

**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- 43/ JUN 23

RA2022 PMBA/FEST

Vitória,

Junho de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	METODOLOGIA	3
2.1	COLETA	3
2.1.1	Sedimentologia (Marinho Integrado)	3
2.1.2	Mapeamento de habitat	4
2.2	ANÁLISE.....	5
2.2.1	Análise de Material Particulado em Suspensão (MPS).....	5
2.2.2	Análise de sedimento superficial de fundo e de testemunhos	5
2.2.3	Análise de densidade	6
2.2.4	Análise de mobilidade do fundo	6
2.2.5	Análise mineralógica do sedimento superficial e testemunhos	6
2.2.6	Análise geoquímica do sedimento em testemunhos	8
2.2.7	Mapeamento de habitat e avaliação da vulnerabilidade do ecossistema.....	8
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	10
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	11
3.1	MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO - (MPS) E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA (% MO)	12
3.2	POTENCIAL DE MOBILIDADE DO SEDIMENTO SUPERFICIAL DE FUNDO	34
3.3	VALORES DE IMS (<i>IRON MINERALOGICAL SET</i>) E PRESENÇA DO SINAL DE REJEITO NO SEDIMENTO DE FUNDO	41
3.4	VALORES DE IMS (%) PARA DETERMINAÇÃO DO ACÚMULO DE REJEITO NO DEPÓSITO SEDIMENTAR: EVOLUÇÃO DO ACÚMULO DE REJEITO NO FUNDO MARINHO ENTRE 2018 E 2021	52
3.5	EXTENSÃO E INTEGRIDADE DE HABITAT MARINHO	54
4	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	57
5	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

O histórico de malha e frequência amostrais do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) abrange informações de suma importância para o balizamento do presente programa, uma vez que passou por modificações ao longo do tempo, visando melhor atender aos objetivos do PMBA/Fest. Estas alterações foram aprovadas pela Câmara Técnica da Biodiversidade (CTBio) por meio de: (1) ofício SEI nº 1/2020-CTBio/DIBIO/ICMBio, de outubro de 2019 (para o período de transição) e (2) Proposta Técnica de continuação do monitoramento, apresentada no primeiro semestre de 2022 visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) **MS - Malha e frequência amostrais**, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) **MS – Mapas das malhas amostrais**, com a espacialização referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais coletadas entre setembro de 2018 e setembro de 2019, “Transição” às estações entre outubro de 2019 e julho de 2022 e “Novo Ciclo” referente às estações amostrais coletadas a partir de agosto de 2022.

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 submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em 31 de agosto de 2022. 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 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 a 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 de água é amostrada. A água coletada é armazenada em garrafas de

plástico de 1 L, devidamente limpas e identificadas, e acondicionadas sob refrigeração ($\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) 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 ($\approx 4\text{ }^{\circ}\text{C}$) e ao abrigo da luz até análise em laboratório para evitar produção de matéria orgânica.

Os resultados dos indicadores (MPS, mobilidade do sedimento de fundo e sinal do rejeito – IMS), 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.

2.1.2 Mapeamento de habitat

Os dados de batimetria multifeixe são obtidos com o ecobatímetro multifeixe (fabricante R2Sonic2024), utilizando a frequência de 170 KHz. O software QINSy é utilizado na aquisição, e para o processamento e análise dos registros batimétricos e de *backscatter* são utilizados os softwares *Qimera*, *Fledermaus*, *FMGT* e *Caris Hips and Sips*. O plano de linhas de navegação para a aquisição dos dados foi construído de modo a atender a uma sobreposição de 30% entre as linhas de sondagem. A calibração dos ângulos de arfagem da montagem do equipamento conhecida como *Patch Test* - em que são calculados os ângulos de *roll*, *pitch* e *yaw*, foi realizada sempre ao início de cada campanha, ou quando por alguma eventualidade no campo houve uma alteração na posição do ecobatímetro. A cada 3 horas são adquiridos perfis verticais de velocidade do som ao longo da coluna d'água, visando a correção de efeitos de refração dos feixes do ecobatímetro, evitando assim artefatos e interpretações errôneas do fundo marinho. Utilizando uma maré prevista, durante o levantamento hidrográfico há um controle contínuo da qualidade dos dados batimétricos.

Em laboratório, os registros batimétricos são corrigidos com os dados de oscilações da maré obtidos por meio de um *Acoustic Doppler Current Profiler* (ADCP), tratados e disponibilizados pela equipe do Ambiente Marinho – Tema -Modelagem Numérica. Dados de batimetria de multifeixe (sistema Reson 7101, sistema inercial DMS05 e DGPS) coletados em 2017 pelo Laboratório de Oceanografia Geológica (LaboGeo-*Marine Geosciences Lab*) do Departamento de Oceanografia (DOE) da UFES foram incorporados na análise, considerando inclusive a não repetição das áreas que já haviam sido imageadas. Tal conjunto de dados faz parte de uma dissertação de mestrado defendida e de uma tese de doutorado em andamento, ambas desenvolvidas no LaboGeo.

Filmagens de fundo são gravadas pelo sistema de *drop* câmeras com GoPros Hero 7 acopladas. A *drop* câmera é composta por duas câmeras e lanternas acopladas a uma estrutura metálica piramidal de base 60 x 60cm, onde uma câmera filma o fundo ortogonalmente e a outra panoramicamente, durante dois minutos, em triplicata. Dos vídeos coletados são geradas imagens instantâneas (frames),

que permitem estimar a densidade dos principais organismos visualizados, suas formas, tamanhos, vitalidade e cobertura dos elementos das formações recifais, bancos de rodolitos e fundos lamosos/arenosos, lamosos e cascalhosos.

Foram coletados 10 testemunhos ao longo da plataforma continental do Espírito Santo (entre a região da APA Costa das Algas e Barra Nova), a coleta ocorreu entre os dias 8 a 9 de maio de 2021, com auxílio de um testemunhador (*Gravity Corer*) para análises no Ano 3. Os testemunhos referentes ao Ano 1 foram coletados em novembro de 2018.

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 e de testemunhos

Os testemunhos foram coletados e colocados sob refrigeração, após chegada em laboratório foram abertos e fatiados de 2 em 2 centímetros. As amostras sedimentares (tanto dos testemunhos quanto de 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 (CaCO₃) 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 pesado 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; 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); $0,015 \cdot (\text{densidade úmida} - 1000)^{0,73}$. Para o cálculo foram considerados somente os dados de densidade coletados durante o PMBA/Fest.
- 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 ($\tau = -\rho \langle u' w' \rangle$), 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 e testemunhos

As análises mineralógicas foram realizadas nas frações lamosas (tamanho do grão $< 0,63 \mu\text{m}$), 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. Havendo discrepâncias, as amostras seguem para análise em fluorescência de raios-x para determinação química elementar e são novamente submetidas à difratometria por período de 14 horas. 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, 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 das áreas dos picos de intensidade do sinal por comparação entre picos de espécies diferentes (refinamento Rietveld).

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 $\pm 5\%$ 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 (χ_{ac}) 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 rejeito 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 ($\text{FeO}_{\text{total}}$). Para caracterização da química mineral foram considerados como parâmetro o ferro total ($\text{FeO}_{\text{total}}$), a alumínio (Al_2O_3), a sílica (SiO_2) 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 em Orlando *et al.* (2020).

Quando ao indicador IMS (*Iron Mineralogical Set* - IMS), foi determinado 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 rejeitos no sedimento.

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








2.2.6 Análise geoquímica do sedimento em testemunhos

Os resultados das análises geoquímicas em testemunhos foram apresentados no Relatório Anual de 2021 (RRDM, 2021) e, portanto, não serão repetidas aqui. Desta maneira, a metodologia para esta análise não será apresentada neste material suplementar.

2.2.7 Mapeamento de habitat e avaliação da vulnerabilidade do ecossistema

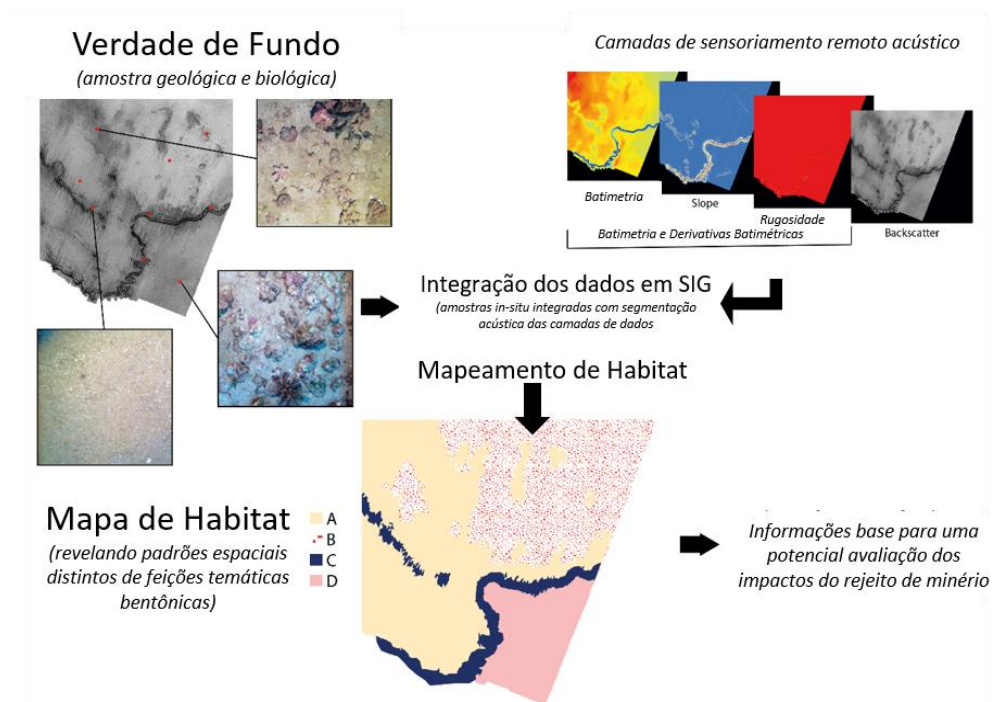
A base de dados coletada e utilizada para as análises consiste em dados acústicos (batimetria multifeixe e *backscatter*) e na validação através de verdades de campo (imagens de *drop* câmeras ou amostras de sedimento). Devido à alta turbidez na coluna d'água, não foi possível obter imagens do fundo na região do Rio Doce. Para as análises de imagens de fundo foi adotada uma padronização da categorização com base em modelos estabelecidos, como o CATAMI (*Collaborative and Automated Tools for Analysis of Marine Imagery*) (Althaus et al, 2015), e o EUNIS (*European Nature Information System*) (Connor et al, 2017), visando obter uma hierarquia baseada em características físicas, e quando possível biológicas. Apesar do EUNIS não estar diretamente relacionado com categorização de imagens, o mesmo foi usado para entender os níveis de detalhes que podemos alcançar com sua classificação. Entretanto, sua aplicabilidade acaba sendo diferente conforme o nível de detalhe que se consegue identificar nas imagens e no tipo de habitat encontrado. Essa padronização foi realizada em todas as áreas imageadas e até o momento foi combinada com as camadas de sensoriamento remoto acústico referentes às áreas mapeadas na RVS-SC/APA-CA Rasa e na área dos Recifes Esquecidos. A Tabela 1, sumariza as sete categorias

Tabela 1: Categorias de imagens padronizadas para todas as áreas de coleta com exemplos de imagem e uma breve descrição para cada uma.

Categorias	Exemplo de imagem	Breve descrição das categorias
Areia com bioclasto		Areia com cascalho/fragmentos carbonáticos
Areia fina/lama		Areia misturada com sedimentos mais finos tipo lama
Alga calcária e areia		Areia com grande quantidade de alga calcária (rosados e formato pontudo) entre outros fragmentos carbonáticos esbranquiçados
Rodolito		Rodolitos em alta concentração com muitas macroalgas associadas e alguns podendo ter algas calcárias
Rodolito, fragmento de alga calcária e areia		Rodolitos mais espaçados com fragmentos de alga calcária (rosados e formato pontudo) entre outros fragmentos carbonáticos esbranquiçados
Bioconstrução		Crostas biogênicas, tridimensionais formadas por alga calcária e/ou rodolitos
Recife de coral		Estruturas tridimensionais com alta biodiversidade de corais e macroalgas

A partir do conjunto de dados de imagens e camadas das derivadas batimétricas com a própria batimetria e *backscatter*, técnicas de segmentação e classificação do fundo marinho foram aplicadas (ferramentas do ArcGis Pro como *Isocluster* e *Support Vector Machine*) e integradas em plataforma SIG (Figura 1).

Figura 1: Fluxograma indicando as etapas metodológicas para o mapeamento de habitat em alta resolução.



2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

A partir do Ano 2 a metodologia de análise da susceptibilidade magnética passou a ser realizada nas análises mineralógicas.

O equipamento LISST (*Laser In-Situ Scattering and Transmissometry*; concentração e diâmetro das partículas em suspensão) passou a não ser utilizado a partir do Ano 02.

A partir da campanha de agosto/2022 (Ano 4), as amostras de sedimento de fundo para as análises de granulometria do tema Bentos de Fundos Inconsolidados não foram mais coletadas e analisadas por esse tema.

A partir de agosto/2022 (Ano 4), os temas Sedimentologia e Mapeamento de Habitats passaram a ser tratados de forma única com a nomenclatura Sedimentação Marinha.

A partir de agosto/2022 (Ano 4) a coleta e análise de testemunhos deixou de fazer parte do escopo do projeto considerando que as análises até o momento já mostram o acúmulo de rejeito nos diferentes pontos de coleta (ver este material suplementar). O monitoramento da presença ou ausência de rejeito continua a ser feito no sedimento superficial.

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 e obtidos ao longo do monitoramento (setembro/2018 – setembro/2022) 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 a gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo de quatro anos de monitoramento, onde seus principais resultados foram discutidos em todos os relatórios técnicos entregues até o presente, entretanto a partir do novo modelo de relatório solicitado via ofício SEI nº 85/2022-CTBio/DIBIO/ICMBio, proposto via ofício FR.2023.0214 (SEI13515133) e aprovado via ofício SEI nº4/2023-CTBio/DIBIO/ICMBio, a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

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

Figura 2: **(A)** Vazões medianas mensais (m³/s) do Rio Doce. **(B)** Carga de sedimento em suspensão total mensal (QSS - ton/dia) do Rio Doce. Os dados foram coletados na estação P21 em Linhares (Ambiente Dulcícola - PMBA/Fest) 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; outubro de 2020 a setembro de 2021) e do Ano 4 (barra roxa; outubro de 2021 a setembro de 2022) PMBA/Fest.

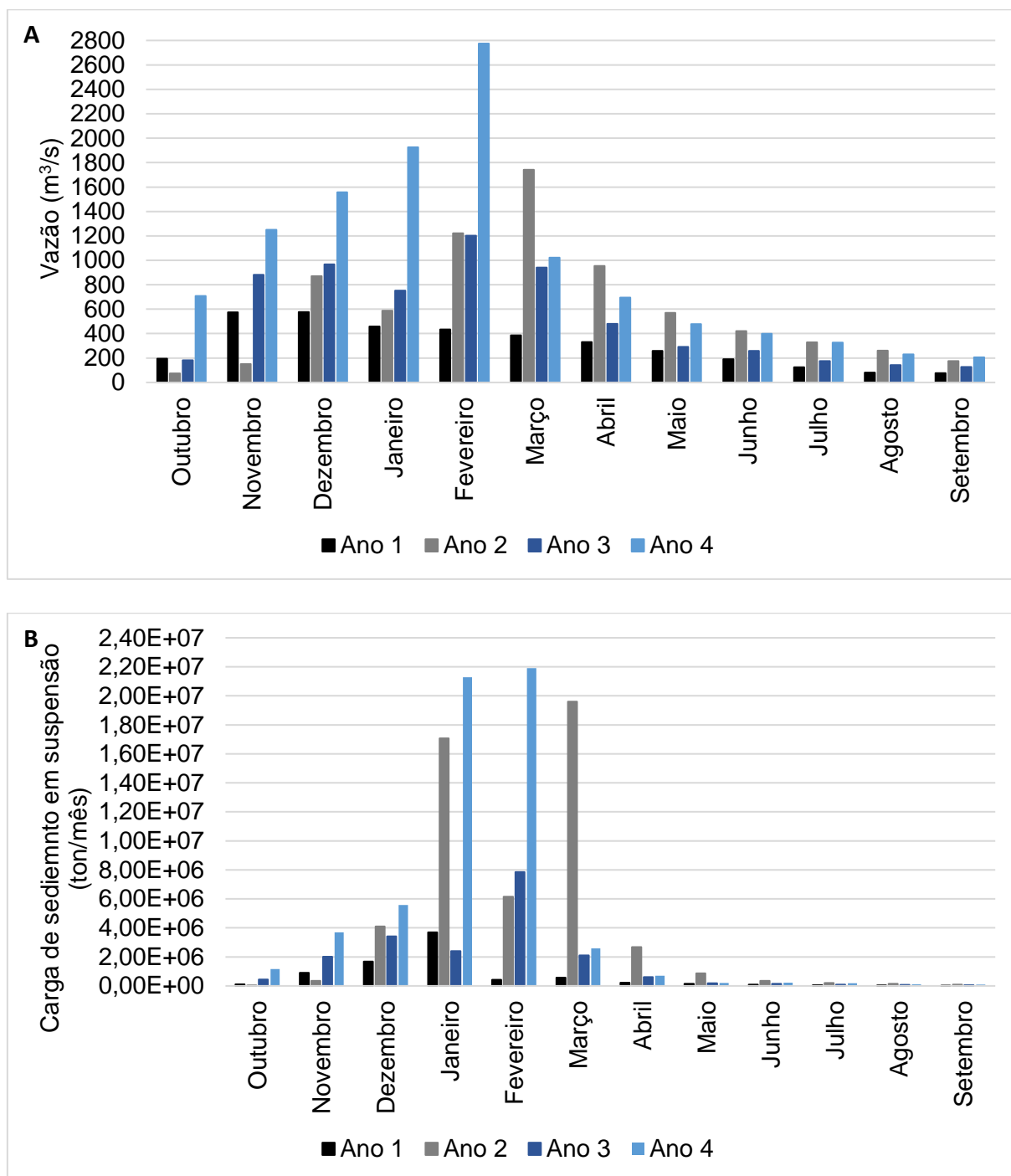


Figura 3: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS; caixas pretas) e teor de matéria orgânica (MO; caixas azuis) do MPS para amostras de água coletadas **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do sedimento) da coluna d'água para o Setor Abrolhos. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos pretos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de MPS para esse setor. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do ANO 4 (janeiro/2021). Não ocorreram coletas no período seco para esse setor devido a uma alteração da malha amostral, a qual não abrange mais esse setor.

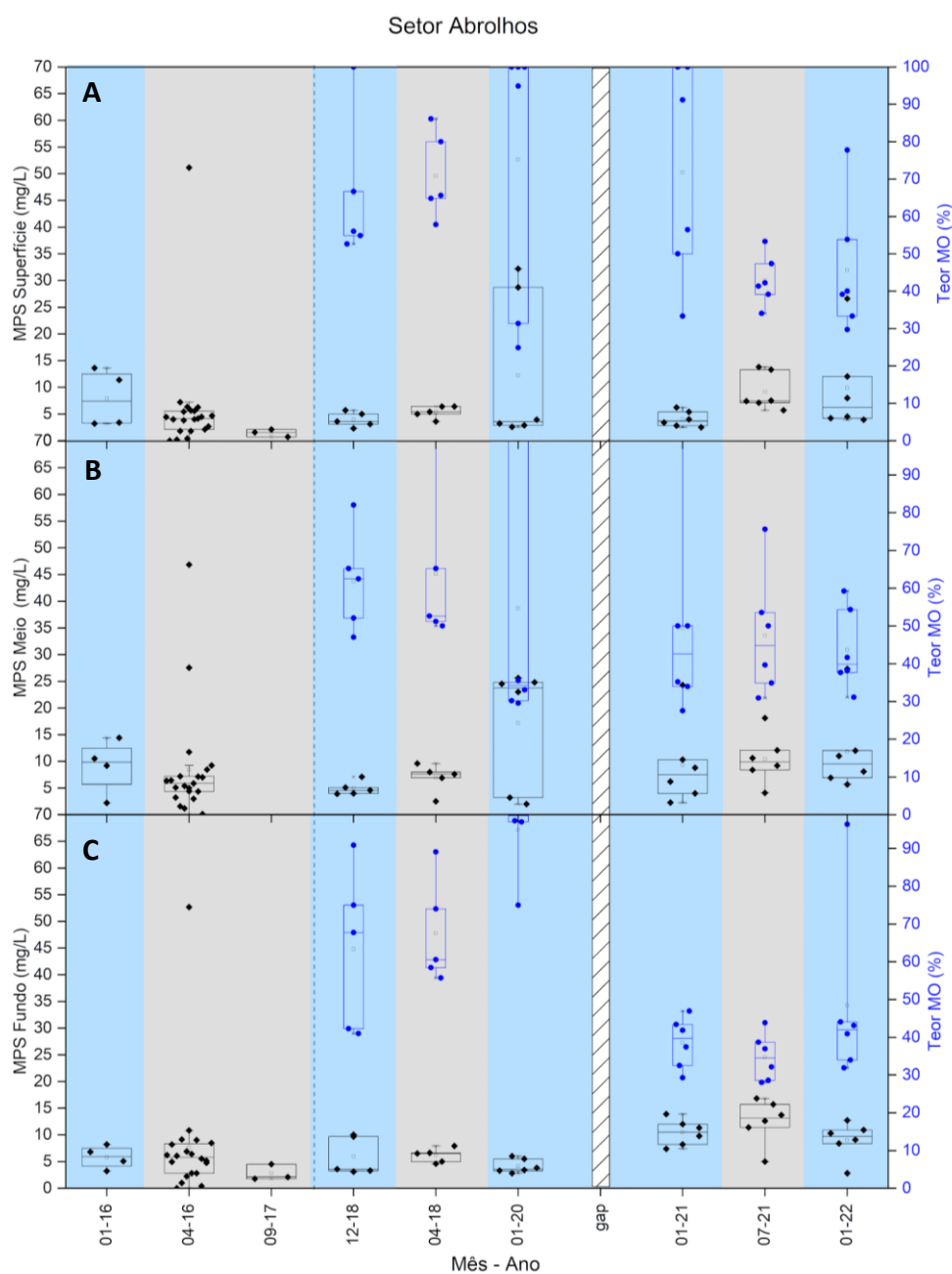
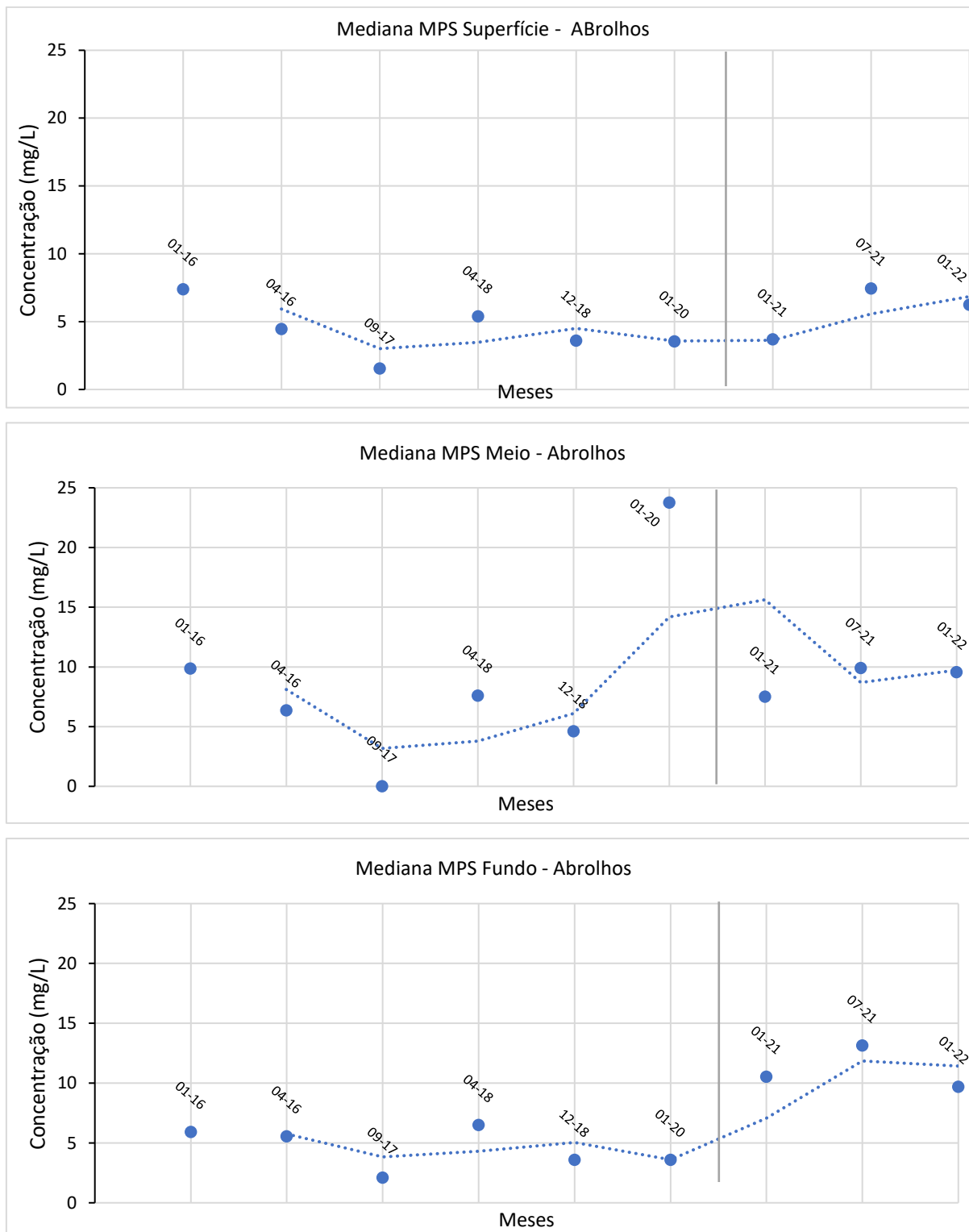


Figura 4: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Abrolhos. Linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.



O Setor Abrolhos tem mostrado influência dos eventos hidrológicos dos rios que deságuam no próprio setor, assim o aumento das concentrações de MPS foram observadas durante ou logo após chuvas de moderada a forte intensidade no centro – norte do Espírito Santo e sul da Bahia. Dessa forma, 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 (setembro 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 5: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS; caixas pretas) 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 sedimento) 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. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos pretos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de MPS para esse setor.

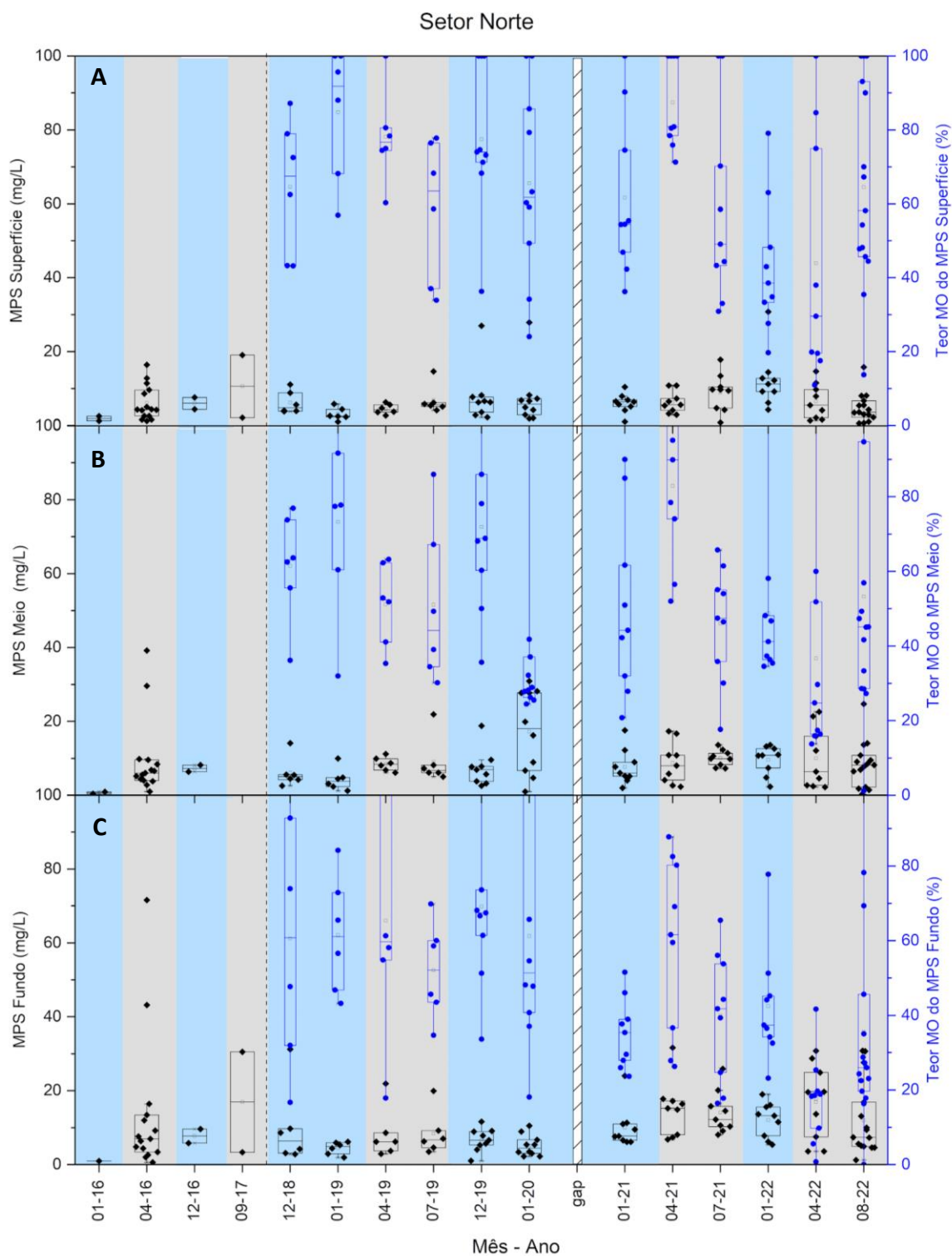
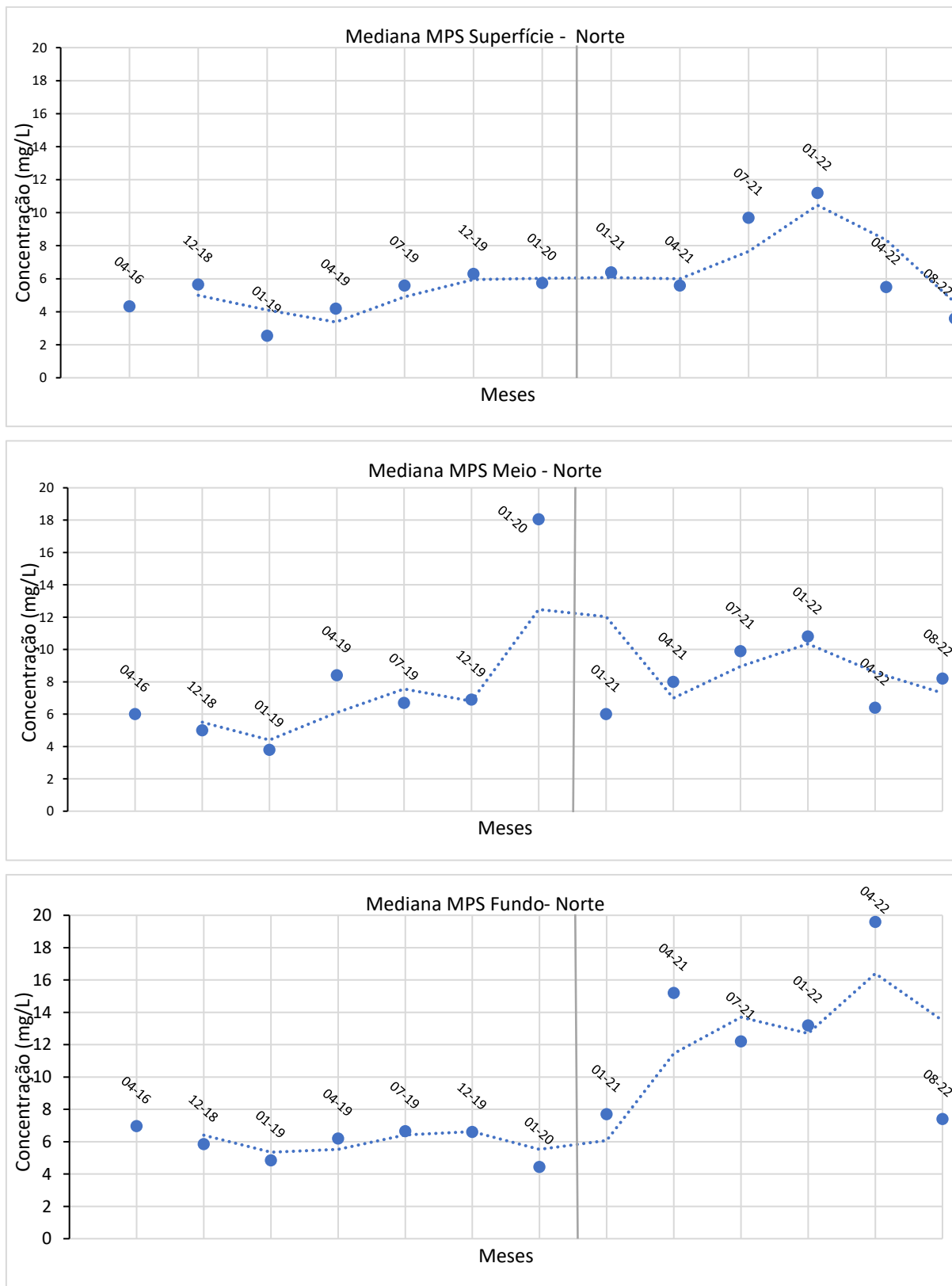


Figura 6: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Norte. Linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.



As estações que apresentaram aumento significativo da concentração de MPS no Setor Norte ao longo do monitoramento, foram as estações de Barra Nova e Itaúnas. De maneira geral, para esse setor as maiores concentrações de MPS para as profundidades Superfície e Meio ocorreram no Ano 2,

resultantes de um período chuvoso mais intenso para todo centro – norte do Espírito Santo. Entretanto, quando foram considerados os dados das campanhas do período seco do Ano 4 (campanhas de abril e agosto 2022), foi observado um aumento das concentrações de MPS, principalmente para o fundo da coluna d'água, ligados aos eventos de ressuspensão de fundo. Vale ressaltar que no Setor Norte, a análise da variação espaço-temporal da concentração de MPS e do teor de MO no MPS mostra o efeito significativo dos eventos de ressuspensão na dinâmica sedimentar.

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 sedimento) 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. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. 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 vinho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

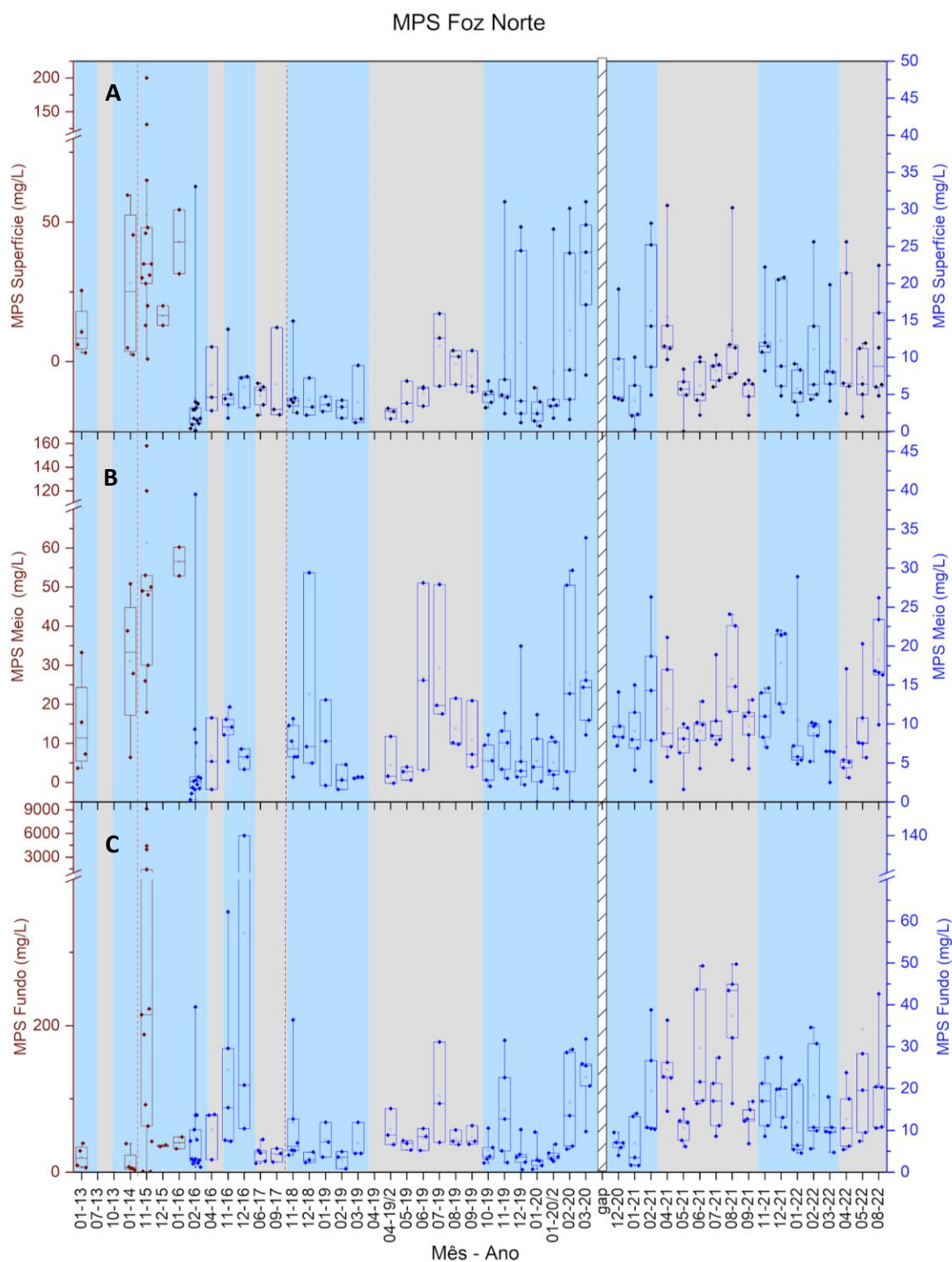


Figura 8: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Foz Norte desde janeiro/2013. Linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão. Linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.

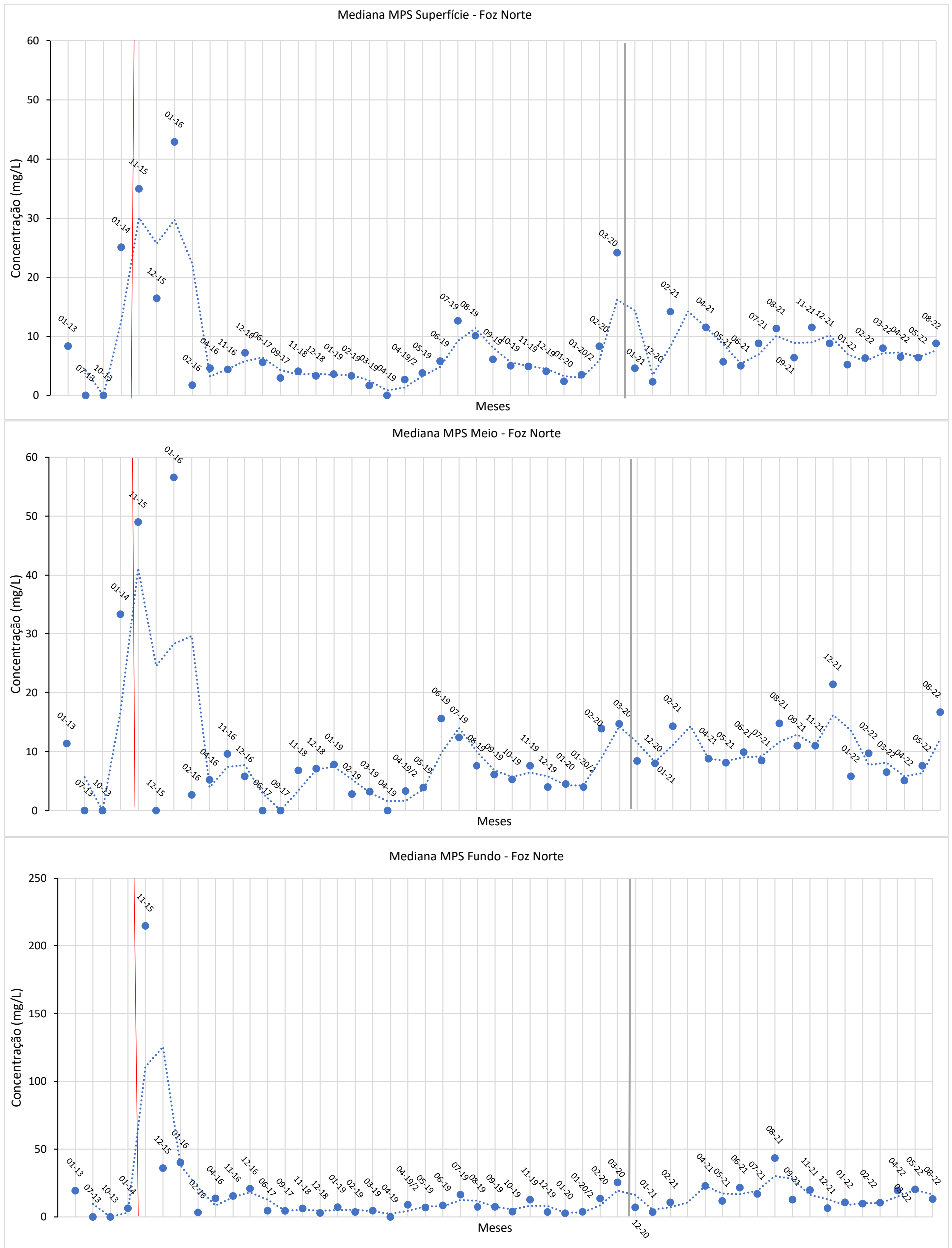
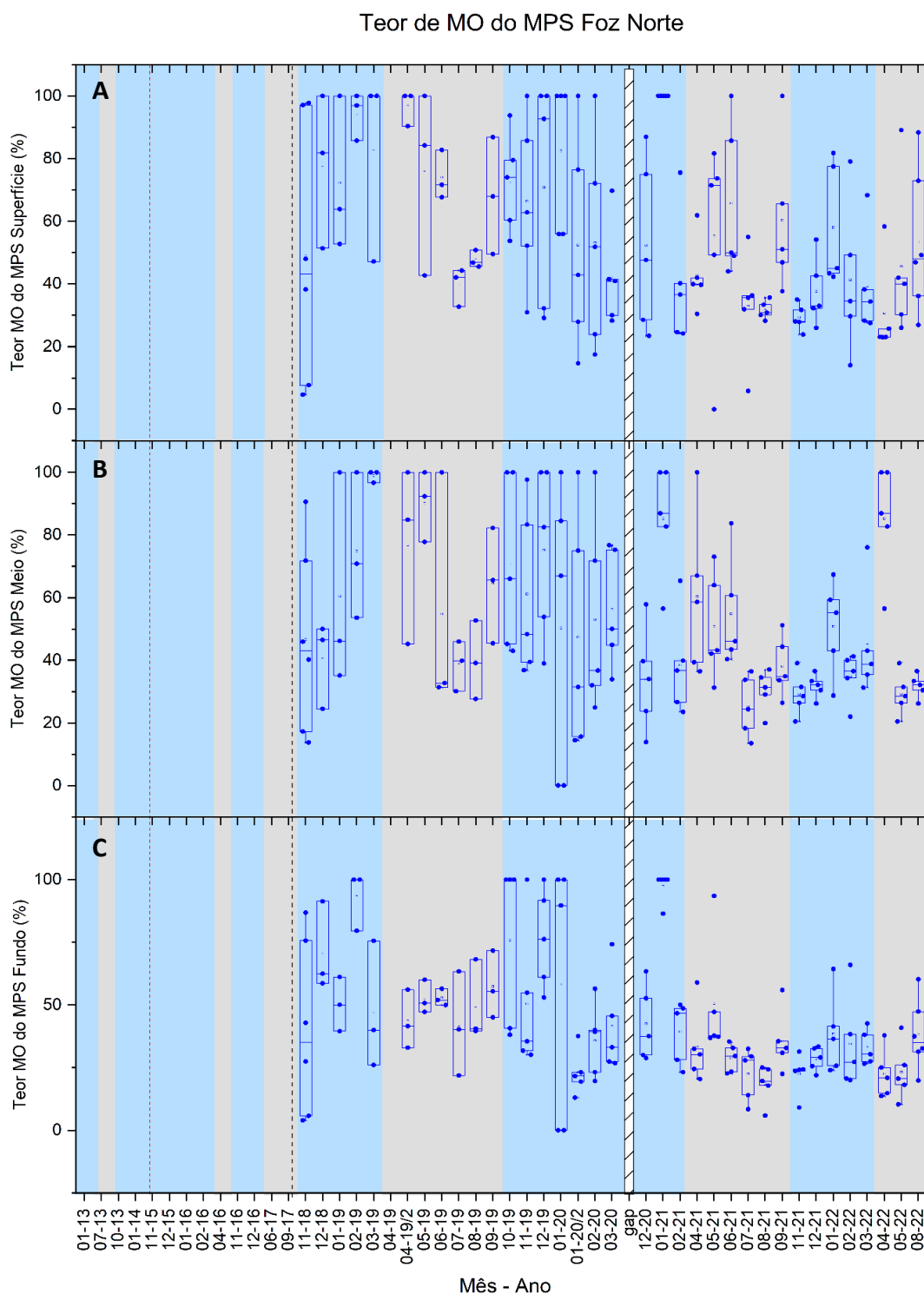


Figura 9: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do sedimento), da coluna d'água para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral



As condições conjuntas de vazão do Rio Doce e vento sobre a plataforma continental são determinantes na evolução espaço-temporal das concentrações de MPS. Dessa forma, o aumento da concentração de MPS associada às condições de vento propicia dispersão do material em suspensão. Para a Foz Norte ocorre, principalmente durante ventos do quadrante sul. Pode-se observar na Figura 2, que ao longo do PMBA/Fest o comportamento da vazão foi próximo à climatologia (Oliveira e Quaresma, 2017), com aumento das vazões máxima diária e mediana mensal, entre outubro e março (período chuvoso), e redução da vazão entre abril e setembro (período seco; Oliveira e Quaresma, 2017). Como esperado, esse momento de pico de vazão foi acompanhado por um aumento no aporte de sedimento em suspensão, que refletiu no aumento da concentração do MPS, principalmente para a superfície da coluna d'água, para esse setor.

Ao longo do PMBA/Fest, os valores máximos de vazão foram observados em janeiro ($5179 \text{ m}^3/\text{s}$) e março ($3885 \text{ m}^3/\text{s}$) de 2020 no Ano 2; e janeiro ($5595 \text{ m}^3/\text{s}$) e fevereiro ($4334 \text{ m}^3/\text{s}$) de 2022 no Ano 4. Dessa forma, as maiores concentrações de MPS ocorreram no Ano 02 e Ano 04. Além disso, as concentrações de MPS no Setor Norte, para todas as profundidades, apresentaram tendência de aumento significativo ao longo do período do monitoramento como podem ser observados em todas as figuras acima.

Figura 10: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do sedimento), 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. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. 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 vinho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

MPS Foz Central

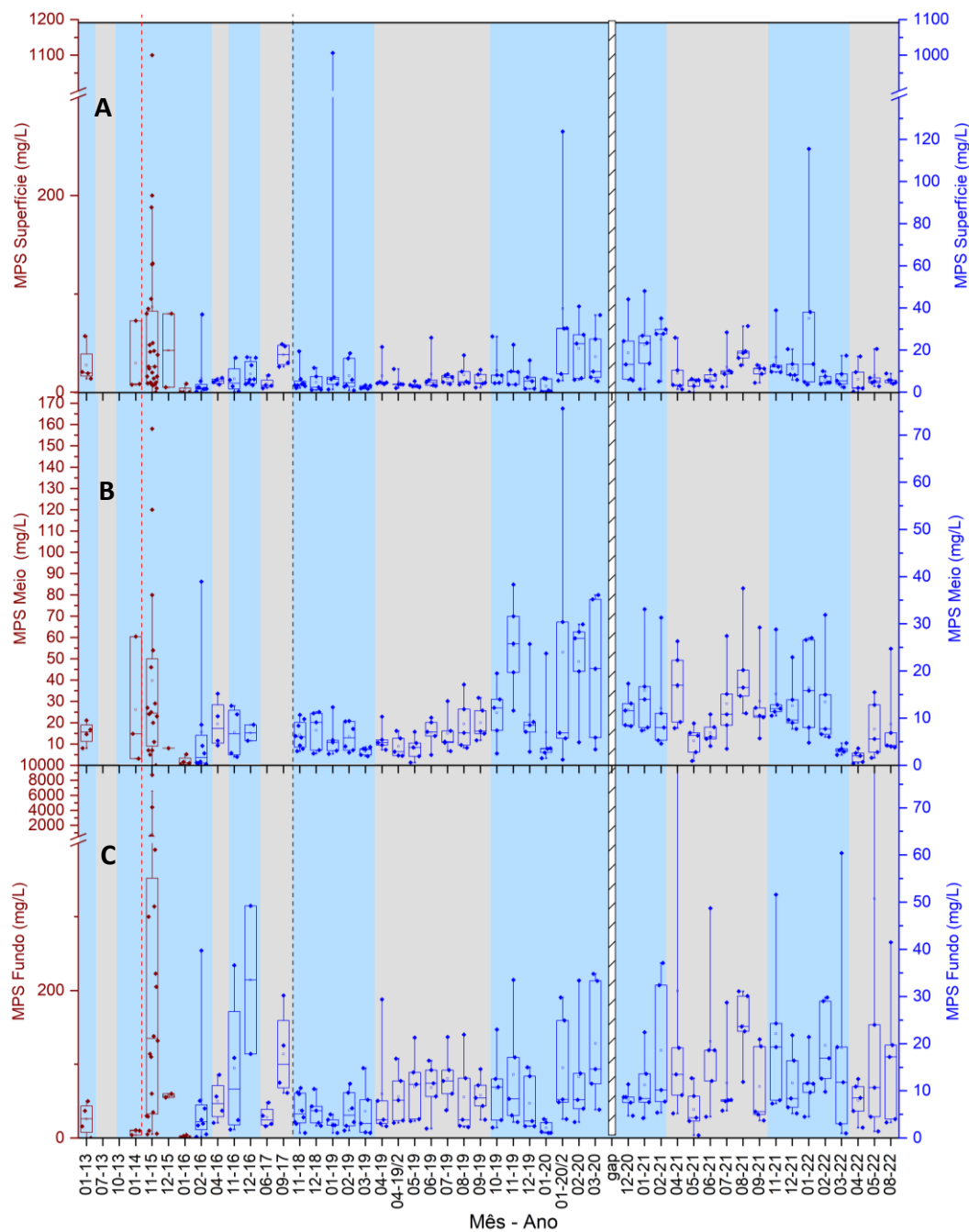


Figura 11: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio, **fundo** da coluna d'água, para o Setor Foz Central desde janeiro/2013. Linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão. Linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.

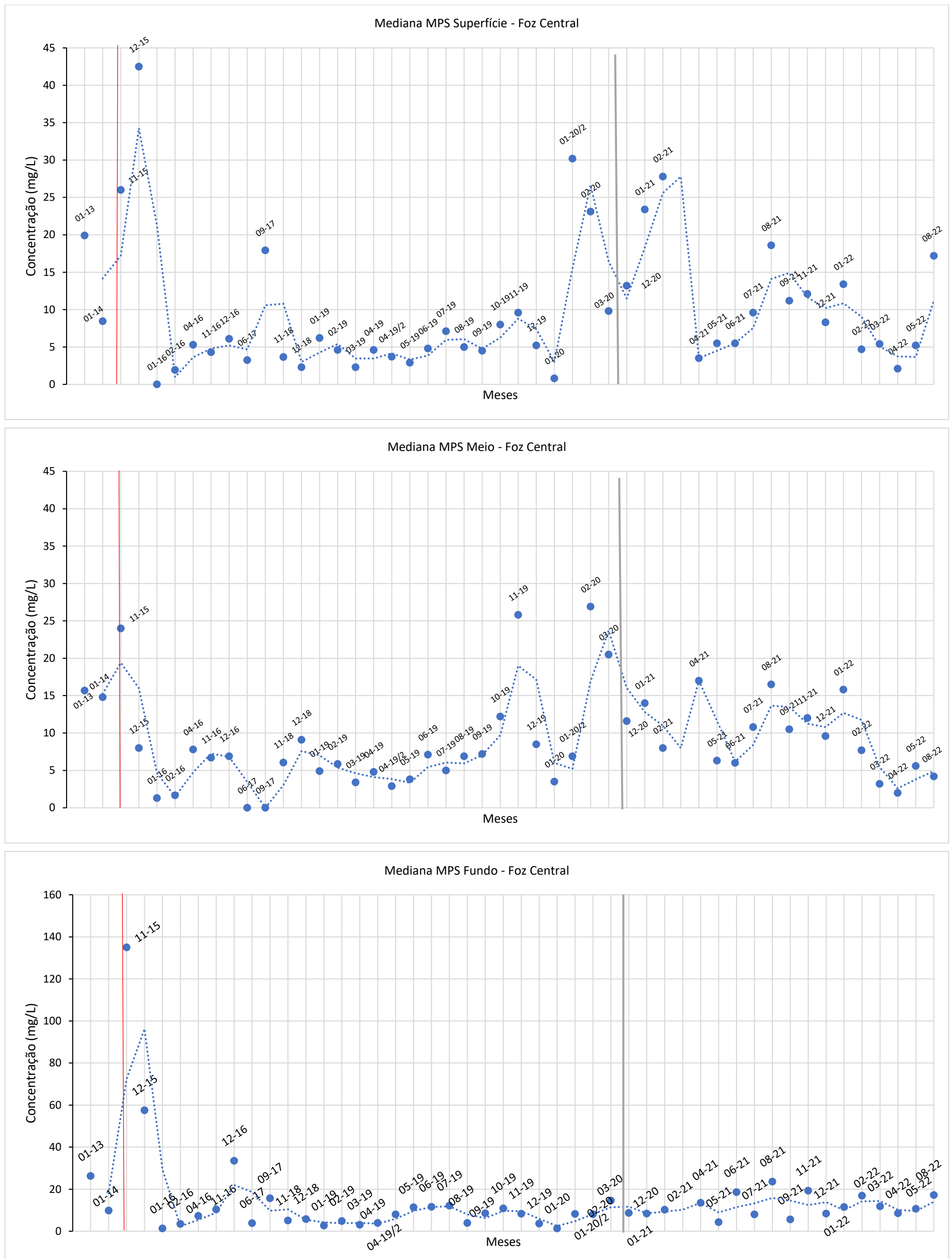
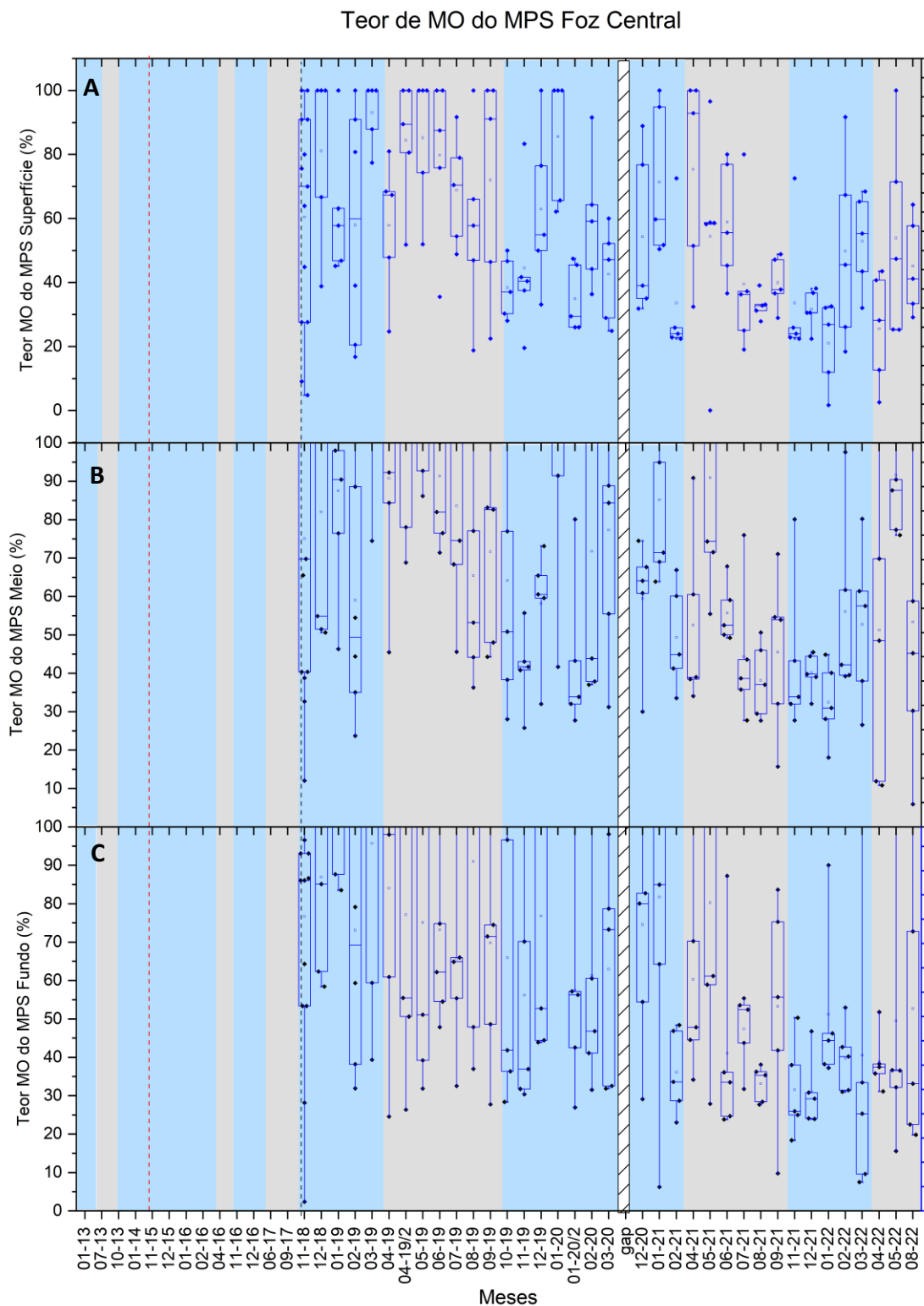


Figura 12: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do sedimento) da coluna d'água, para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral.



As concentrações de MPS no Setor Central para todas as profundidades apresentaram tendência de aumento significativo ao longo do período do monitoramento. Com maiores concentrações de MPS na superfície da coluna d'água no período chuvoso (aporte fluvial), e no fundo durante os períodos secos (ressuspensão do sedimento do fundo). O comportamento das concentrações de MPS da Foz Central do Rio Doce mostra a influência direta das condições hidro-meteoceanográficas, as concentrações de MPS no Ano 2 e Ano 4 foram superiores, tornando evidente a influência do aporte de sedimento do Rio Doce no comportamento do MPS nesse setor. A título de exemplificação, a campanha de janeiro de 2022 na Foz do Rio Doce começou no dia seguinte ao pico do evento hidrológico de cheia (vazão máxima de 5595 m³/s no dia 13/01/2022). No dia do pico do evento em questão a carga de sedimento em suspensão do Rio Doce atingiu 1,5 x10⁵ toneladas/dia; (estação P21 em Linhares (Tema – Integração Fluvio-Estuarina/PMBA). Destaque para o Setor Foz Central, na qual a concentração de MPS atingiu 115 mg/L (estação SD 01 na Superfície da coluna d'água) durante o período chuvoso e 213 mg/L (estação SD 02 no Fundo da coluna d'água) durante o período seco.

Figura 13: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do sedimento) 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. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. 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 vinho são correspondentes ao eixo Y à esquerda; dados em azul são correspondentes ao eixo Y à direita) devido à grande diferença entre as concentrações.

MPS Foz Sul

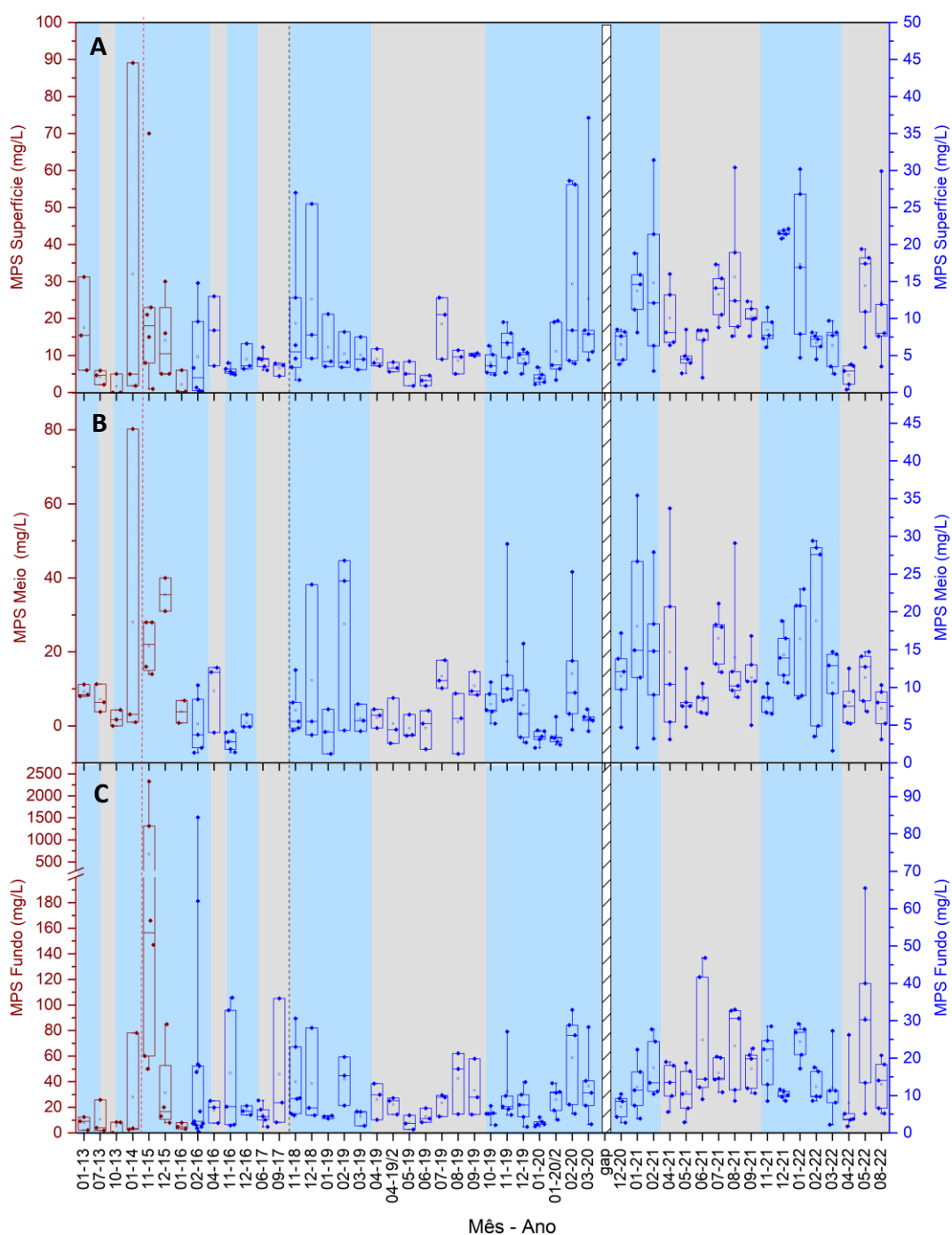


Figura 14: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio, fundo da coluna d'água, para o Setor Foz Central desde janeiro/2013. Linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão. Linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.

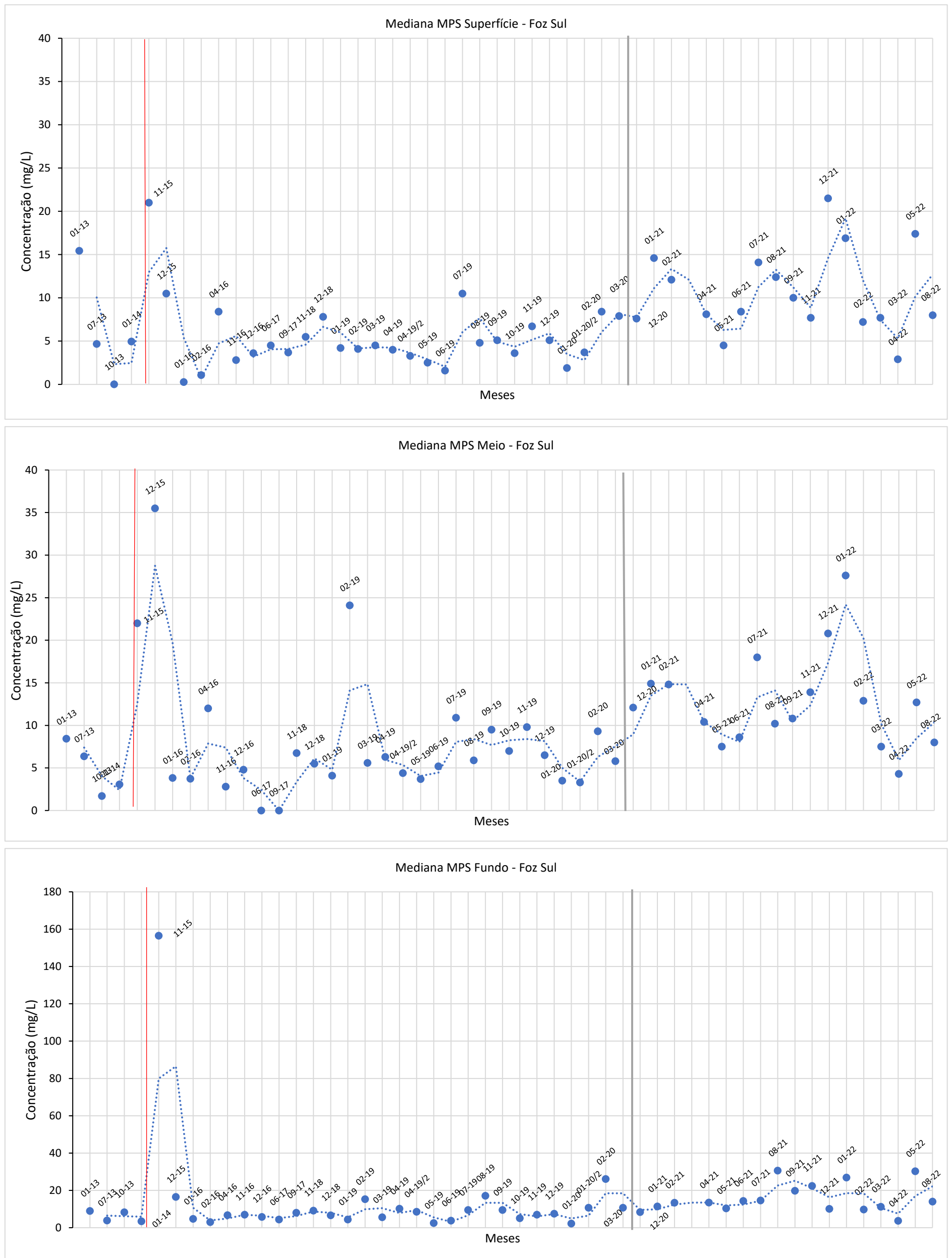
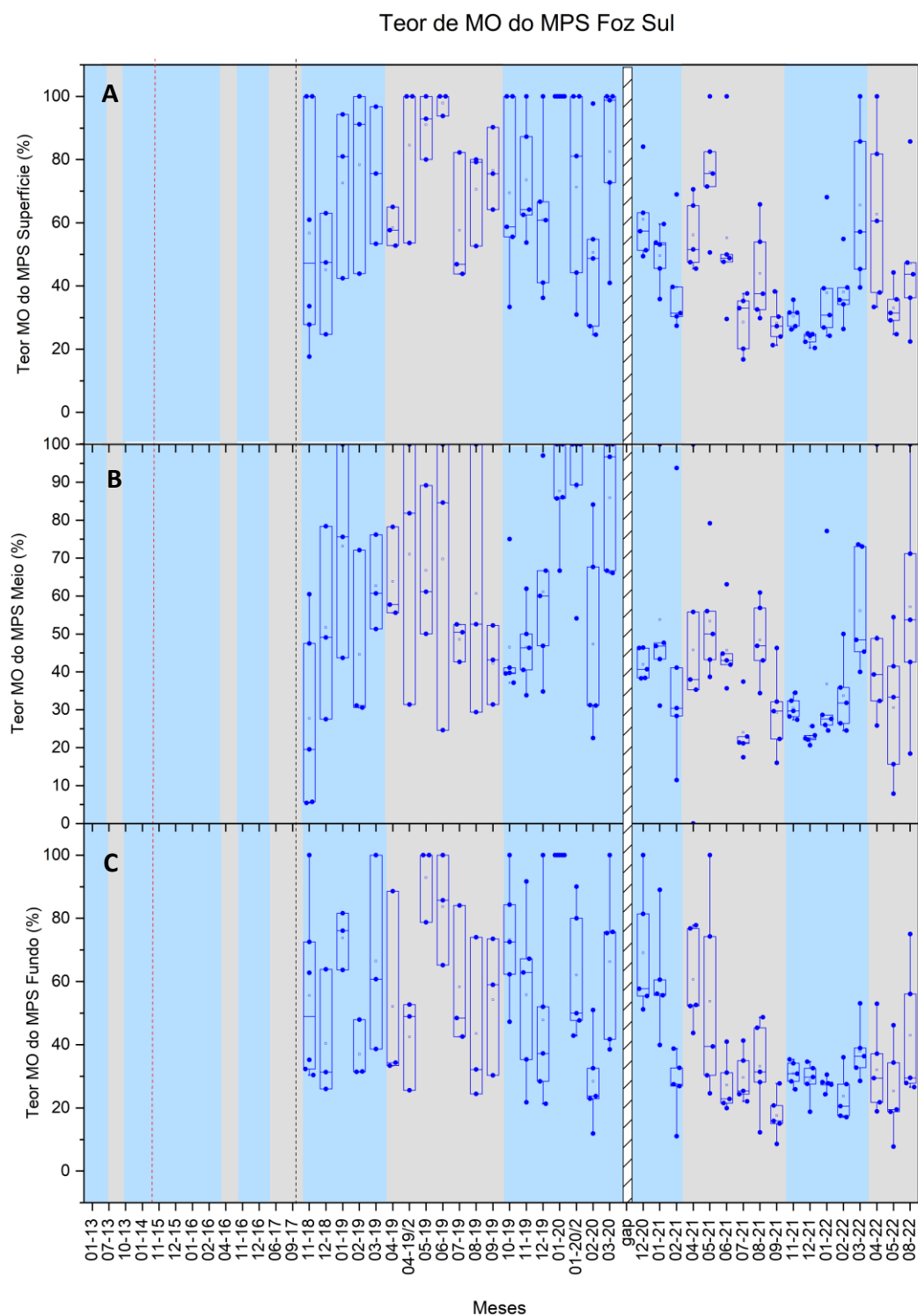


Figura 15: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do sedimento) da coluna d'água, para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral.



As concentrações de MPS, para o Setor Foz Sul segue o padrão observados para os outros setores, também apresenta tendência de aumento significativo ao longo do período do monitoramento. Além disso, o comportamento das concentrações de MPS no período chuvoso do Ano 4 da Foz Sul também continua mostrando a influência direta das condições hidro-meteoceanográficas observadas antes e durante a campanha do Ano 4. A inclusão dos dados das campanhas do período chuvoso e seco do Ano 4, mostra que ocorreu um aumento da mediana das concentrações de MPS no meio da coluna d'água e na superfície em relação às medianas do Ano 1,2 e 3. Associado a uma redução do teor de matéria orgânica (MO) no MPS no período chuvoso.

Figura 16: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do sedimento) da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Não há dados pretéritos de MPS para esse setor. Dados em vinho correspondem às estações Rasas. Dados em azul correspondem às estações Profundas. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral.

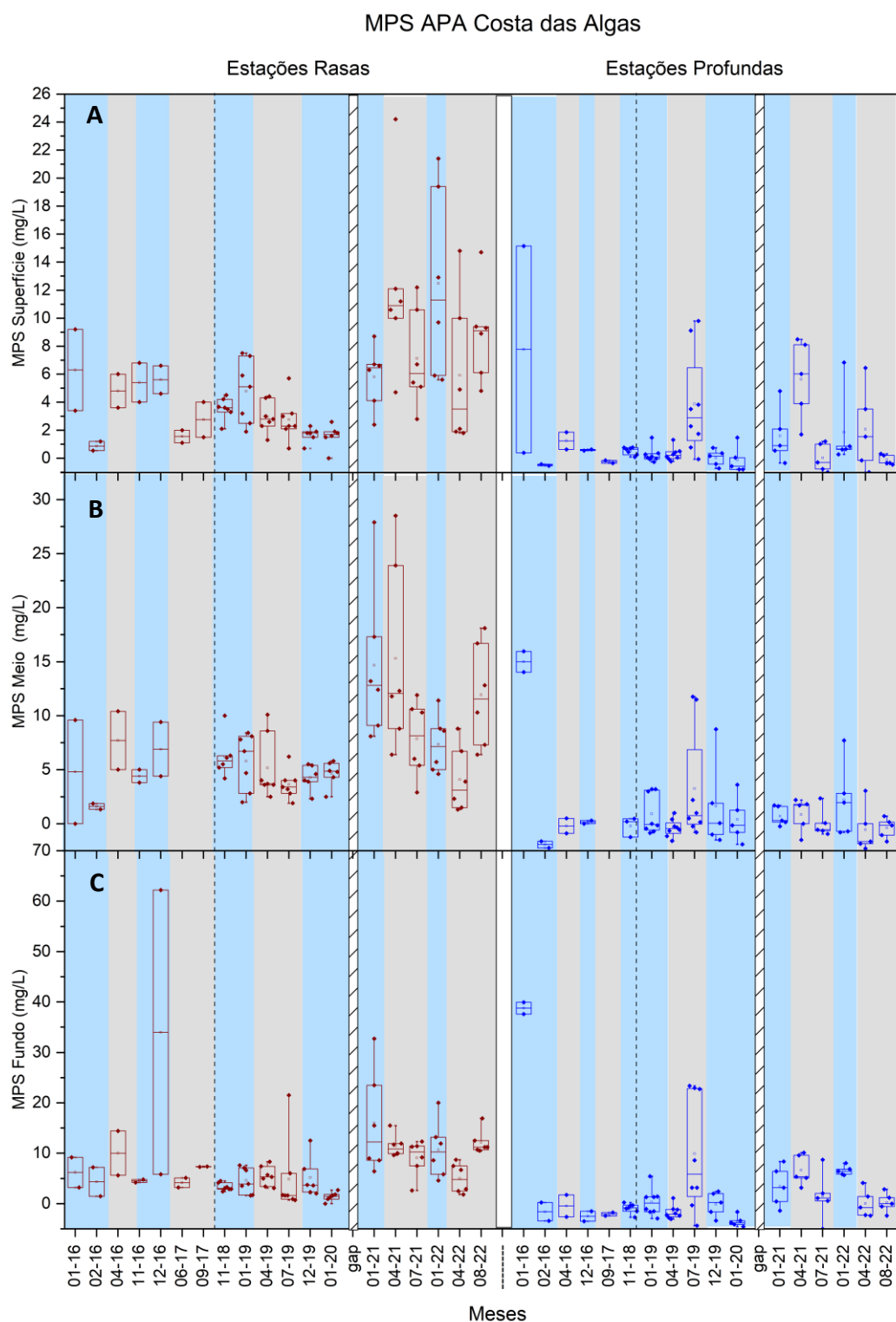


Figura 17: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio, fundo da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. Linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.

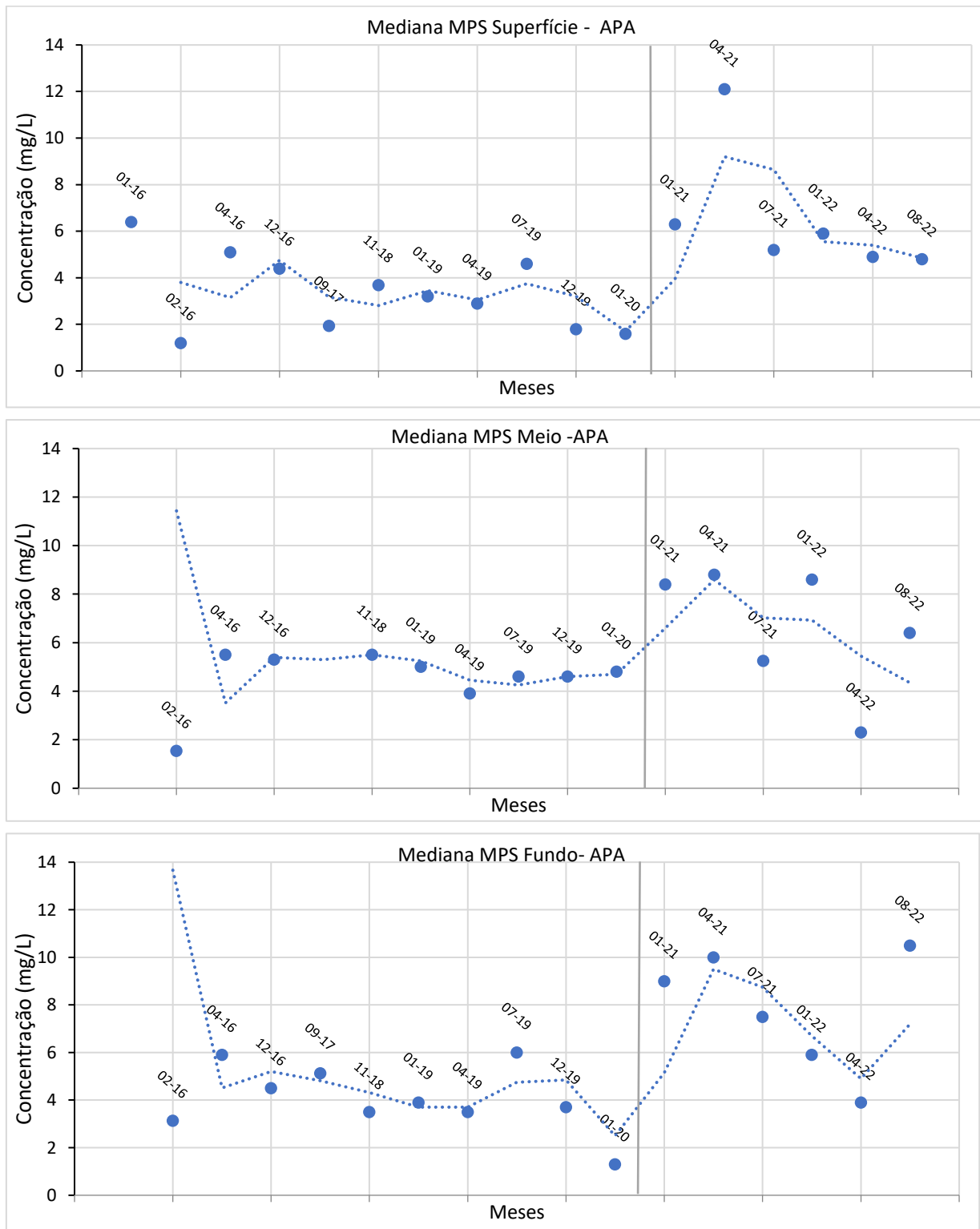
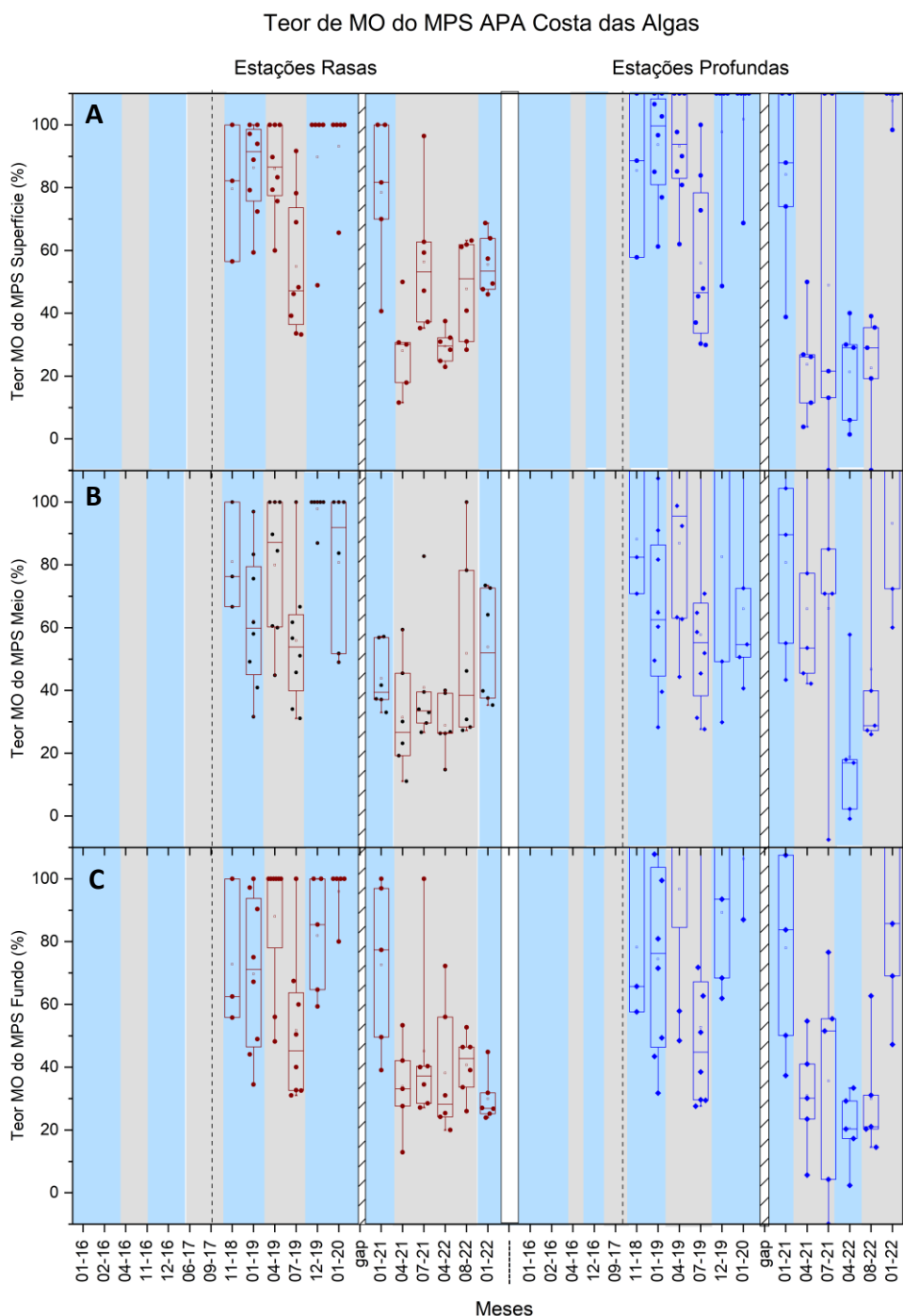


Figura 18: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do sedimento) da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Não há dados pretéritos de teor de MO do MPS para esse setor. Dados em vinho 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 das concentrações de MPS ao longo do período do Monitoramento. Nas estações APA profunda 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. Dessa forma, as maiores concentrações de MPS para as estações rasas ocorreram em janeiro de 2022 (Ano 4). Essa campanha foi realizada 5 dias após um evento hidrológico de cheia no Rio Doce, com a vazão do Rio Doce entre 4531 e 5390 m³/s. Durante o evento hidrológico de cheia e nos dias subsequentes, ventos do quadrante norte e correntes para sul e sudoeste foram observados na região da foz do Rio Doce. Essa situação favorece à dispersão de MPS para sul. Comparativamente, as menores concentrações foram observadas em janeiro de 2020 (Ano 2), os dias que antecederam a Campanha de janeiro de 2020 (08 a 11/01) desse setor, a vazão do Rio Doce apresentava baixos valores (entre 400 e 700 m³/s), dessa forma não havia aporte sedimentar no momento da coleta.

3.2 POTENCIAL DE MOBILIDADE DO SEDIMENTO SUPERFICIAL DE FUNDO

Figura 19: Percentual de Mobilidade do sedimento superficial (base) ao longo do PMBA/Fest, 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 devido à pandemia.

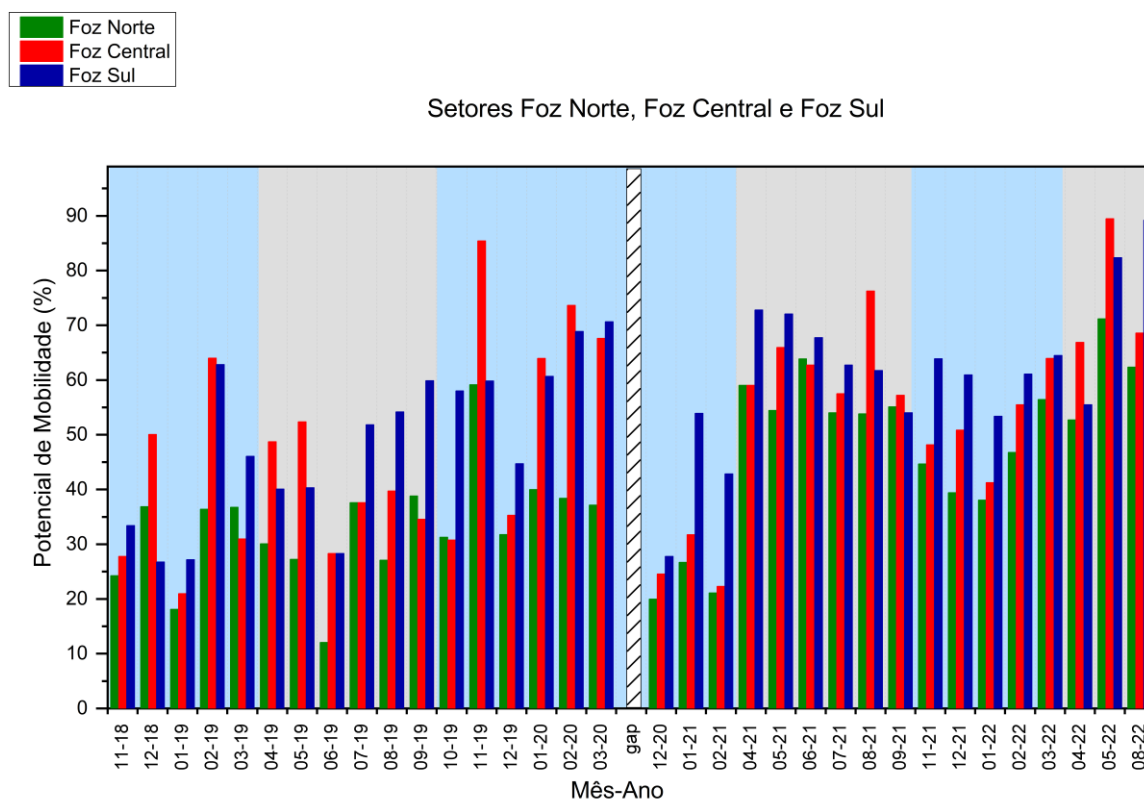
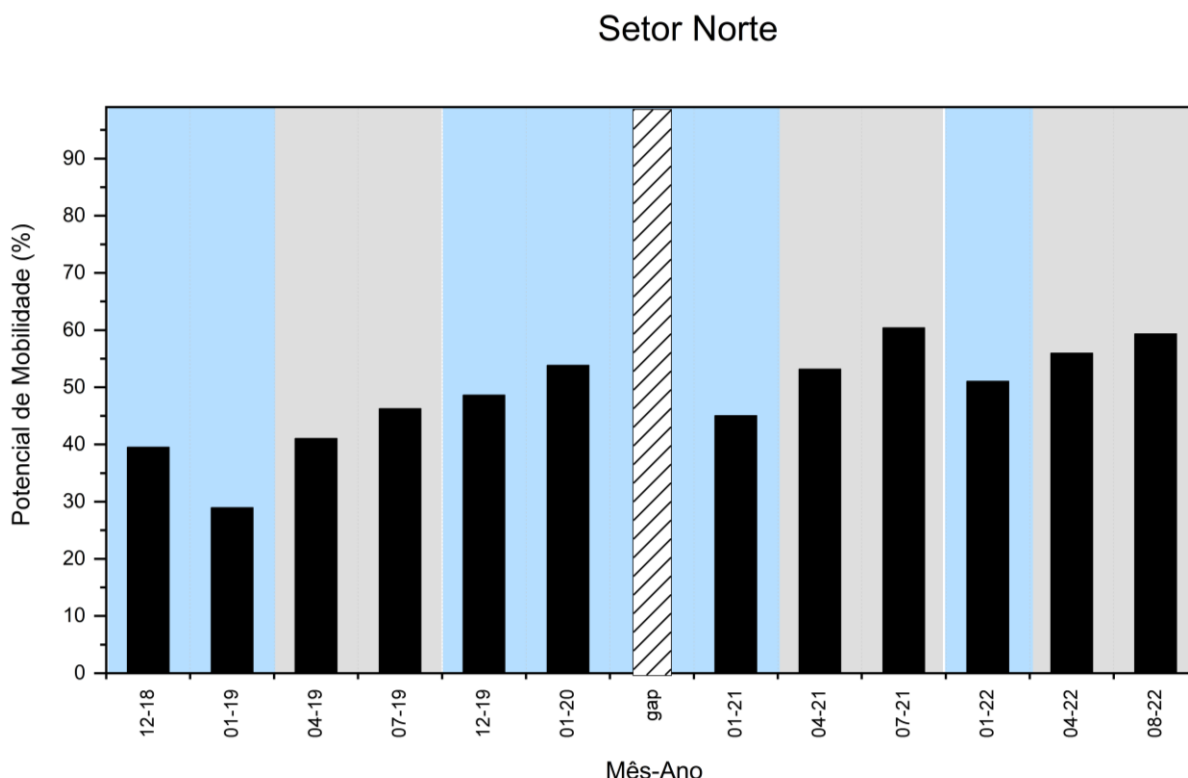


Figura 20: Percentual de Mobilidade do sedimento superficial (base) ao longo do PMBA/Fest, para o setor Norte. Áreas em azul indicam o período chuvoso e em cinza, o período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia.



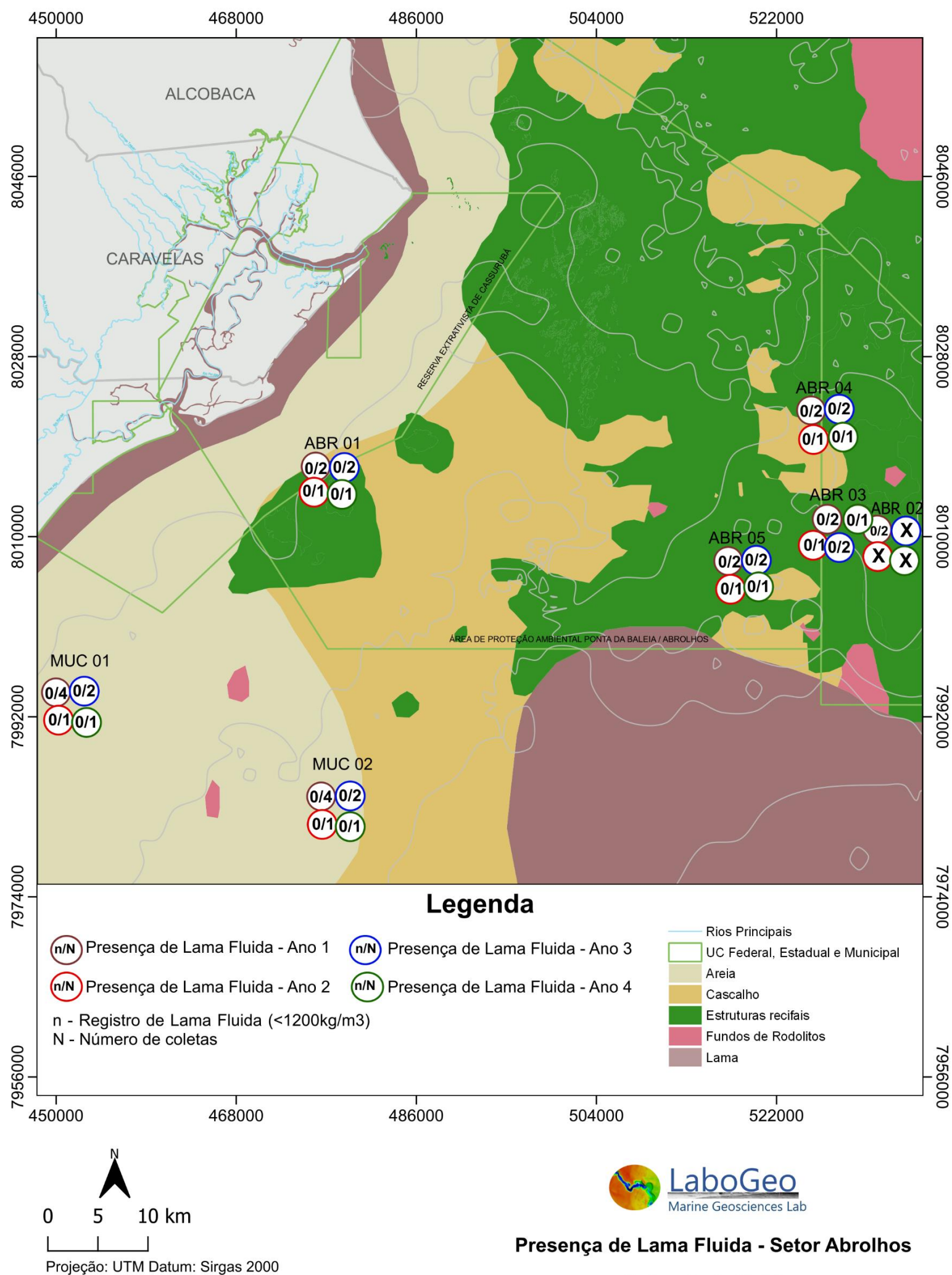
A densidade do sedimento superficial tem sido utilizada na identificação de fundos com lama fluida (Figuras 21 a 24), que já vinham sendo encontrados na região da Foz do Rio Doce em estudos prévios ao rompimento da Barragem de Fundão (Quaresma et al., 2015). Após o rompimento da Barragem de Fundão, em novembro de 2015, fundos de lama fluida foram observados na região da Foz do Rio Doce, apresentando valores nunca registrados (densidade úmida $\leq 1099 \text{ kg/m}^3$; Quaresma et al., 2020). Ao longo do monitoramento, fundos com lama fluida foram identificados nos setores, Foz Norte, Foz Central e Foz Sul e APA Costa das Algas, com destaque para os setores Foz Central e Foz Sul, com o maior número de observações de fundos com lama fluida. Na escala interanual, houve um aumento no número de ocorrência de fundos com lama fluida no Ano 2 quando comparados ao Ano 1, com posterior redução no Ano 3 e aumento no Ano 4, indicando um ciclo de aumento e redução desse tipo de ocorrência.

Além da identificação de fundos com lama fluida, a densidade é utilizada no cálculo do potencial de mobilidade do sedimento superficial. A partir dos resultados, foi observada uma tendência de aumento significativa ($p\text{-valor} < 0,05$) na mobilidade do sedimento de fundo nos Setores da Foz do Rio Doce (Figura 19) e Setor Norte (Figura 20), associados a uma redução nos valores de densidade do sedimento superficial do fundo e um aumento da tensão de cisalhamento de fundo.

Também ocorreram diferenças sazonais nos valores desse indicador, com maiores valores observados no período seco. Nos Setores da foz do Rio Doce os maiores potenciais de mobilidade ocorreram no período seco do Ano 04. Especialmente, a Foz Norte foi a que apresentou os menores potenciais de

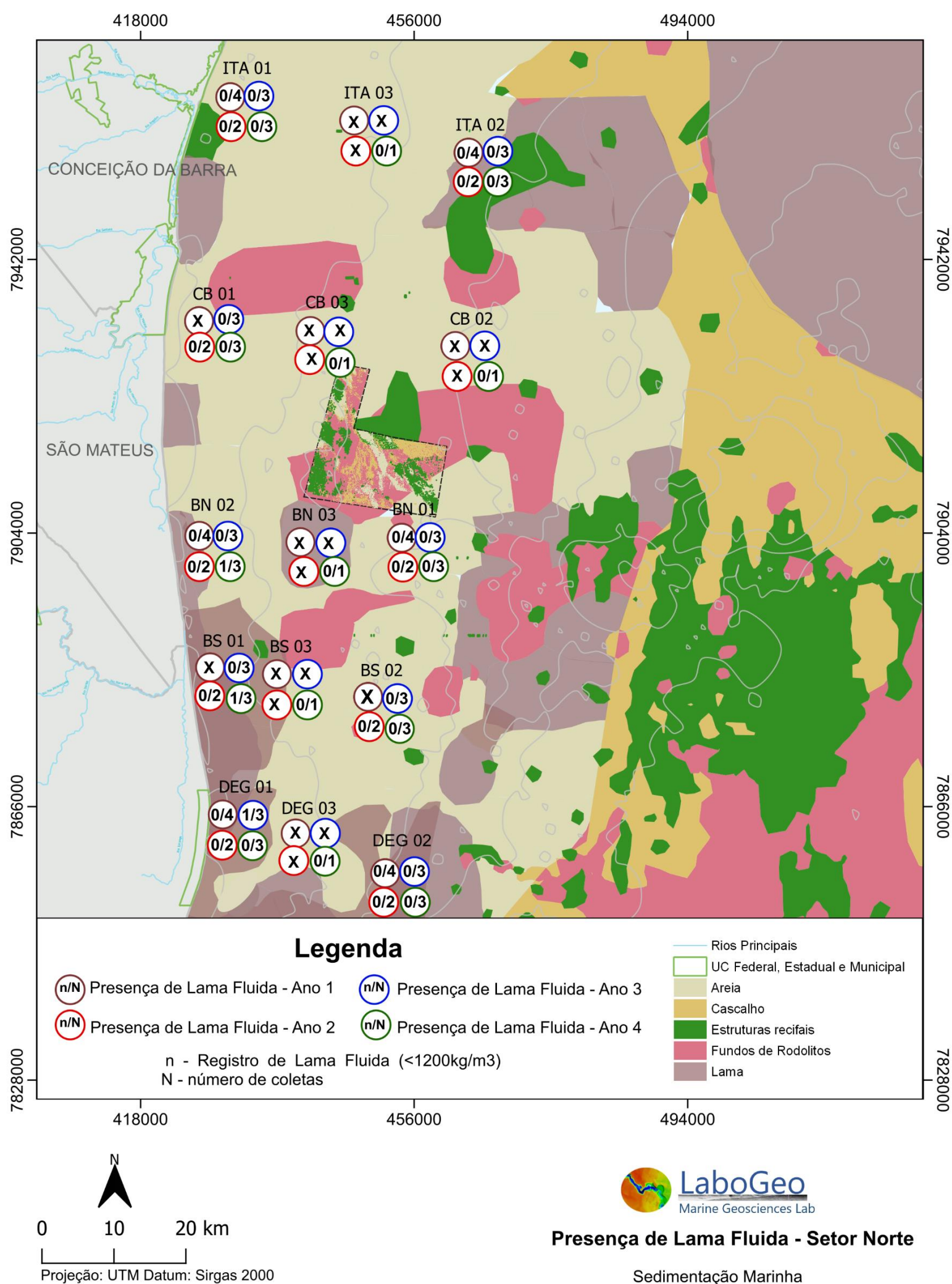
mobilidade, enquanto os maiores potenciais de mobilidade ocorreram na Foz Sul, resultado da menor densidade do sedimento superficial observada no setor e consequentemente da tensão crítica de ressuspensão. Para o Setor Norte também foi observado aumento no percentual de mobilidade do sedimento de fundo nos períodos secos com maiores valores observados no período seco do Ano 03 e 04.

Figura 21: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. 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/2021). Não ocorreram coletas no período seco para esse setor devido uma alteração da malha amostral, na qual não abrange mais esse setor.



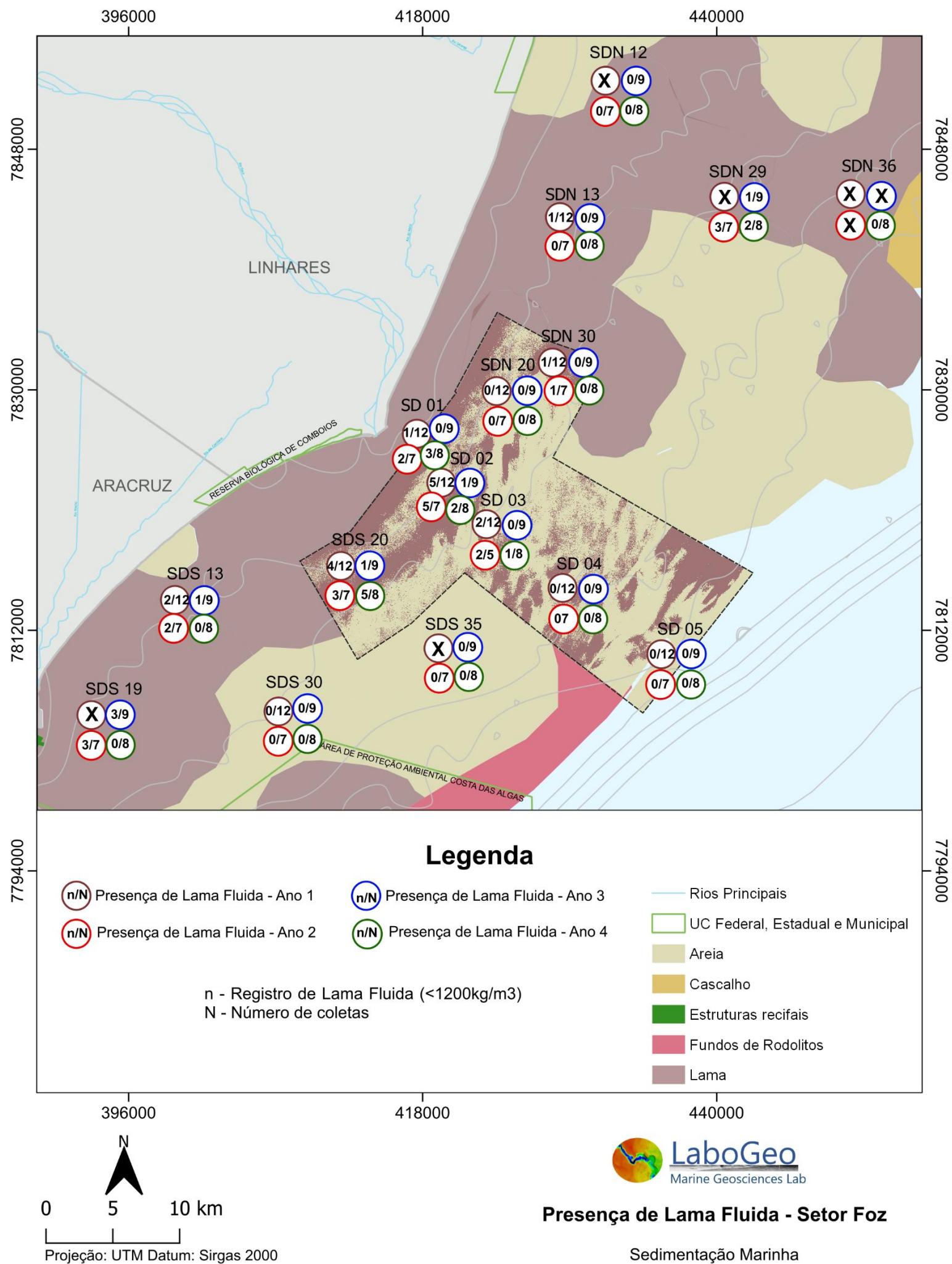
Anita Ruschi - 27/02/2023

Figura 22: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor Norte para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção após o Ano 1 de monitoramento.



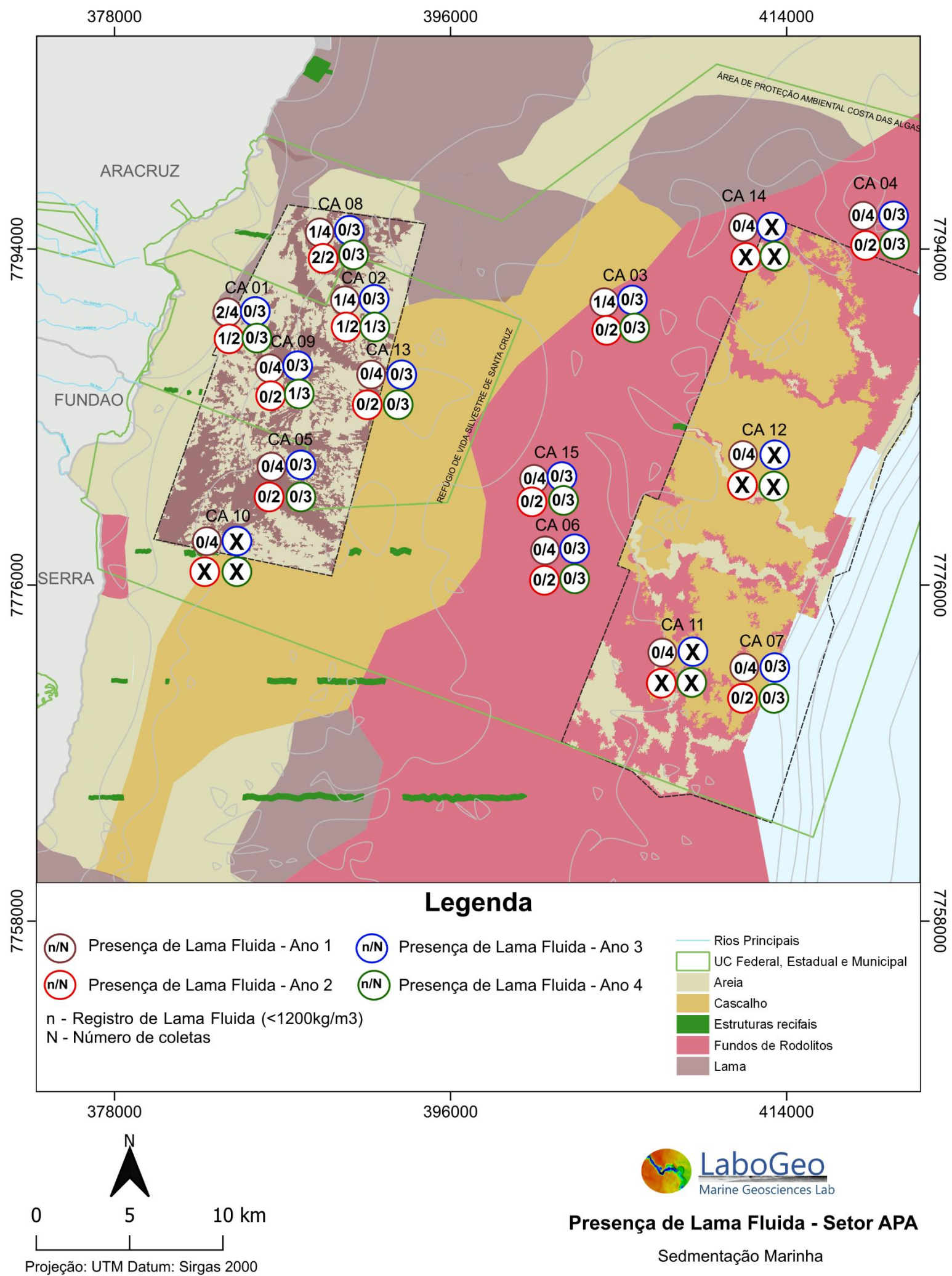
Anita Ruschi - 20/03/2023

Figura 23: Indicativo da presença de lama fluida para o Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção após o Ano 1 de monitoramento.



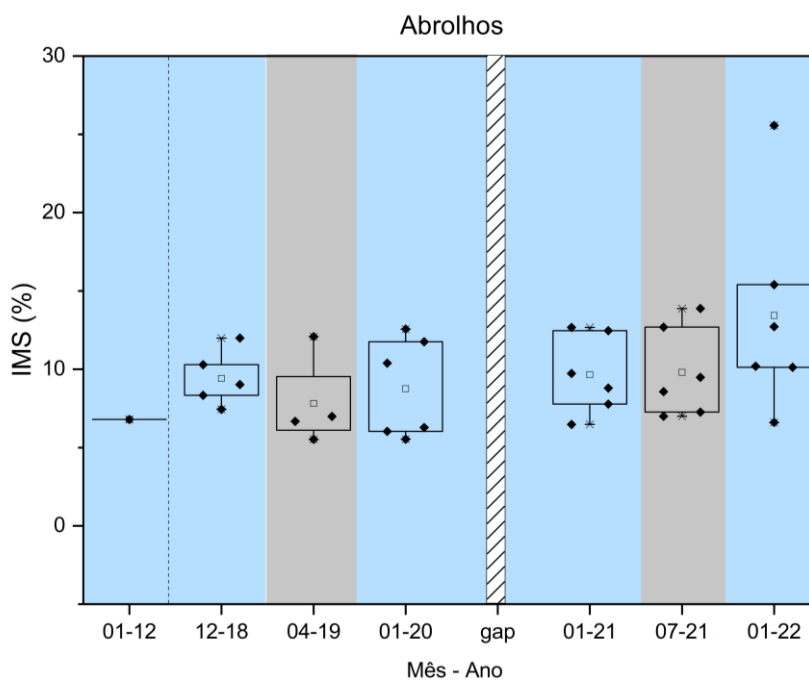
Anita Ruschi - 27/02/2023

Figura 24: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor APA Costa das Algas para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção das estações do monitoramento.



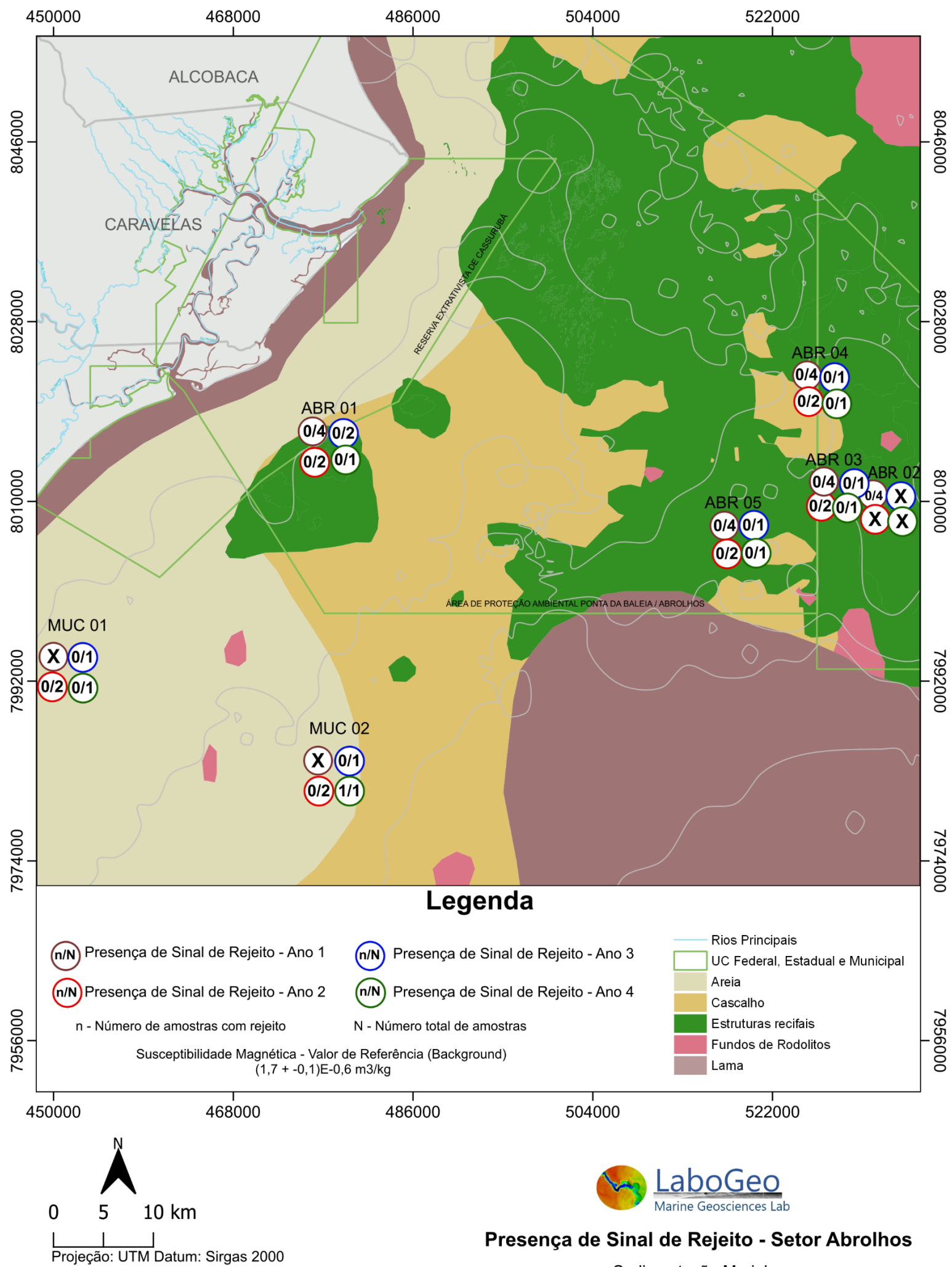
3.3 VALORES DE IMS (*IRON MINERALOGICAL SET*) E PRESENÇA DO SINAL DE REJEITO NO SEDIMENTO DE FUNDO

Figura 25: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento) 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. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do ANO 4 (janeiro/2021). Não ocorreram coletas no período seco para esse setor devido uma alteração da malha amostral, na qual não abrange mais esse setor.



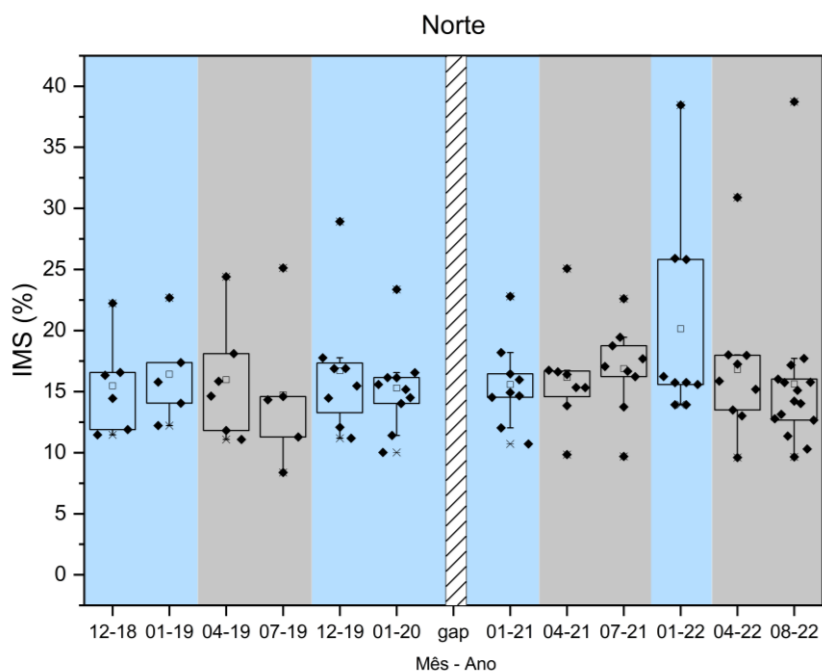
A tendência geral no Setor Abrolhos é a manutenção dos valores de IMS maiores que o valor de referência nos pontos de monitoramento, principalmente nos pontos mais ao sul, com valores máximos no ponto mais próximo à costa (ABR 01). Embora os valores de IMS sejam maiores que os valores de referência, a presença do sinal de rejeito para esse setor é inconclusiva, uma vez que foi observado a presença do sinal do rejeito apenas no Ano 04 em uma estação amostral (MUC 02) (Figura 26).

Figura 26: Indicativo da presença de sinal rejeito para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. 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/2021). Não ocorreram coletas no período seco para esse setor devido uma alteração da malha amostral, na qual não abrange mais esse setor.



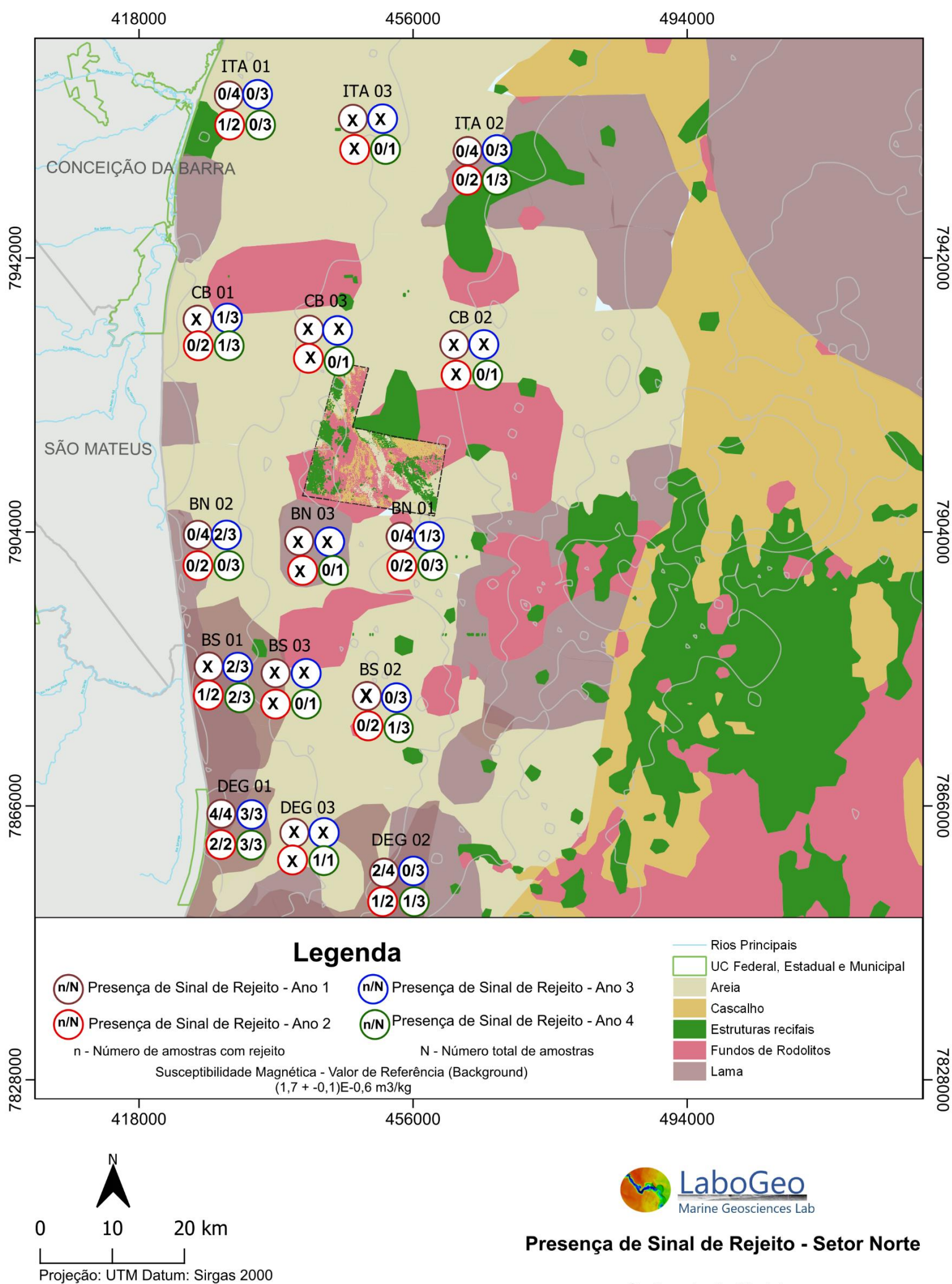
Anita Ruschi e Michele Sardinha - 24/02/2023

Figura 27: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento) para o Setor Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia.



O Setor Norte apresenta concentrações de IMS pouco acima dos valores de referência (Pré PMBA) (Figura 27). Na comparação entre período seco e úmido, não foram observadas variações significativas, apesar de ocorrer um aumento da concentração do IMS no período chuvoso do Ano 04 em relação aos anos anteriores. Quanto a presença do sinal do rejeito (Figura 28), apesar de ser observada em todas as campanhas, ocorreram com mais frequência nas estações mais ao sul, próxima à costa como DEG 01, DEG 02 e BS 01. Além disso, a partir do Ano 02 foi observado uma diminuição de amostras com presença de sinal de rejeito para esse setor.

Figura 28: Indicativo da presença de sinal de rejeito para o Setor Norte para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção das estações após o Ano 1 de monitoramento.



Anita Ruschi & Michele Sardinha - 23/02/2023

Figura 29: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento) para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia.

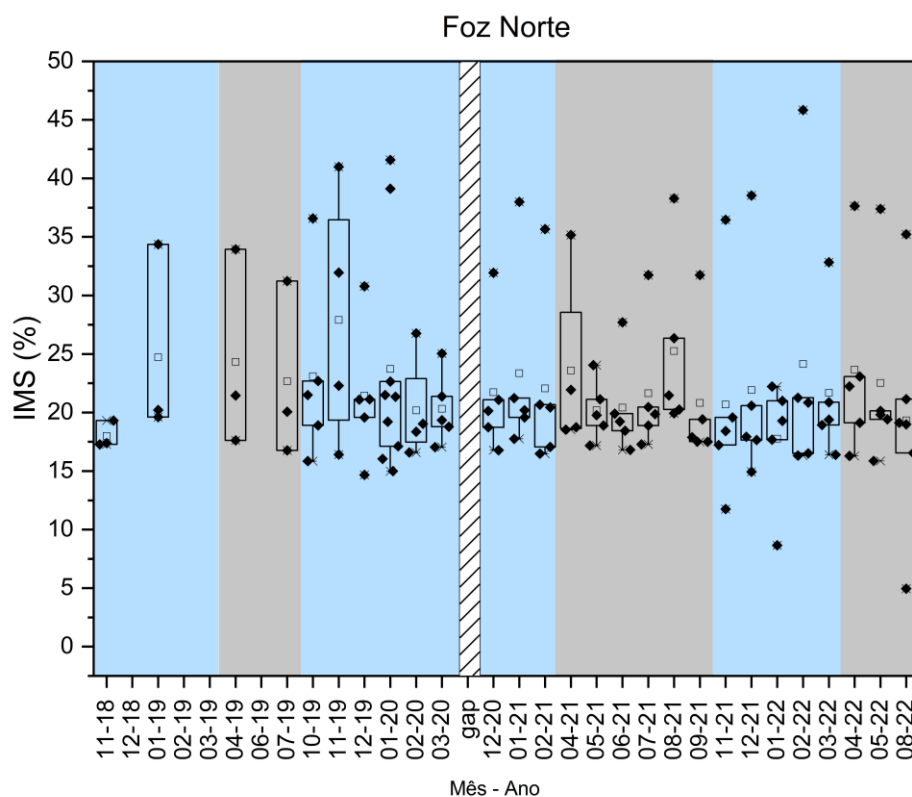


Figura 30: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento) para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia.

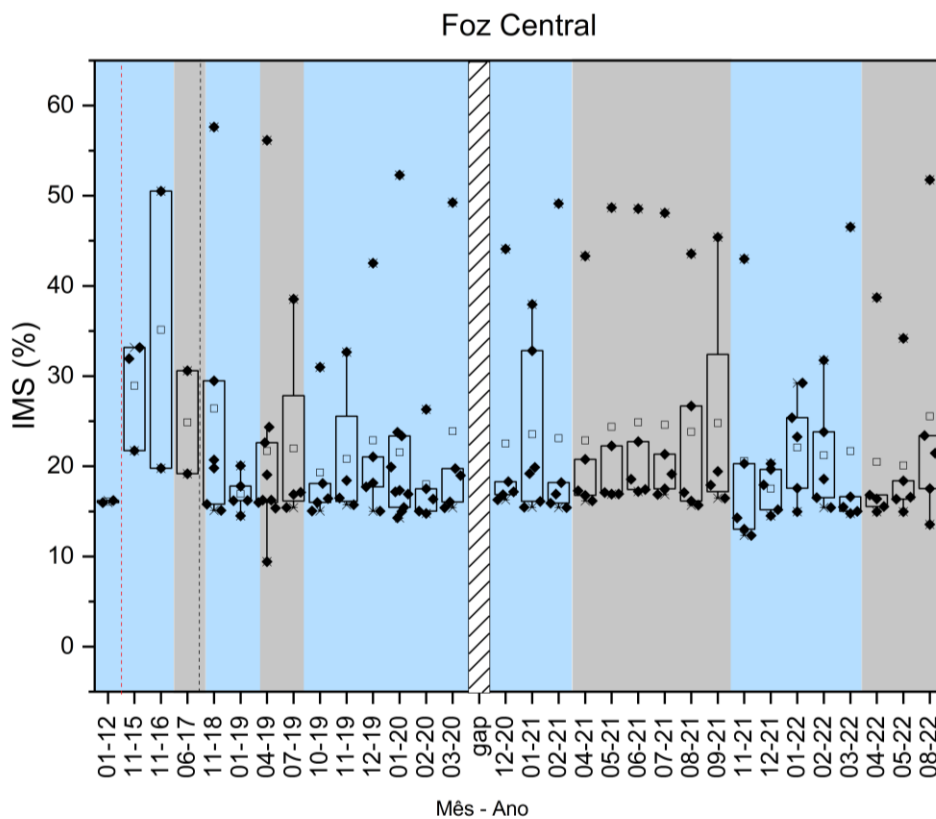
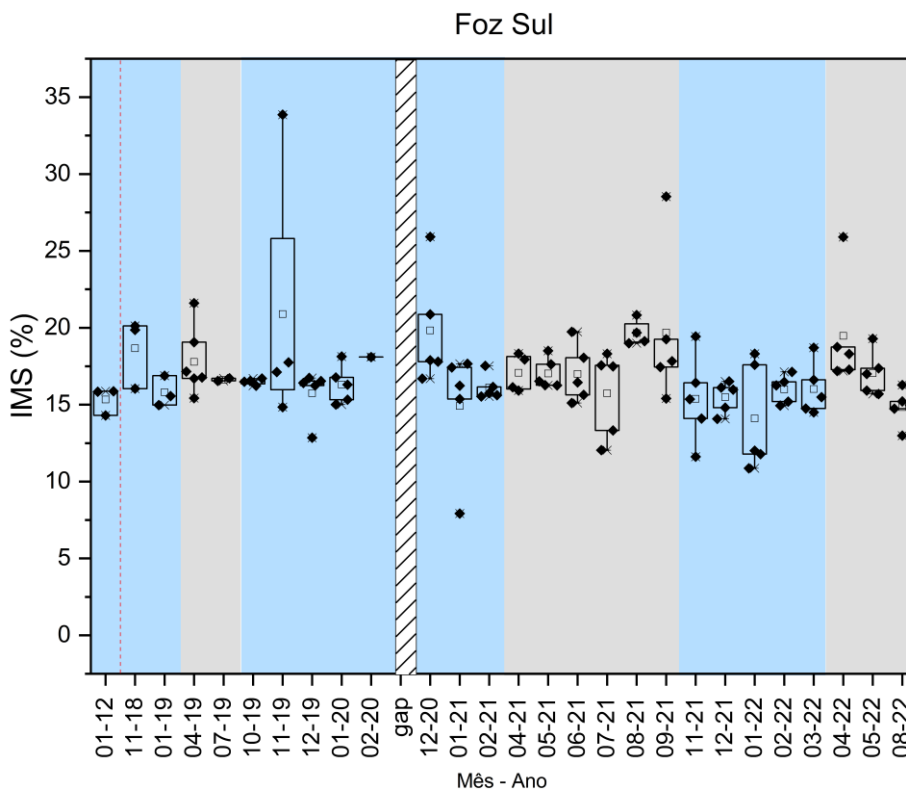


Figura 31: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento) para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia.

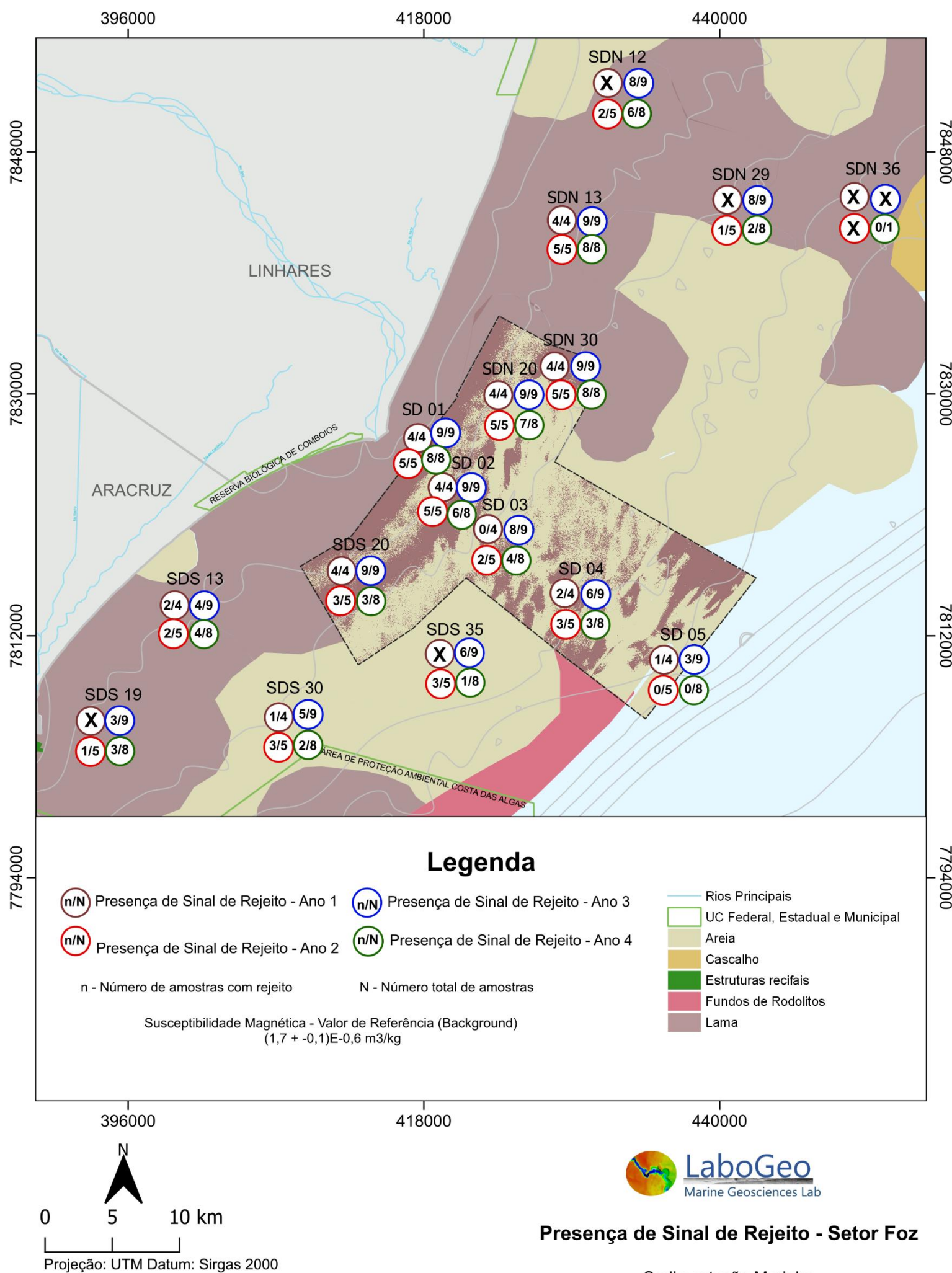


A evolução espaço-temporal do sinal de rejeito para o Setor Foz do Rio Doce continua respondendo ao padrão de transporte de sedimento na região marinha adjacente à foz do Rio Doce, com os maiores volumes sendo observados na porção rasa dos setores. Além disso, o material apresenta direção preferencial de transporte para norte/nordeste, sendo transportado preferencialmente em profundidades inferiores a 20 m, a partir da Foz do Rio Doce, seguindo o padrão de transporte sedimentar na região.

Dentro dos setores da Foz do Rio Doce, os maiores valores de IMS (%) foram observados no setor Foz Central (Figura 30). Observa-se que na Foz do Rio Doce o IMS (%) não apresentaram redução de seus valores, quando comparado aos valores de referência. Baseado nisso acredita-se que o material que chega à foz apresenta um regime de fluxo contínuo. Esse patamar dinâmico também é possível de ser identificado nas estações do Setor Foz Norte (Figura 29).

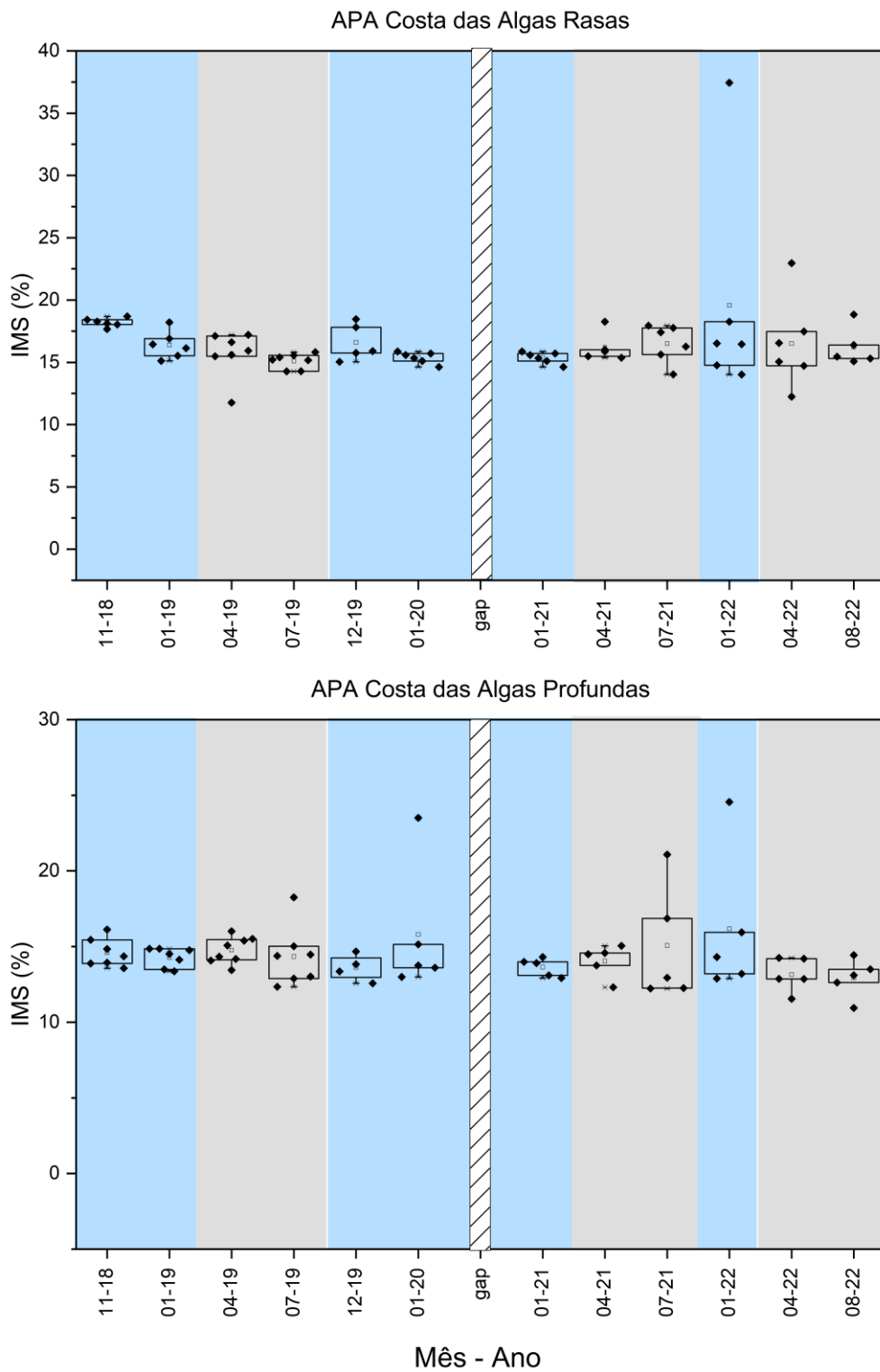
Em relação a presença do sinal de rejeito (Figura 32), todas as estações da foz do Rio Doce apresentaram sinal de rejeito, com maior frequência dos pontos rasos (até 20m). Destaque para a estação SD 05, que apresentou pela primeira vez o indicativo da presença do sinal do rejeito no Ano 3 (julho de 2021).

Figura 32: Indicativo da presença de sinal de rejeito para os Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção das estações após o Ano 1 de monitoramento.



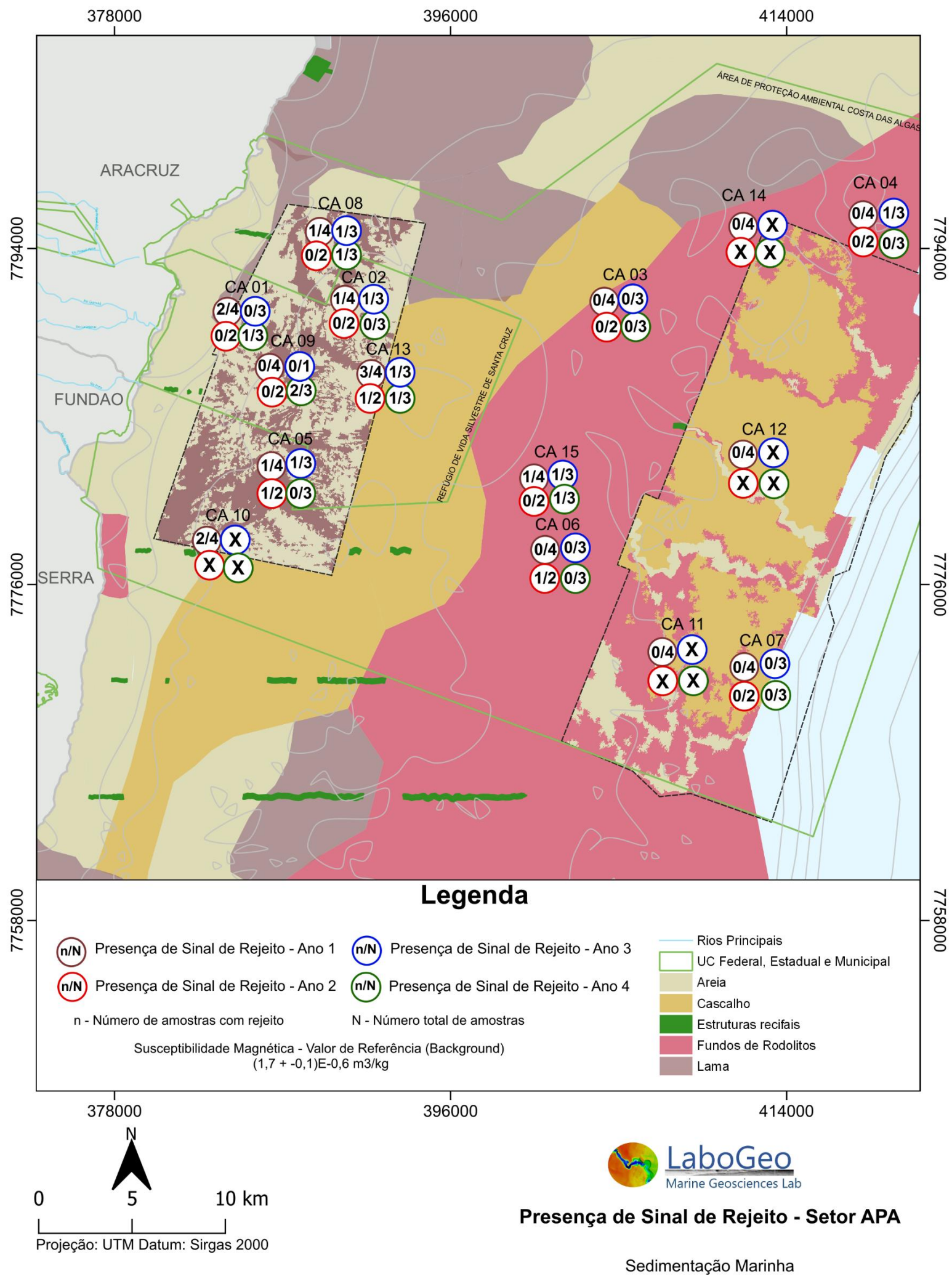
Anita Ruschi & Michele Sardinha - 23/02/2023

Figura 33: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento) para o Setor APA Costa das Algas Rasas (Topo) e Profundas (Base). Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia.



Os valores de IMS para o Setor APA Costa das Algas, ficaram em sua grande maioria, próximos ao valor de referência. Além disso, esses valores permaneceram no mesmo patamar ao longo do período do monitoramento. Os maiores valores observados foram para o período chuvoso do Ano 04. Em relação a presença do sinal de rejeito (Figura 34) a maior ocorrência foi para as estações APA rasa até 36m (CA 01, CA 02, CA05, CA08, CA09, CA10 e CA13).

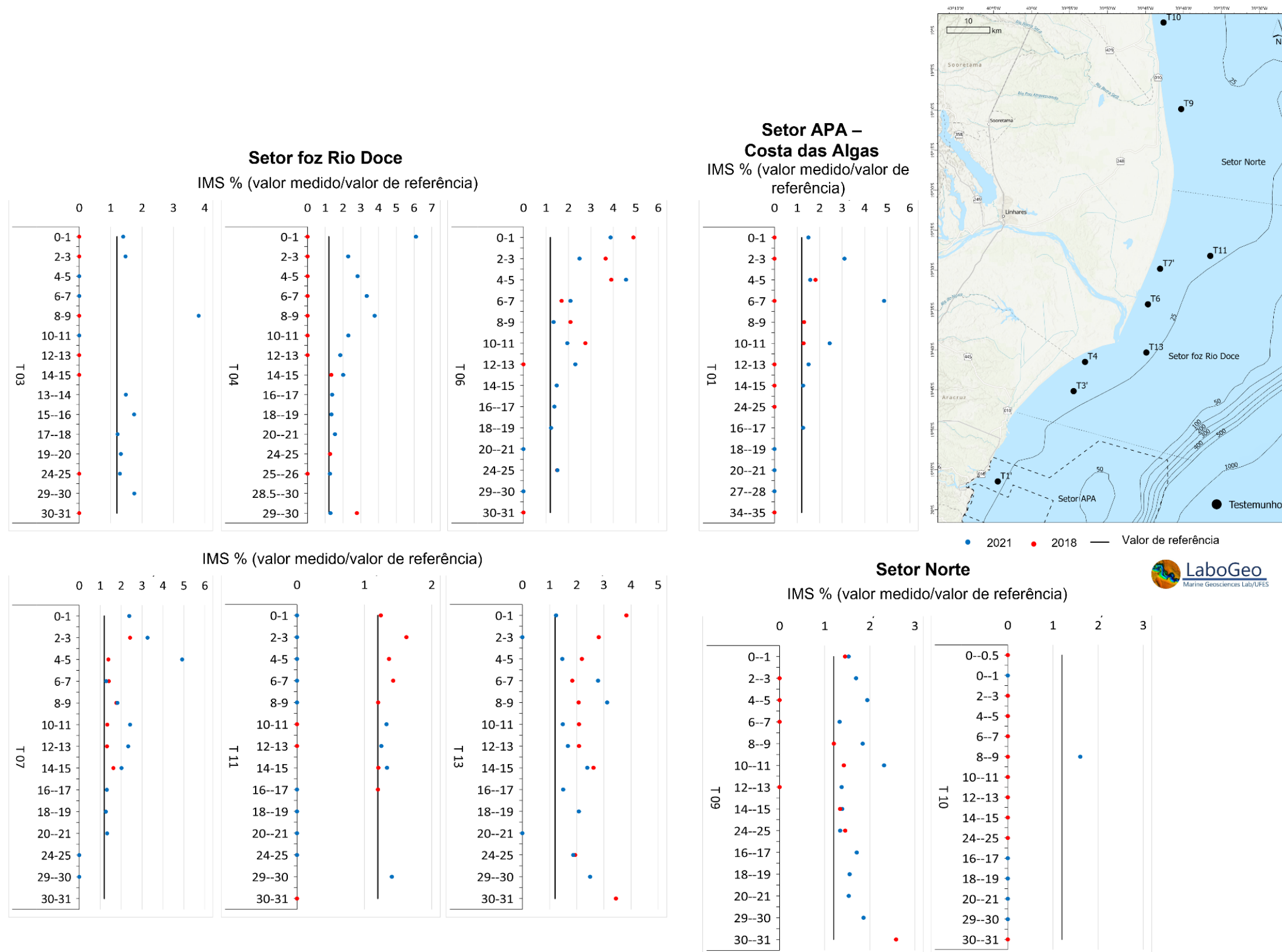
Figura 34: Indicativo da presença de sinal de rejeito para o Setor APA Costa da Algas para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento.



Anita Ruschi & Michele Sardinha - 23/02/2023

3.4 VALORES DE IMS (%) PARA DETERMINAÇÃO DO ACÚMULO DE REJEITO NO DEPÓSITO SEDIMENTAR: EVOLUÇÃO DO ACÚMULO DE REJEITO NO FUNDO MARINHO ENTRE 2018 E 2021

Figura 35: Indicativo da presença de rejeito ao longo dos testemunhos coletados no ano 1, em vermelho, e ano 3, em azul, ao longo da plataforma. IMS (%) Valor de Referência (Background) (1,7 + -0,1) E-0,6m3/Kg



Após o tempo decorrido entre o ano 1 e ano 3, os valores de IMS (%) continuam mostrando a presença de sinal do rejeito até 30 cm abaixo da superfície do fundo marinho, em pelo menos 1 estrato em todos os testemunhos ao longo da plataforma. Desta forma, o material oriundo do Rio Doce, em um primeiro momento, se deposita nos setores foz sul e central, sendo posteriormente transportado para norte/nordeste, direção preferencial de transporte da região (Quaresma et al., 2015, Vieira et al., 2019, Oliveira et al., 2021). Os dados dos testemunhos corroboram essas informações, visto que se observou um aumento dos valores de IMS nos testemunhos T3 e T4, localizados no setor foz sul, quando comparados ao ano 1. O mesmo se observa para os testemunhos T06, T07 (setor foz) e T09 (setor norte), indicando uma tendência de transporte para norte.

O T1, setor APA Costa das Algas, mostra uma presença do sinal de rejeito superior à última coleta (2018), potencialmente indicando uma continuidade do acúmulo de rejeito na região. Vale destacar que o T13, que com os resultados de 2018 indicava um potencial transporte de rejeito para áreas mais offshore na foz do Rio Doce, em 2021 já mostrou uma diminuição dos valores de IMS (%) em direção ao topo do testemunho, indicando um potencial menor acúmulo de rejeito.

Figura 36. Mapa de distribuição de habitat ao longo da plataforma do Espírito Santo em duas escalas de resolução: Regional (por Vieira et al., 2019); Alta resolução (PMBA/Fest). Em destaque as regiões mapeadas em alta resolução pelo PMBA/Fest ao longo dos 4 anos de monitoramento, na APA Costa das Algas, foz do Rio Doce e Recifes Esquecidos.

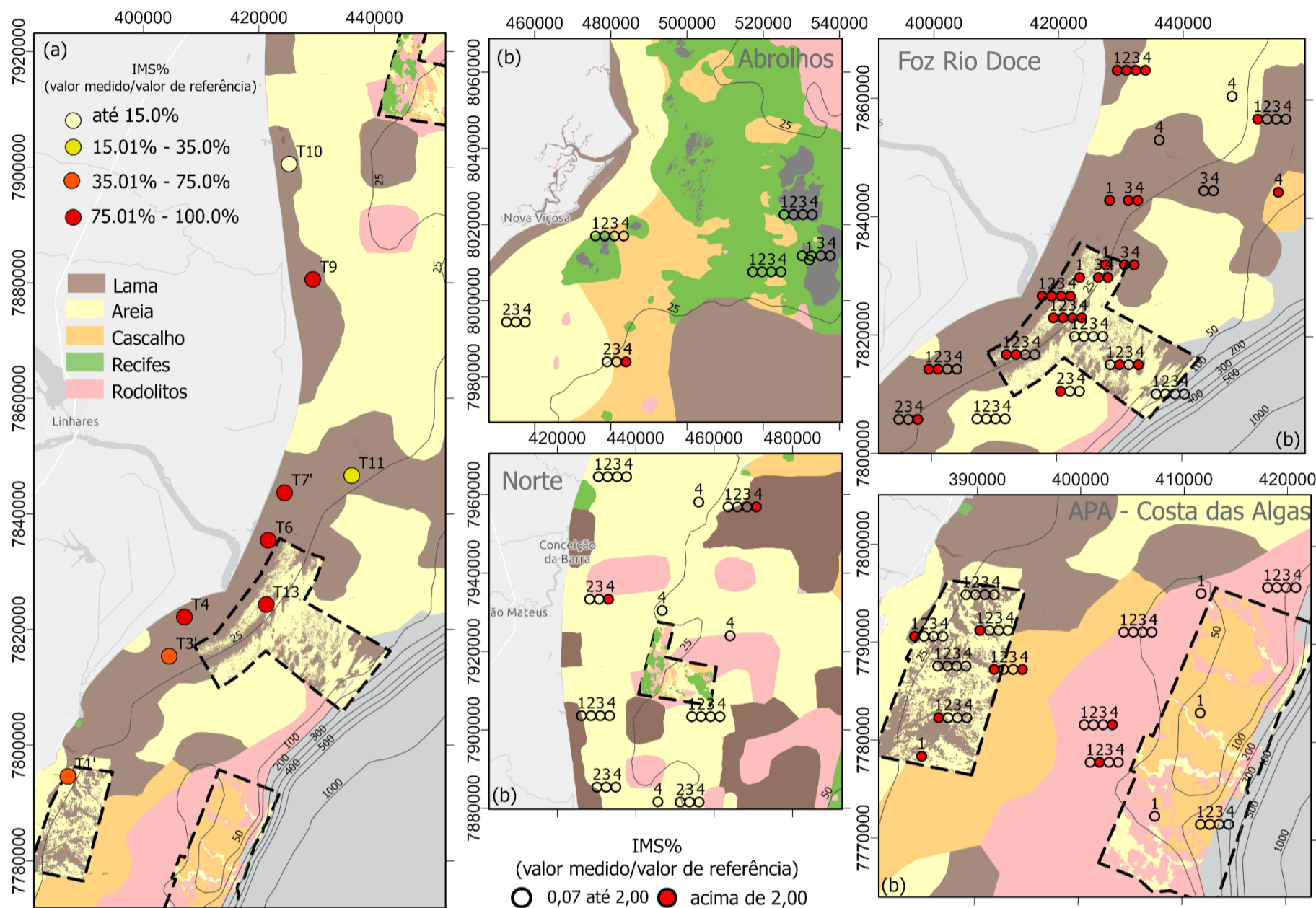


Ao longo dos 4 anos de aquisição de dados geofísicos na plataforma do Espírito Santo, as 3 grandes regiões mapeadas (APA Costa das Algas, Foz Rio Doce e Recifes Esquecidos) revelaram em detalhe uma plataforma heterogênea tanto morfológicamente como considerando o tipo de fundo. Essa heterogeneidade já era previamente conhecida e descrita em uma escala mais regional (Bastos et al., 2015 e Vieira et al., 2019), com ênfase na distribuição das características granulométrica ao largo da plataforma Continental do Espírito Santo e Abrolhos. Desta forma, o mapeamento acústico detalhado destas regiões evidenciou uma maior complexibilidade de habitat e ecossistemas, corroborando os trabalhos já publicados e aumentando muito a resolução batimétrica previamente existente (dados de cartas náuticas).

Na região mais ao sul da plataforma, no Setor APA Costa das Algas, o detalhamento revelou em sua porção mais profunda um habitat de vales incisos com profundidades equivalentes a quebra de plataforma, e regiões mais planas entre vales. Rodolitos ocorrem amplamente em todo tipo de feição geomorfológica (fundo de vales, borda dos vales, entre vales). Na classificação proposta, as porções cascalhosas coincidem com regiões mais planas entre os vales enquanto que as arenosas com os fundos dos vales. Já na porção mais rasa da APA, pelo detalhamento acústico também é observado um início de um canal com fundo lamoso além de no geral habitat com morfologia mais inclinada em fundo de lama e mais plana em fundo arenoso.

Na região da plataforma em frente ao Rio Doce, no Setor Foz, se destaca uma alternância de habitat de fundo plano lamoso com bancos de areia lineares oblíquos a costa. As porções mais arenosas se encontram em direção offshore (a partir de 25-30 m de profundidade) e são alongamentos com cumes mais íngremes nas bordas. Desta forma, o habitat lamoso encontrado na plataforma interna da região do Rio Doce refere-se ao depocentro oriundo do aporte sedimentar do rio que posteriormente é retrabalhado pelos processos físicos presentes na plataforma. A presença de cordões arenosos e escarpas na região, reforçam a transição da dinâmica sedimentar de lama para areia em direção offshore. Assim, o material ali depositado pode ser transportado/retrabalhado para regiões mais externas da plataforma.

Figura 37: Avaliação do Indicador Integridade dos Habitats a partir da presença do sinal do rejeito (IMS (%)) e do impacto na comunidade bentônica. Testemunhos - Distribuição espacial de porcentagem dos estratos no testemunham que se encontram acima do valor de referência para IMS (%) no Ano 3 (2021). Essa avaliação é feita para os habitats ao longo da plataforma do Espírito Santo tanto em escala regional (Vieira et al., 2019) e quanto em alta resolução (PMBA/Fest). Integridade dos Habitat em relação aos Bentos - Nascimento et al. (2022), a comunidade bentônica apresentou algum tipo de alteração à dados pré-rompimento da barragem quando o valor de IMS (%) é superior a 2x o valor de referência. Os mapas indicam as áreas onde os valores de IMS (%) no sedimento superficial estão entre 0 e 2x, >2x o valor de referência. A integridade do habitat pode ser avaliada considerando as áreas onde há impacto comunidade bentônica e a presença do sinal do rejeito. Esta análise é feita ao longo da distribuição dos pontos de monitoramento por setores (APA Costa das Algas, Foz Rio Doce, Norte e Abrolhos). Cada círculo representa um ano de monitoramento, e todos os pontos que estão lado a lado são referentes geograficamente ao primeiro ponto da fileira (estando deslocados lateralmente para visualização concomitante dos 4 anos analisados, quando disponível).



Sinal de Rejeito em Testemunhos (a)

Integridade dos Habitat em relação ao Bentos (b)

Sedimentação Marinha

0 10 20 km
Projeção: UTM Datum: SIRGAS 2000

LaboGeo
Marine Geosciences Lab/UFES

A distribuição espacial de porcentagem de estratos de testemunhos com a presença do sinal do rejeito está diretamente relacionada com o padrão de dispersão da pluma do Rio Doce, acúmulo, ressuspensão e transporte de sedimentos finos, onde os sedimentos são depositados na porção foz sul do Rio Doce (depocentro) e posteriormente são transportados e retrabalhados para as porções offshore e direção norte/nordeste da plataforma (Quaresma et al., 2015; Vieira et al., 2019). Pela análise da porcentagem de estratos acima do valor de referência é possível afirmar que as regiões lamosas em frente à Foz do Rio Doce e a Degredo são as mais impactadas com o sinal do rejeito observado em mais de 75% dos estratos de testemunhos nessa localidade. Já na porção que vai da Foz do Rio Doce em direção sul, atingindo a parte rasa da APA Costa das Algas, a porcentagem dos estratos acima do valor de referência ultrapassa 35%. A análise de integridade dos habitat em relação ao bentos utilizou o valor de duas vezes (2x) acima do valor de referência para indicar o impacto na comunidade bentônica (Nascimento et al., 2022) ao longo dos 4 anos do PMBA/Fest. No geral, os valores acima da referência para a presença do sinal do rejeito estão também relacionados ao processo de dispersão da pluma do Rio Doce, seguido da deposição e ressuspensão do sedimento fino, assim como nos testemunhos descritos acima. Nas estações de coleta em frente à foz do Rio Doce e em direção norte, até a profundidade de ~30m, há reincidência do valor do IMS acima do nível de referência. Assim, o habitat lamoso da plataforma interna adjacente à foz do Rio Doce (aproximadamente até 30 metros), se encontra impactado, ou seja, com baixa integridade. Já na porção externa da plataforma adjacente à foz do Rio Doce, as estações mais associadas ao habitat arenoso indicam sinais de presença de rejeito mais intercalados entre os anos ou nenhum sinal. A interpretação é que essa região offshore à foz do Rio Doce pode receber aporte de rejeito de forma intermitente e possivelmente associada à variabilidade das forçantes oceanográficas. No Setor APA Costa das Algas, a região mais afetada ao longo dos anos seria a porção rasa de habitat de lama e areia. Entretanto, vale a pena ressaltar que nesta região da APA rasa há a ocorrência de fundos rígidos associados à possíveis terraços de abrasão e não necessariamente ocorre um monitoramento do impacto nestas áreas. Na plataforma externa da APA, fora da área de detalhamento acústico, existem indícios da presença do sinal do rejeito e o impacto na comunidade bentônica.

Os resultados não são consistentes, já que nas duas estações, o impacto só teria ocorrida em um ano, porém o habitat atingido foi o de fundos de rodolitos, que é um habitat vulnerável. Nos setores Norte e em Abrolhos, o impacto na comunidade bentônica só foi observado no ano 4 do monitoramento ocupando habitat arenoso e de rodolito (Norte), bem como de cascalho em Abrolhos. Entretanto, o resultado não tem consistência espalho-temporal ao longo dos setores estudados. A continuidade do monitoramento poderá mostrar se a mesma condição se repetirá em 2023.

4 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Para o presente tema, todas as coletas e análises previstas estão concluídas ou em andamento de acordo com o cronograma planejado.

5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 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.
- BASTOS, A. C. et al. Shelf morphology as an indicator of sedimentary regimes: A synthesis from a mixed siliciclastic–carbonate shelf on the eastern Brazilian margin. *Journal of South American Earth Sciences*, 63, 125–136, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.07.003>
- 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.
- CONNOR D. et al. Revising the marine section of the EUNIS Habitat classification. Report of a workshop held at the European Topic Centre on Biological Diversity, 12 & 13 May 2016 revised 2017
- DIAS, J.A. A análise Sedimentar e os Conhecimentos dos Sistemas Marinhos, Universidade do Algarve Faro, Portugal, 84 p., 2004.
- KOMADA, T.; ANDERSON, M. R.; DORFMEIER C. L. Carbonate removal from coastal sediments for the determination of organic carbon and its isotopic signatures, $\delta^{13}\text{C}$ and $\Delta^{14}\text{C}$: 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.
- 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.
- NASCIMENTO R.L. et al. The Fundão dam failure: Iron ore tailing impact on marine benthic macrofauna. *Sci Total Environ*. Sep 10;838(Pt 3):156205, 2022. doi: 10.1016/j.scitotenv.2022.156205. Epub 2022 May 24. PMID: 35623525.
- OLIVEIRA, K.S.S. et al. Wave-driven sediment mobility on the Eastern Brazilian shelf under different weather systems. *Geo-Mar Lett* 41, 28, 2021. <https://doi.org/10.1007/s00367-021-00699-3>
- 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>

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.

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.

VIEIRA, F.V. et al. Along-shelf changes in mixed carbonate-siliciclastic sedimentation patterns. *Continental Shelf Research*, 187, 103964. 2019. <https://doi.org/10.1016/j.csr.2019.103964>

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.