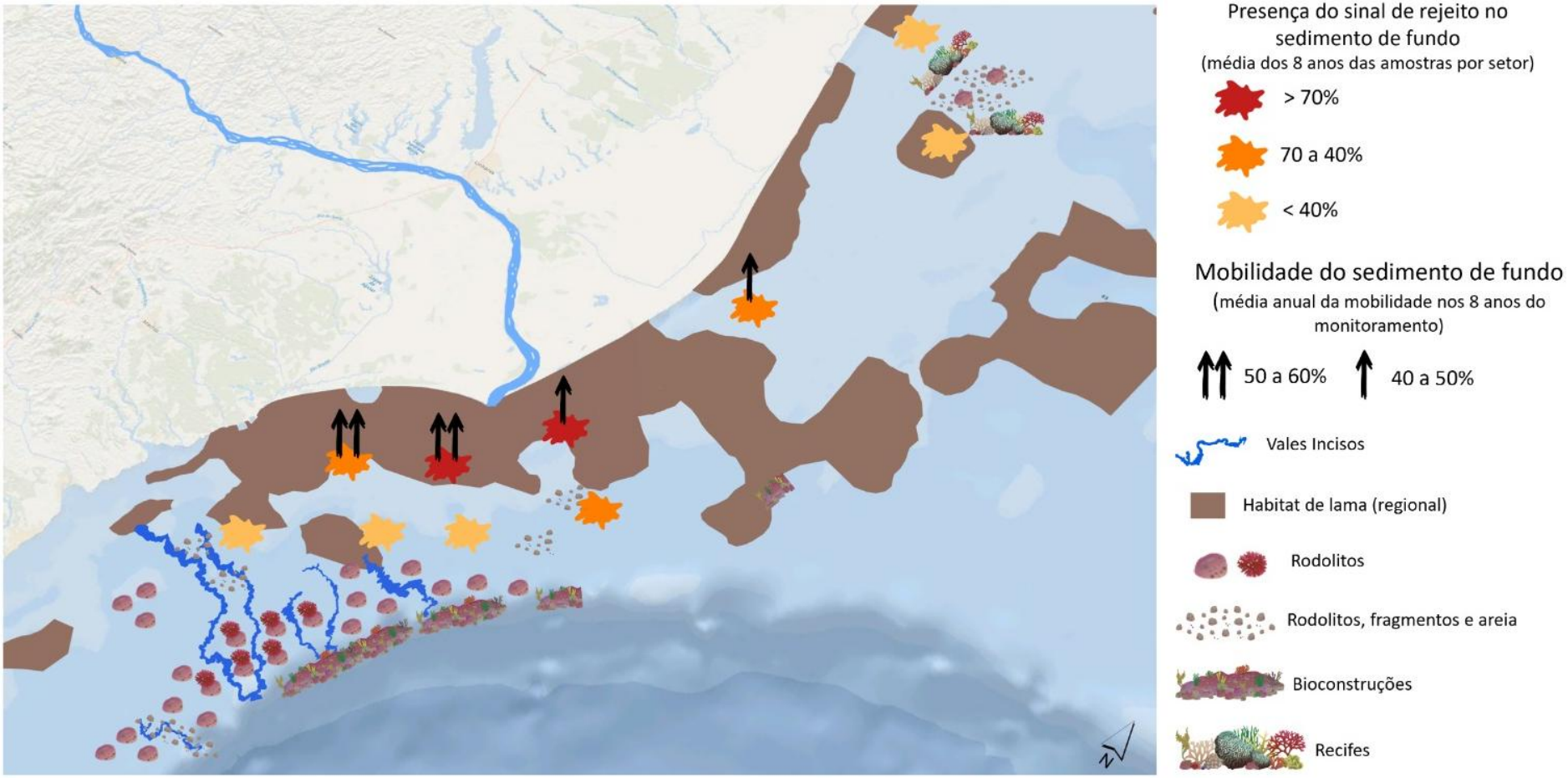
A avaliação da densidade do sedimento superficial e do indicador de potencial de mobilidade do fundo demonstra que o material trazido para a Plataforma Continental pelo rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão alterou as propriedades físicas do sedimento local. Essa mudança é visível na maior frequência de densidades de fundo mais baixas em comparação aos anos anteriores ao rompimento da barragem. Esse fenômeno, combinado com o aumento da energia das ondas na região (ou com a variabilidade intra e interanual), resulta em um maior potencial de ressuspensão do fundo, o que leva à maior mobilização do sedimento. Essa alteração persiste até hoje, provavelmente devido à continuidade do aporte de MLD à Plataforma Continental por meio do transporte fluvial ou a manutenção do material que chegou anteriormente. Isso é corroborado na plataforma interna do setor Foz Central, onde é possível observar de forma consistente o sinal de rejeito nos sedimentos de fundo e uma tendência de aumento significativo (p-valor < 0,05) da razão calculada (IMS%). Adicionalmente, observou-se tendência significativa de aumento da mobilidade sedimentar na Foz do rio Doce, associada à redução da densidade superficial do sedimento. A Foz Sul apresentou os maiores potenciais de mobilidade, enquanto a Foz Norte registrou os menores valores. Os dados do Ano 8

(janeiro/2026) foram desconsiderados nesta análise em razão da substituição do equipamento ADCP o que gerou uma inconsistência nos dados calculados.

Uma análise integrada dos dados de presença de rejeitos, potencial de mobilidade do sedimento de fundo e impacto na comunidade bentônica revelou que o habitat lamoso em frente à foz do rio Doce e na região ao norte, até aproximadamente 30 m de profundidade, apresenta baixa integridade, indicando um impacto significativo (FEST, 2025). Já na porção mais externa, em áreas com profundidade superior a 30 m, onde o habitat é predominantemente arenoso, os sinais de presença de rejeitos foram observados de forma menos constante ao longo dos anos de monitoramento. Essas observações se mantêm. Quanto à ocorrência de lama fluida, verificou-se comportamento interanual variável, com maiores frequências nos Anos 2 e 5, redução no Ano 7 e ausência no período chuvoso do Ano 8, exceto no setor Foz Sul, onde houve incremento no Ano 7.

No setor REVIS/APA Costa das Algas, nas estações rasas até 36 m de profundidade, foi observada a presença contínua do sinal de rejeito nos sedimentos de fundo ao longo de todo o período de monitoramento, com um aumento significativo (p-valor < 0,05) na concentração de MPS, revelando-se como a área de maior impacto neste setor. De acordo com o relatório FEST (2025), essa região apresenta uma grande complexidade morfológica e sedimentar alternando entre areia e lama na porção rasa e áreas com laterita, a porção mais profunda apresenta fundos de rodolitos e algas calcárias, além de estruturas recifais nas áreas offshore distais, como crostas e fundos rígidos, formadas por aglomerados de rodolitos; similares aos descritos na região do rio Doce. De forma semelhante, na região central, em direção à plataforma externa da APA Costa das Algas, há indícios da presença MLD e impactos na comunidade bentônica. No entanto, esses efeitos não são uniformes ao longo do tempo, uma vez que, em três estações de amostragem, o impacto foi detectado apenas uma vez, em anos distintos (Figura 34). É importante ressaltar que o habitat afetado foi o fundo de rodolito, um ambiente ecologicamente crucial e especialmente vulnerável ao aporte de material fino. Na atualização do indicador IMS, o setor raso manteve os maiores valores e maior ocorrência de sinal de rejeito, enquanto o setor profundo apresentou valores inferiores, tendência de declínio mais acentuada e ausência total de sinal nos Anos 5 e 8 (Figura 34).

Figura 35: Resumo gráfico dos principais resultados encontrados ao longo dos 8 anos do monitoramento. A presença do sinal de rejeito e a mobilidade do fundo são as médias destes resultados ao longo dos 8 anos de monitoramento.



5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Os dados da campanha de julho de 2024 (Ano 6), referentes ao percentual de mobilidade do sedimento do fundo na foz do rio Doce, não foram incluídos na análise devido a inconsistências nos resultados. Durante a etapa de análise, identificamos que essas inconsistências estavam relacionadas a um erro de amostragem. As causas do erro foram devidamente identificadas e corrigidas, com ajustes necessários nos protocolos de coleta.

6 REFERÊNCIAS

AMOS C.L., SUTHERLAND T.F. A rapid technique for the determination of dry sediment mass from saturated marine sands. Journal of Sedimentary Research, 64(3):668-670. 1994.

BLOTT, S.J.; PYE, K. GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. Earth Surface Processes and Landforms, 26, 1237-1248, 2001.

CLIMATE FORECAST SYSTEM REANALYSIS, chamados de Dados de Reanálises, disponível em: <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/climate-forecast-system-reanalysis-cfsr>. Acesso em: 11 de setembro de 2023.

DIAS, J.A. A análise Sedimentar e os Conhecimentos dos Sistemas Marinhos, Universidade do Algarve Faro, Portugal, 84 p., 2004.

FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/Fest–RT-49, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática.341.pag. 2025

GRAZULIS, S., CHATEIGNER, D., DOWNS, R. T., YOKOCHI, A. F. T., QUIROS, M., LUTTEROTTI, L., MANAKOVA, E., BUTKUS, J., MOECK, P. & Le Bail, A. (2009). J. Appl. Cryst. 42, 726-729.

ISO, 1995. Soil quality, extraction od trace elements soluble in aqua regia -ISO 11466.

KENDALL, M. G. Rank correlation methods. London: Griffin, 1975. 202 p.

KOMADA, T.; ANDERSON, M. R.; DORFMEIER C. L. Carbonate removal from coastal sediments for the determination of organic carbon and its isotopic signatures, δ13C and Δ14C: comparison of fumigation and direct acidification by hydrochloric acid. Limnology and Oceanography Methods, 6, 254–262, 2008.

MCANALLY W. H. *et al.* Management of Fluid Mud in Estuaries, Bays, and Lakes. I: Present State of Understanding on Character and Behavior. Journal of Hydraulic Engineering. 133, 9-22, 2007.

MANN, H. B. Nonparametric Tests Against Trend. Econometrica, 13(3), 245–259, 1945.

MITCHELL, S. B.; UNCLES, R. J.; STEPHENS, J. A. Suspended Particulate Matter: Sampling and Analysis. In: Uncles, R. J.; Mitchell, S. B. Estuarine and Coastal Hydrography and Sediment Transport. Cambridge: Cambridge University Press. cap. 7, p. 179-210, 2017.

MITCHENER, H.; TORFS, H. Erosion of mud/sand mixtures. Coastal Engineering 29, 25, 1996.

MOOK, D. H.; HOSKIN, C. M. Organic determinations by ignition: caution advised. Estuarine and Coastal, Shelf Science. 15: 697–699, 1982.

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

OLIVEIRA, K.S.S. Influência das condições de vento, de ondas e do aporte fluvial na dinâmica sedimentar do trecho centro-norte da Plataforma Continental do Espírito Santo (PCES). Tese de Doutorado. Universidade Federal do Espírito Santo. 2018

ORLANDO, M. T. *et al.* Tracing iron ore tailings in the marine environment: An investigation of the Fundão dam failure. Chemosphere, v. 257, p. 127184–127184, out. 2020.

QUARESMA, V.S. *et al.* Modern sedimentary processes along the Doce river adjacent continental shelf. Brazilian Journal of Geology, 45(4), 635–644, 2015. https://doi.org/10.1590/2317-488920150030274

QUARESMA, V.S. *et al.* The effects of a tailing dam failure on the sedimentation of the eastern Brazilian inner shelf. Continental Shelf Research, 205, 104172, 2020.

QUARESMA, V. S.; *et al.* The impact of trace metals in marine sediments after a tailing dam failure: the Fundão dam case (Brazil). Environmental Earth Sciences, v. 80, p. 570-586, 2021.

ROLLINSON, H. Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation. Longman Group U. K. (Edit.), England, 350 p., 1993.

RRDM, Rede Rio Doce Mar. RT-39D - Evolução Espaço Temporal na Qualidade Ambiental e na Biodiversidade no Ambiente Marinho, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. 1409 pag. 2021.

SOULSBY, R. Dynamics of Marine Sands A Manual for Practical Applications. Thomas Telford, London, 1997.

WINTERWERP, J. C.; VAN KESTEREN, W. G. M. Introduction to the physics of cohesive sediment dynamics in the marine environment, 1 Ed. Elsevier, Amsterdam. 466p., 2004.

YUE, S.; PILON, P.; CAVADIAS, G. Power of the Mann-Kendall and spearman's rho tests for detecting monotonic trends in hydrological series. Journal of Hydrology, Amsterdam, v. 259, n. 1-4, p. 254-271, Mar. 2002.