

**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- 46/ JUN 24**

**RA2023 PMBA/Fest**

Vitória,

Junho de 2024

## **EQUIPE TÉCNICA**

Prof. Alex Cardoso Bastos

Profa. Valéria Quaresma

Prof. Marcos Tadeu D'Azeredo Orlando

Ana Carolina Ribeiro Fieschi Lavagnino

Anita Gomes Ruschi

Arthur Sant'Ana Cavichini

Fernanda Vedoato Vieira

Flávia Acypreste Alfredo Garonce

Geandré Carlos Boni

Jordan Syllas Saraiva Leite

Larissa Marques Freguete

Livia Rodrigues Garcez

Lorena Ferreira Monteiro

Mayara de Oliveira Bandeira

Michele Sardinha de Oliveira

Tarcila Franco Menandro

## SUMÁRIO

<b>1</b>	<b>HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL .....</b>	<b>4</b>
<b>2</b>	<b>METODOLOGIA .....</b>	<b>5</b>
2.1	COLETA .....	5
2.1.1	Sedimentologia (Marinho Integrado) .....	5
2.1.2	Mapeamento de habitat .....	5
2.2	ANÁLISE.....	6
2.2.1	Análise de Material Particulado em Suspensão (MPS).....	6
2.2.2	Análise de sedimento superficial de fundo e de testemunhos.....	7
2.2.3	Análise de densidade .....	7
2.2.4	Análise de mobilidade do fundo .....	8
2.2.5	Análise mineralógica do sedimento superficial e testemunhos.....	8
2.2.6	Análise geoquímica do sedimento em testemunhos .....	10
2.2.7	Mapeamento de habitat e avaliação da vulnerabilidade do ecossistema.....	10
2.2.8	Análise estatística.....	12
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	12
<b>3</b>	<b>RESULTADOS DOS INDICADORES .....</b>	<b>14</b>
3.1	MATERIAL PARTICULADO EM SUSPENSÃO - (MPS) E TEOR DE MATÉRIA ORGÂNICA (% MO) .....	15
3.2	POTENCIAL DE MOBILIDADE DO SEDIMENTO SUPERFICIAL DE FUNDO .....	38
3.3	VALORES DE IMS ( <i>IRON MINERALOGICAL SET</i> ) E PRESENÇA DO SINAL DE REJEITO NO SEDIMENTO DE FUNDO .....	45
3.4	ACUMULAÇÃO DE REJEITO NO FUNDO MARINHO .....	58
3.5	EXTENSÃO E INTEGRIDADE DE HABITAT MARINHO .....	60
<b>4</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO .....</b>	<b>66</b>
<b>5</b>	<b>ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS .....</b>	<b>70</b>
<b>6</b>	<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>72</b>

## 1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

A malha e frequência amostral do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática da Área Ambiental I (PMBA/Fest) passou por modificações ao longo do tempo, visando seu aperfeiçoamento para atendimento 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 continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) MS – Malha e Frequência amostral, 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 histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais monitoradas 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 monitoradas a partir de agosto de 2022, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.



## 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 agosto de 2022 (e dezembro de 2022 para o Tema Ecotoxicologia). 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 12 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 (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<sub>3</sub>) 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<sub>3</sub> 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<sup>3</sup>.

Para a apresentação gráfica, uma linha vermelha foi inserida onde delimita valores abaixo de 1200 kg/m<sup>3</sup>, 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 ( $\tau = \rho \cdot u' \cdot w'$ ), 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 e testemunhos

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 semi-quantitativa 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  $\pm 5\%$  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 ( $\chi_{ac}$ ) 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 (FeO<sub>total</sub>). Para caracterização da química mineral foram considerados como parâmetro o ferro total (FeO<sub>total</sub>), a alumínio (Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>), a sílica (SiO<sub>2</sub>) 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).

Quanto 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







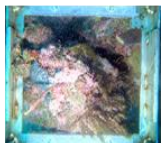
Os resultados das análises geoquímicas em testemunhos foram apresentados no Relatório Anual de 2021 (RRDM, 2021) e, portanto, não serão repetidas aqui. Desta maneira, a metodologia para esta análise não será apresentada neste material suplementar.

### 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 foz 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 - Rio Doce e na área dos Recifes Esquecidos. Tabela 1, sumariza as sete categorias.

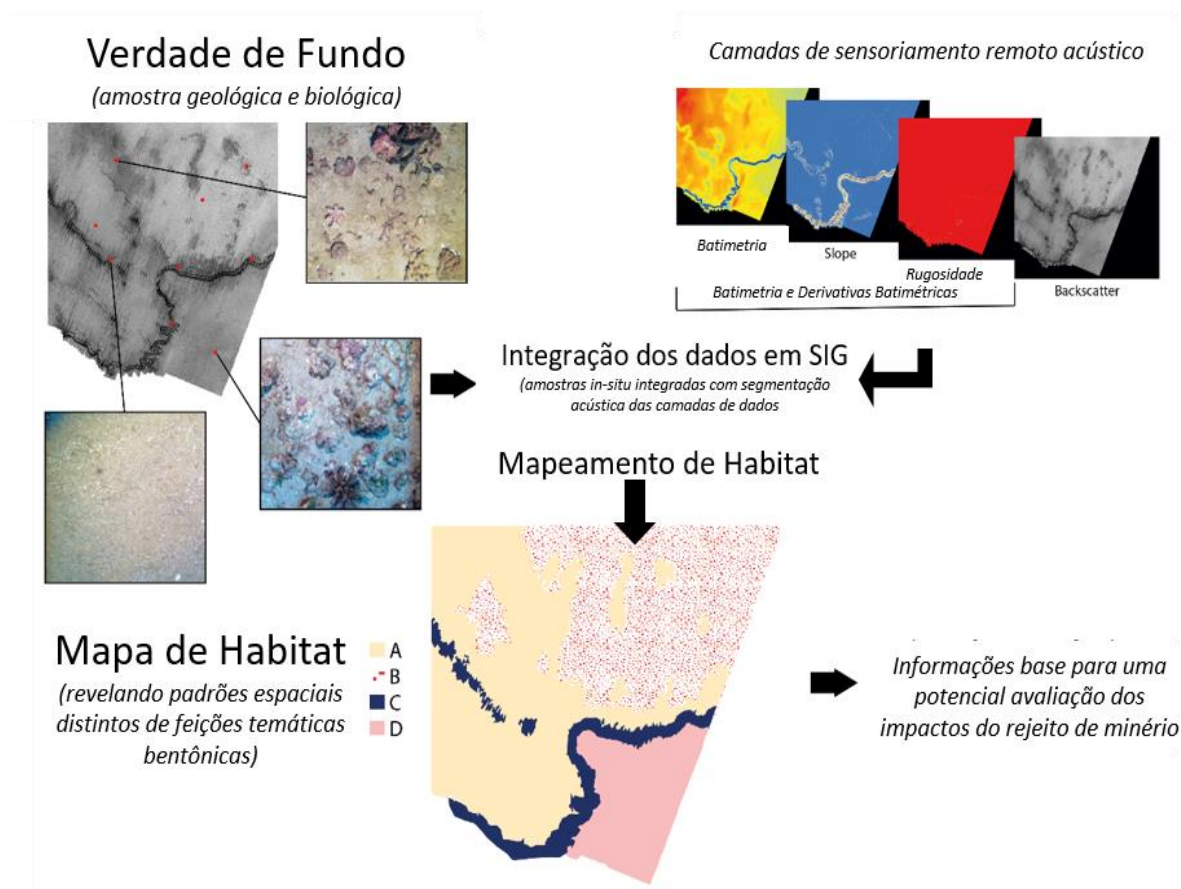


Tabela 1: Categorias de imagens padronizadas para todas as áreas de coleta com exemplos de imagem e uma breve descrição para cada uma. A classificação das imagens e dos tipos de habitats podem variar de um ano para outro em função do aumento da área mapeada e de imagens de fundo obtidas, levando, no modelo de classificação, a criação de novas categorias.

Categorias	Exemplo de imagem	Breve descrição das categorias
Areia		Areia com cascalho/fragmentos carbonáticos
Lama		Sedimentos mais finos tipo lama
Rodolito, fragmento e areia		Rodolitos mais espaçados com fragmentos carbonáticos esbranquiçados e areia
Rodolito I		Rodolitos mais numerosos com muitas macroalgas associadas
Rodolito II		Rodolitos nodulares numerosos e alguns com formato ramificado
Bioconstrução		Aglomerados de alga calcária e/ou rodolito formando feições tridimensionais
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.



### 2.2.8 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 metodologia de análise da susceptibilidade magnética passou a ser realizada nas análises mineralógicas.

O equipamento LISST (*Laser In-Situ Scattering and Transmissometry*; mede a 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 de todo monitoramento na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar o histórico 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 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 como se segue:

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

Figura 2: **(A)** Vazões medianas mensais ( $\text{m}^3/\text{s}$ ) 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) 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) e do Ano 5 (barra verde; outubro de 2022 a setembro de 2023, do Ano 6 (barra laranja; outubro de 2023 a dezembro de 2023) PMBA/Fest.

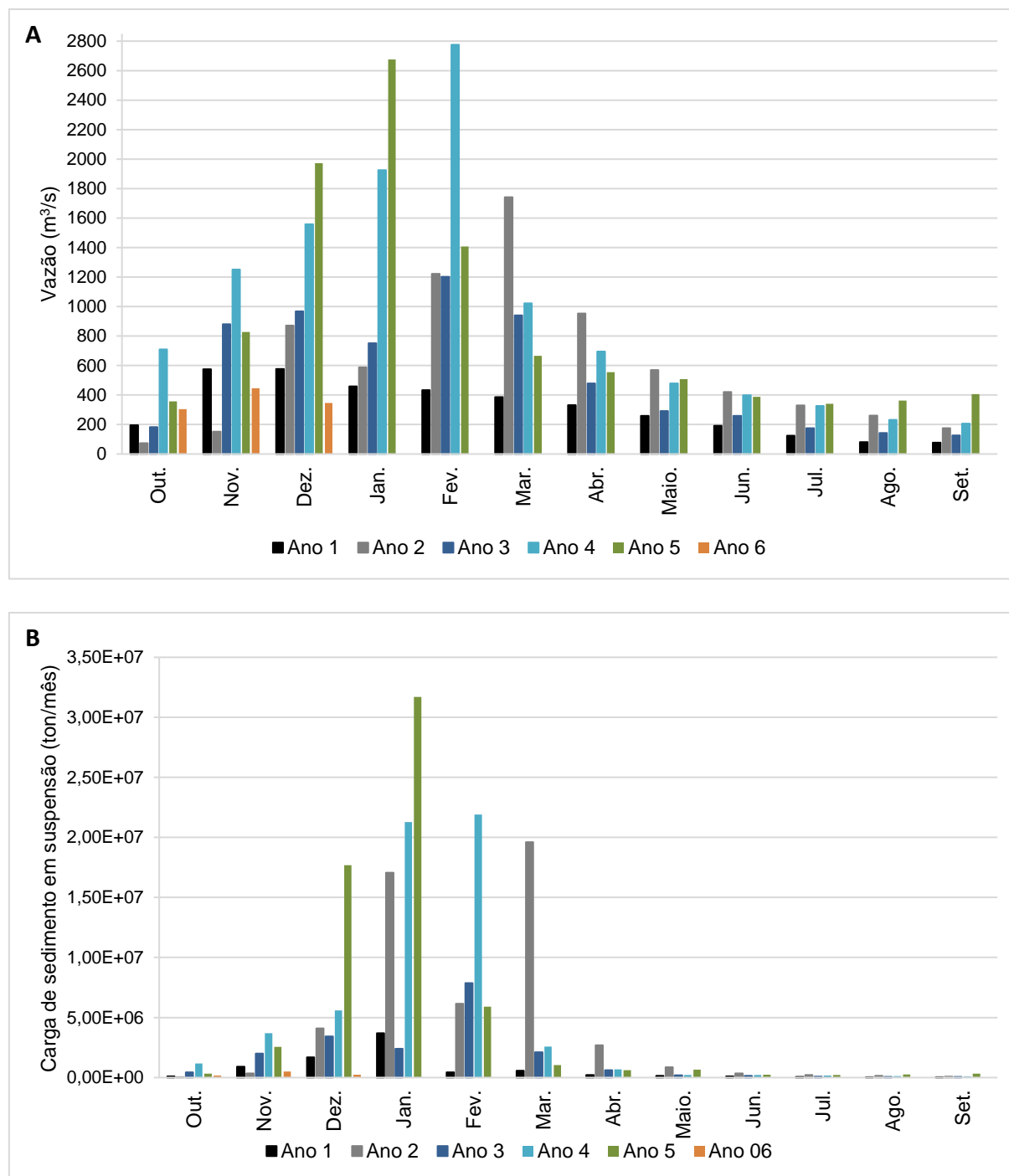


Figura 3: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS; caixas pretas) e teor de matéria orgânica (MO; caixas azuis) do MPS para amostras de água coletadas **(A)** superfície, **(B)** meio e **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água para o Setor Abrolhos. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos pretos 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.

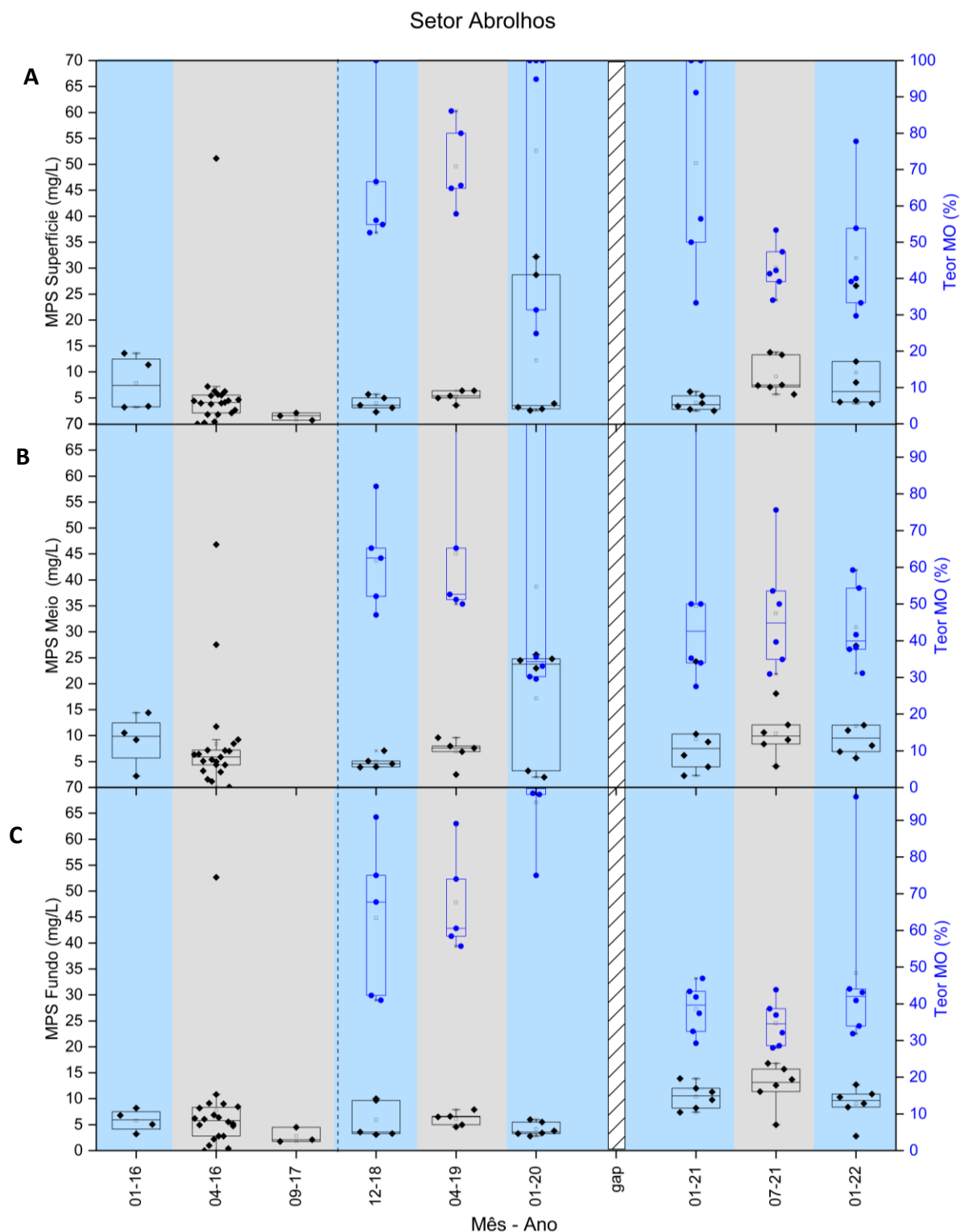
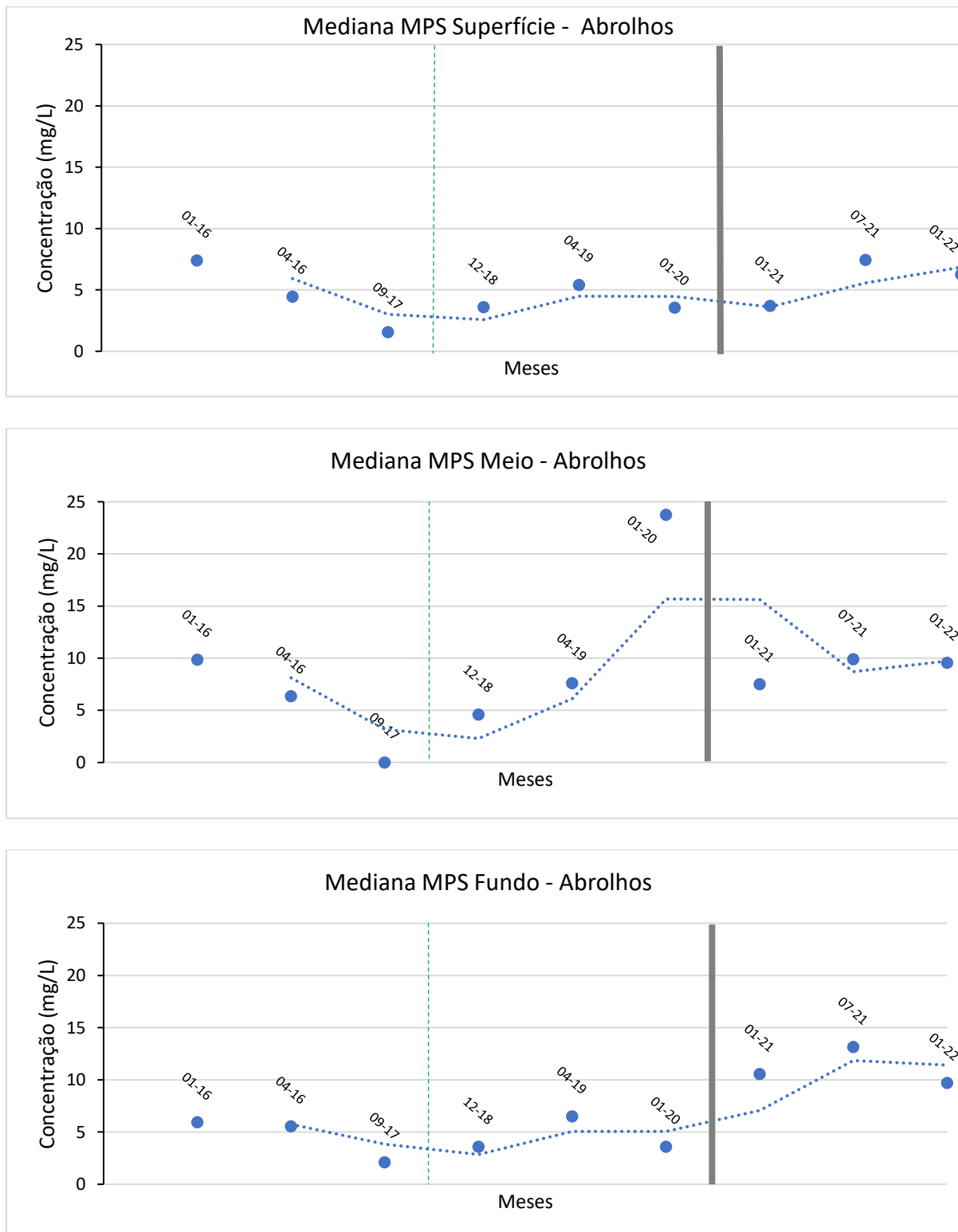


Figura 4: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Abrolhos. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest e a linha cinza indica gap de dados devido à pandemia. Não ocorreram coletas 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 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. A Figura 3 e a Figura 4 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 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 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. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos pretos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.

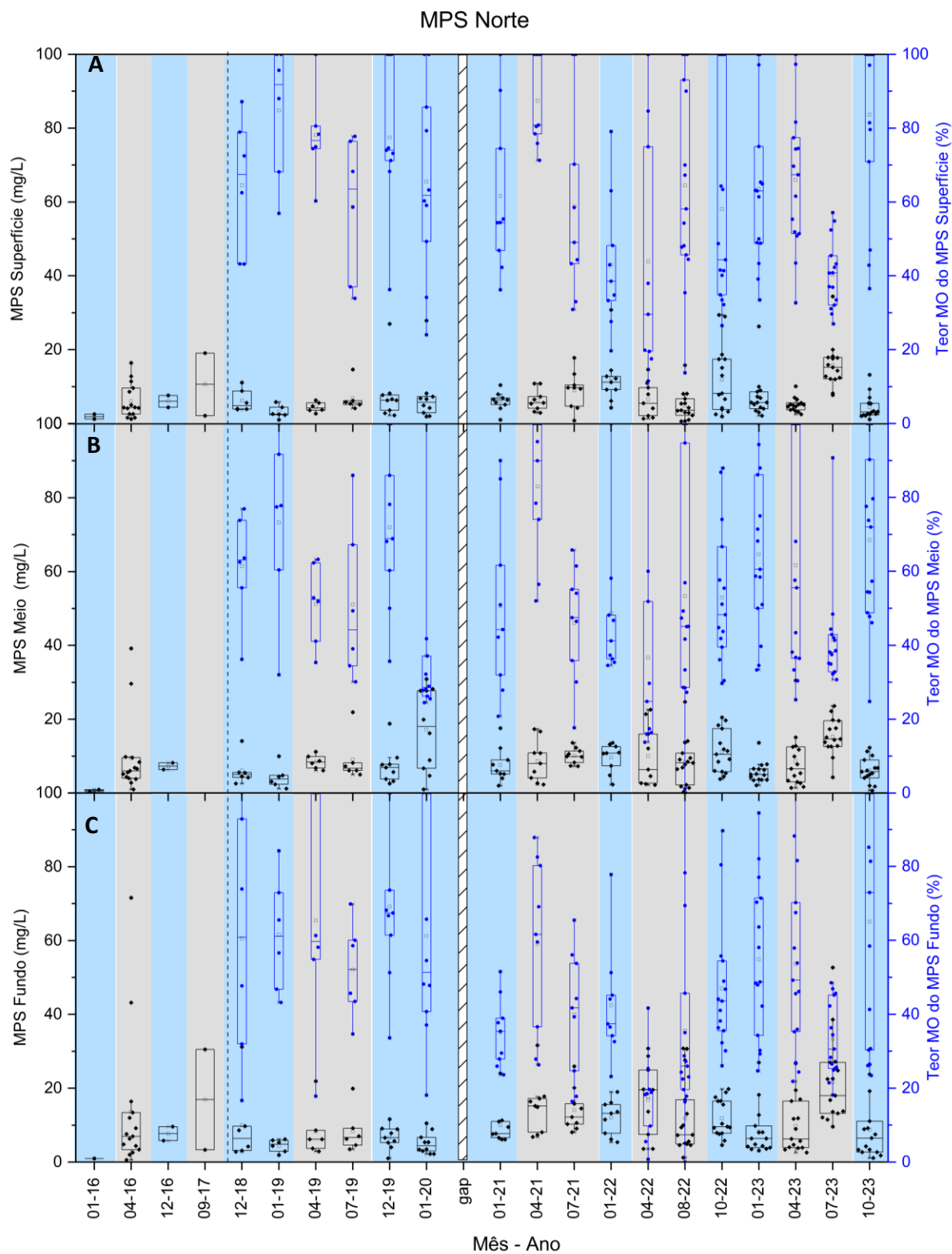
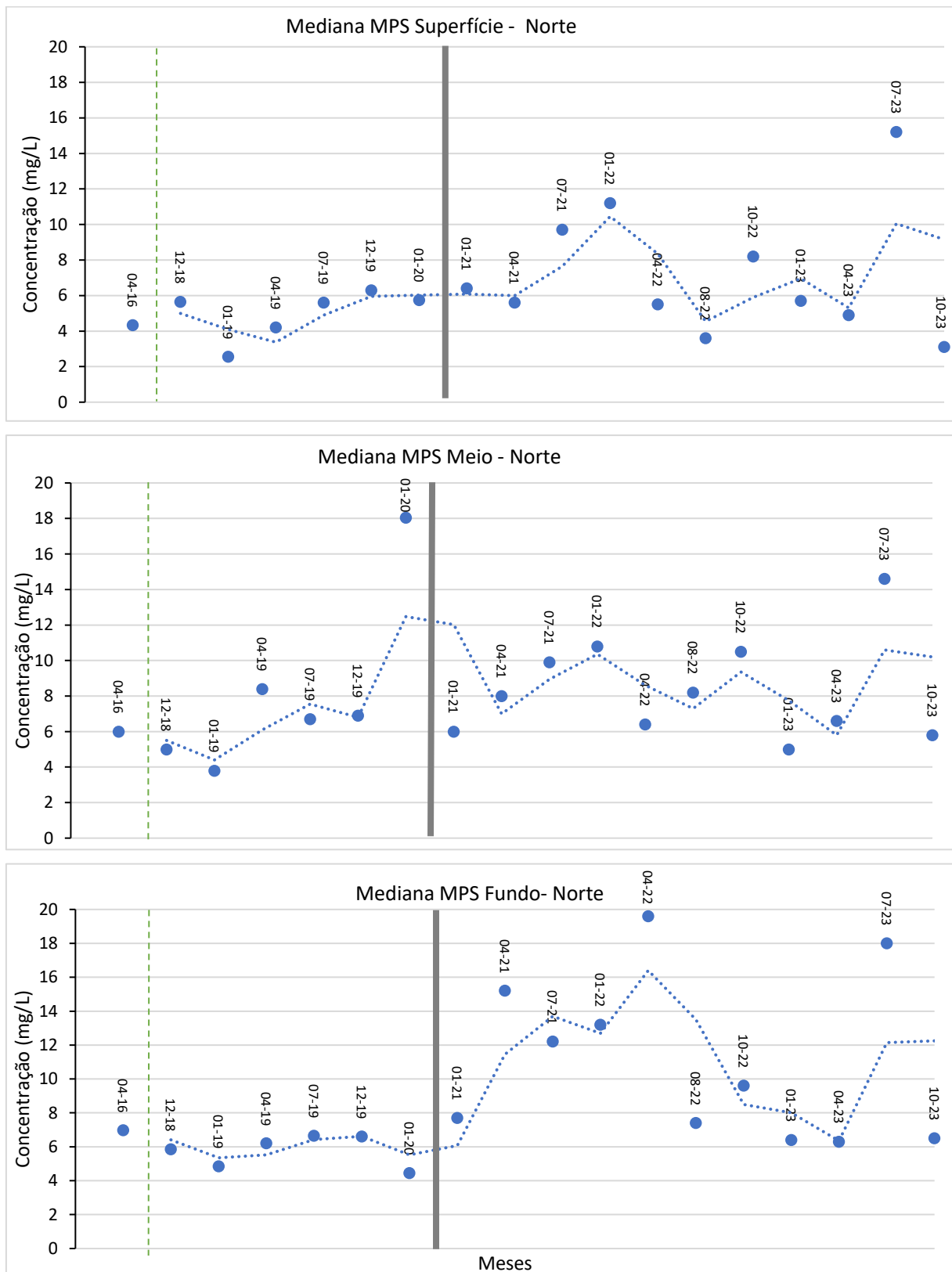


Figura 6: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Norte. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest e a linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.





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 (Figura 5 e Figura 6) para as profundidades Superfície e Meio ocorreram no Ano 2, resultantes de um período chuvoso mais intenso para todo centro – norte do Espírito Santo. Considerados os dados das campanhas do período seco do Ano 4, foi observado um aumento das concentrações de MPS, principalmente para as amostras de fundo, ligado aos eventos de ressuspensão de fundo relacionados a momentos mais energéticos de onda. Entretanto, para o período chuvoso do Ano 5 foi observado uma diminuição do MPS em todos os estratos da coluna d'água em relação ao mesmo período do Ano 4. Para o período seco do Ano 5 ocorreu aumento do MPS e diminuição do teor de Matéria Orgânica (MO) no MPS quando comparado ao período chuvoso desse mesmo ano. 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 dos eventos de ressuspensão de sedimentos do fundo marinho.

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. 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 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.

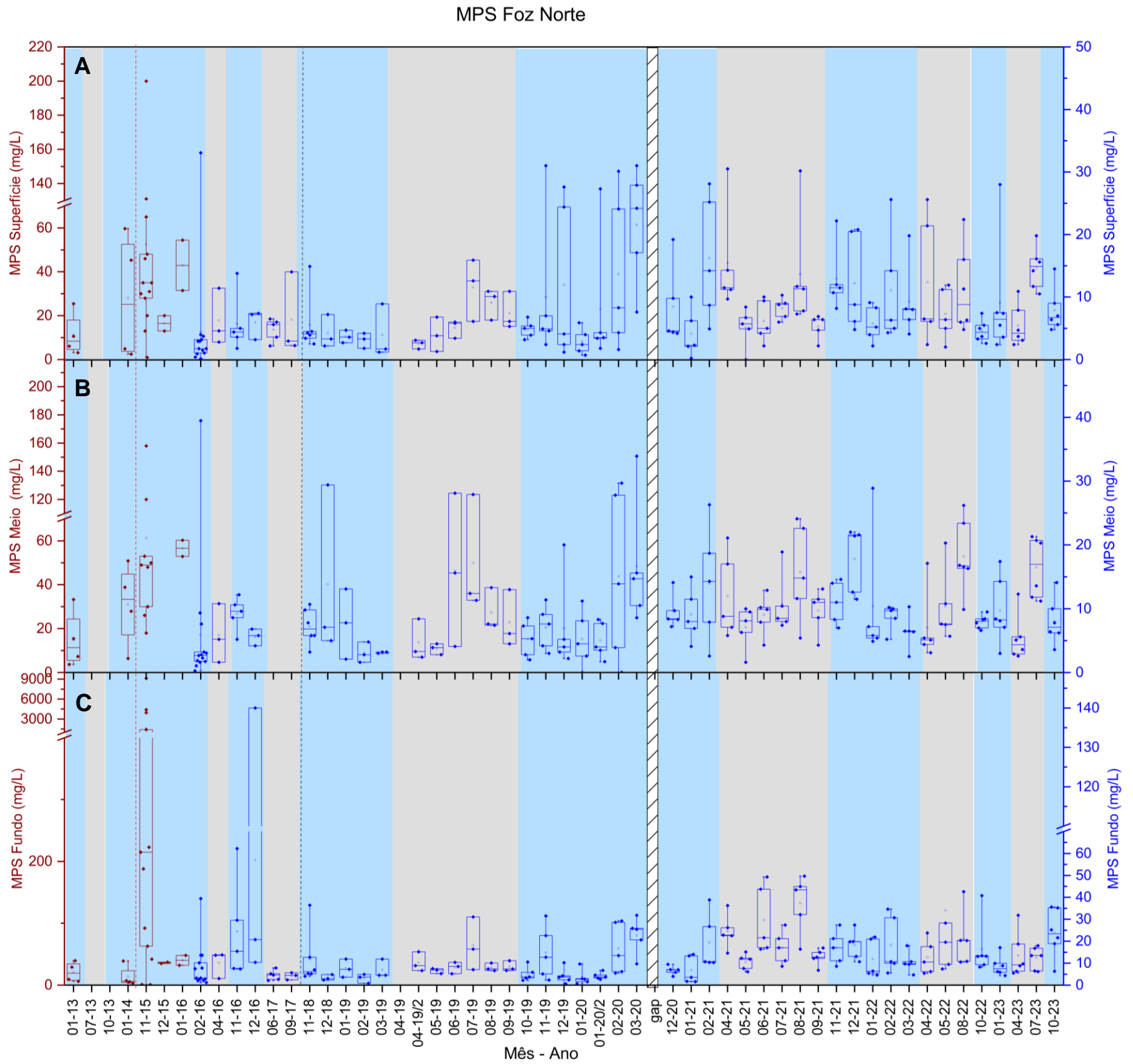


Figura 8: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio e fundo, da coluna d'água para o Setor Foz Norte desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest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

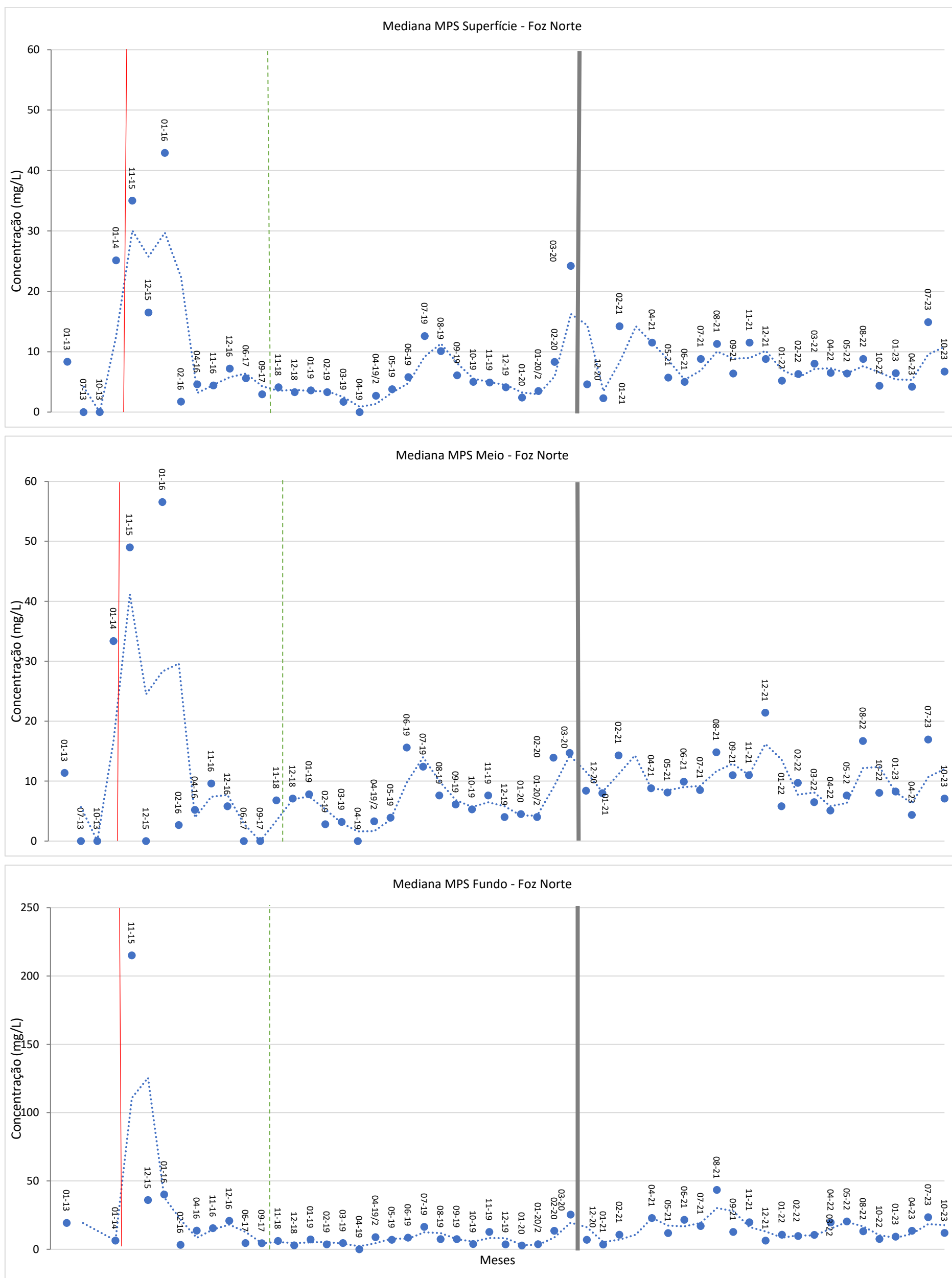
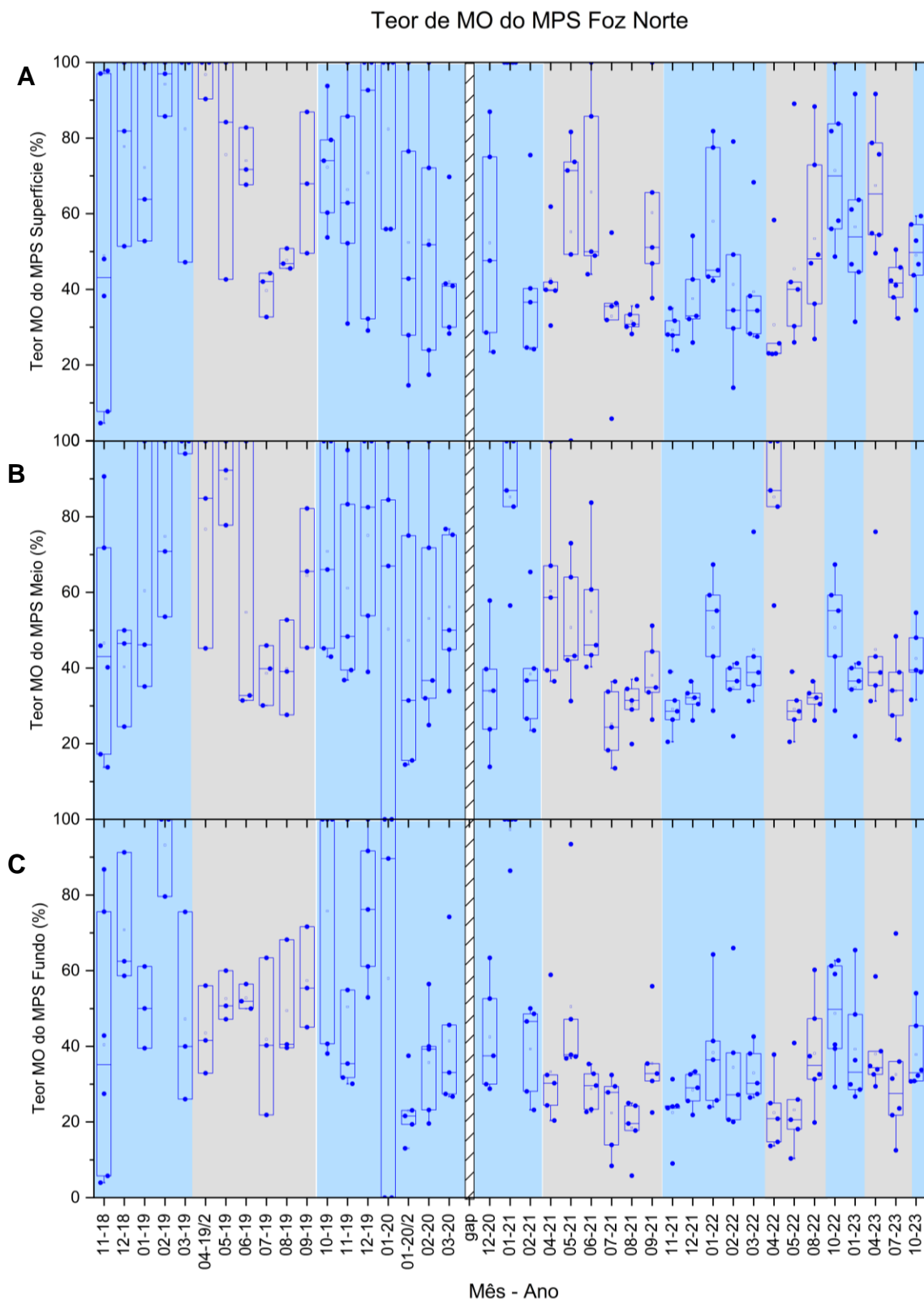


Figura 9: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m acima do fundo), da coluna d'água para o Setor Foz Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Pontos sólidos correspondem aos valores de cada estação amostral. Não há dados pretéritos de teor de matéria orgânica (MO) para esse setor.



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, isso 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 máximas diárias e mediana mensal, entre os meses de 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 (Figura 7 a Figura 9).

Dados pretéritos no setor Foz Norte mostram valores elevados de concentração de MPS em janeiro de 2014, sendo referentes a cheia histórica do Rio Doce. Os demais valores de concentração de MPS estão dentro da variabilidade natural da sazonalidade. Vale destacar apenas que os dados de janeiro de 2014 mostram que a concentração de MPS junto ao fundo possui valores bem baixos, o que é comum quando se tem a maior parte do MPS sendo transportado no meio e na superfície. Porém, com o rompimento da barragem e chegada da lama de rejeito na foz, durante uma grande seca do Rio Doce, a alta concentração desta pluma de rejeito se dispersa junto ao fundo (Quaresma et al., 2020).

Ao longo do PMBA/Fest, os valores máximos de vazão foram observados em janeiro (5179 m<sup>3</sup>/s) no Ano 2; e janeiro (5595 m<sup>3</sup>/s) de 2022 no Ano 4. Para o período chuvoso do Ano 5, as medianas das vazões dos meses de dezembro e janeiro foram superiores aos anos anteriores, porém as vazões máximas não atingiram valores como os registrados para os Anos 2 e 4. Dessa forma, as maiores concentrações de MPS ocorreram no Ano 2 e Ano 4. Entretanto, no Ano 5 as concentrações de MPS no mês de janeiro, tanto na superfície quanto no meio da coluna de água, excederam aquelas observadas no correspondente mês do Ano 4. Ademais, durante o período seco do Ano 5 prevaleceu o mesmo padrão de MPS. Além disso, as concentrações de MPS no Setor Foz Norte, para todas as profundidades, apresentaram tendência de aumento significativo ao longo do período do monitoramento.

Figura 10: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(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. 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

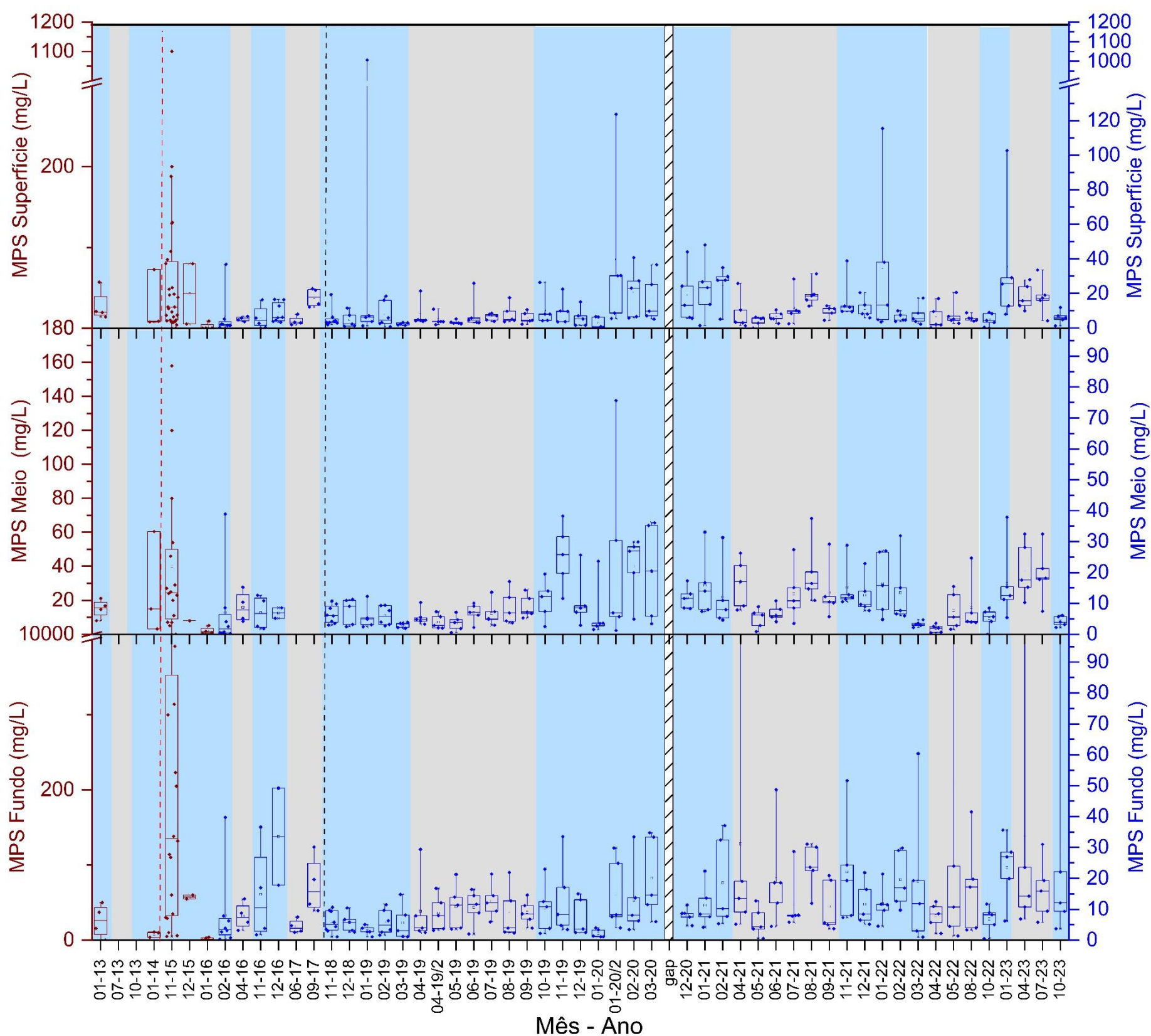




Figura 11: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio, fundo da coluna d'água, para o Setor Foz Central desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA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

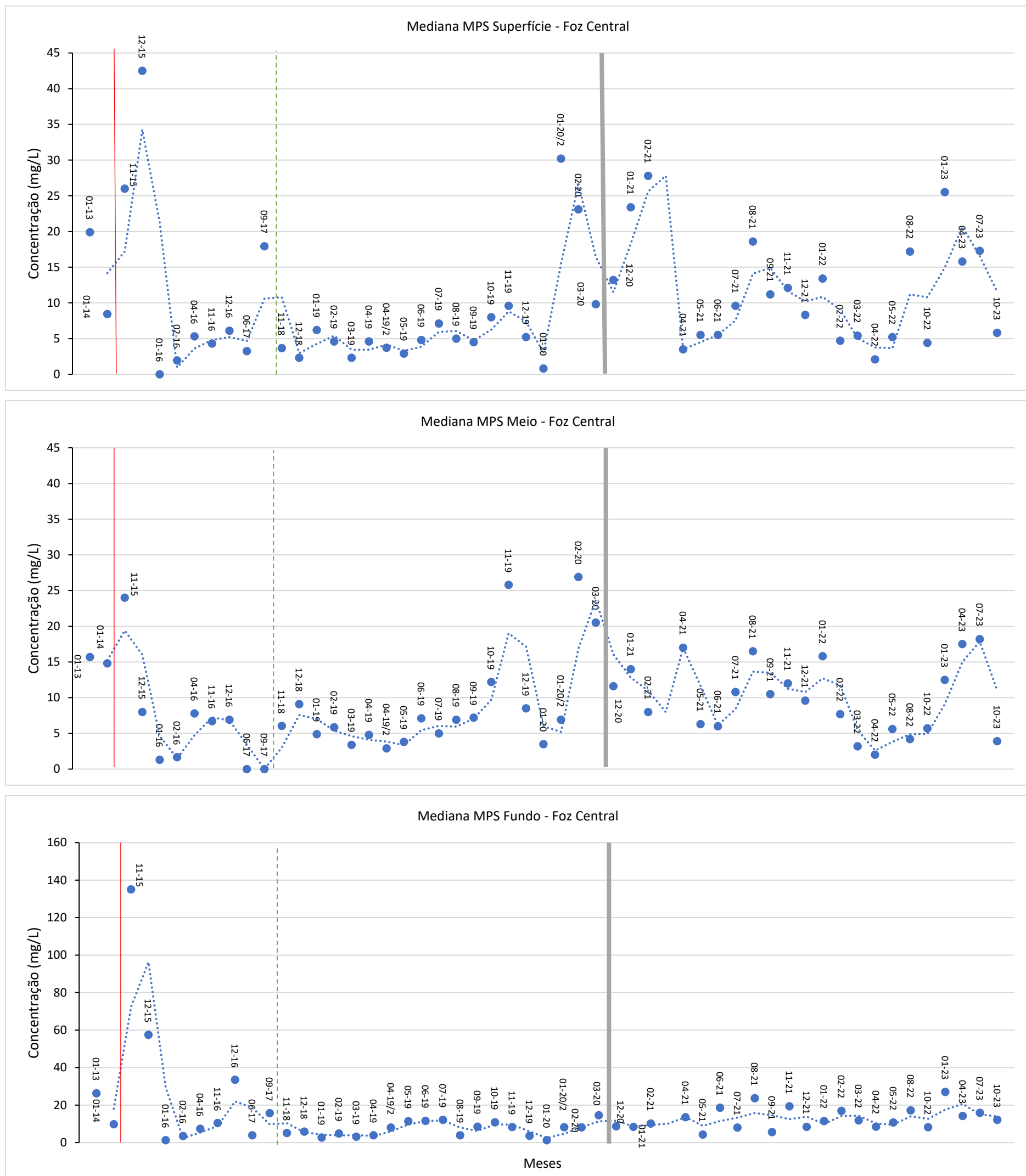
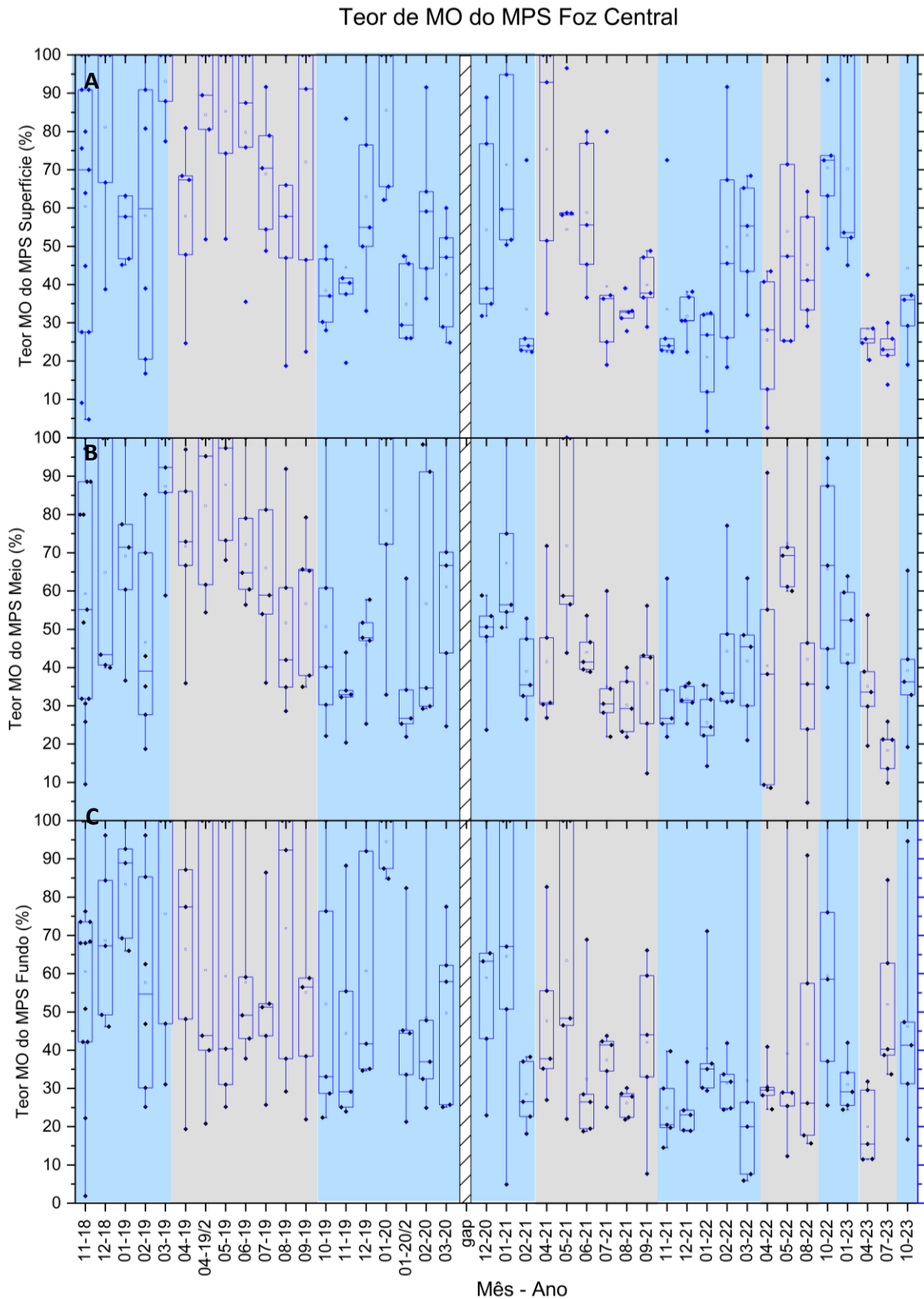


Figura 12: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. 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) 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, porém, ocorreu um aumento das medianas das concentrações de MPS para a superfície e fundo da coluna d'água no Ano 5. Este aumento na concentração pode ser devido ao maior aporte de sedimento em suspensão do Rio Doce em dezembro de 2022 e janeiro de 2023 (Figura 2 B) apontando a influência do aporte de sedimentar 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 m<sup>3</sup>/s no dia 13/01/2022) (estação P21 em Linhares (Tema – Integração Fluvio-Estuarina/PMBA). No dia do pico do evento em questão, a carga de sedimento em suspensão do Rio Doce atingiu 1,5 x10<sup>5</sup> 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 do Ano 04 e 102 mg/L (estação SD 01 na Superfície da coluna d'água) no período chuvoso do Ano 5. Em relação ao período seco do Ano 5 ocorreu um aumento nas concentrações de MPS (superfície e meio da coluna d'água) em relação ao mesmo período do Ano 4.

Entretanto, quando se compara os resultados pós rompimento da barragem com os dados pretéritos, observa-se que os valores de concentração de MPS no setor Foz Central possuem uma alta variabilidade e não é determinante dizer que os valores de MPS pós rompimento são maiores ou menores do antes do aporte de rejeito, uma vez que a variabilidade neste setor é bem elevada. O que se destaca mais uma vez, assim como descrito para o setor Norte, é que a concentração de MPS junto ao fundo é bem elevada, mostrando o processo de alta concentração de lama quando da chegada e da dispersão do rejeito no mar.

Figura 13: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(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. 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

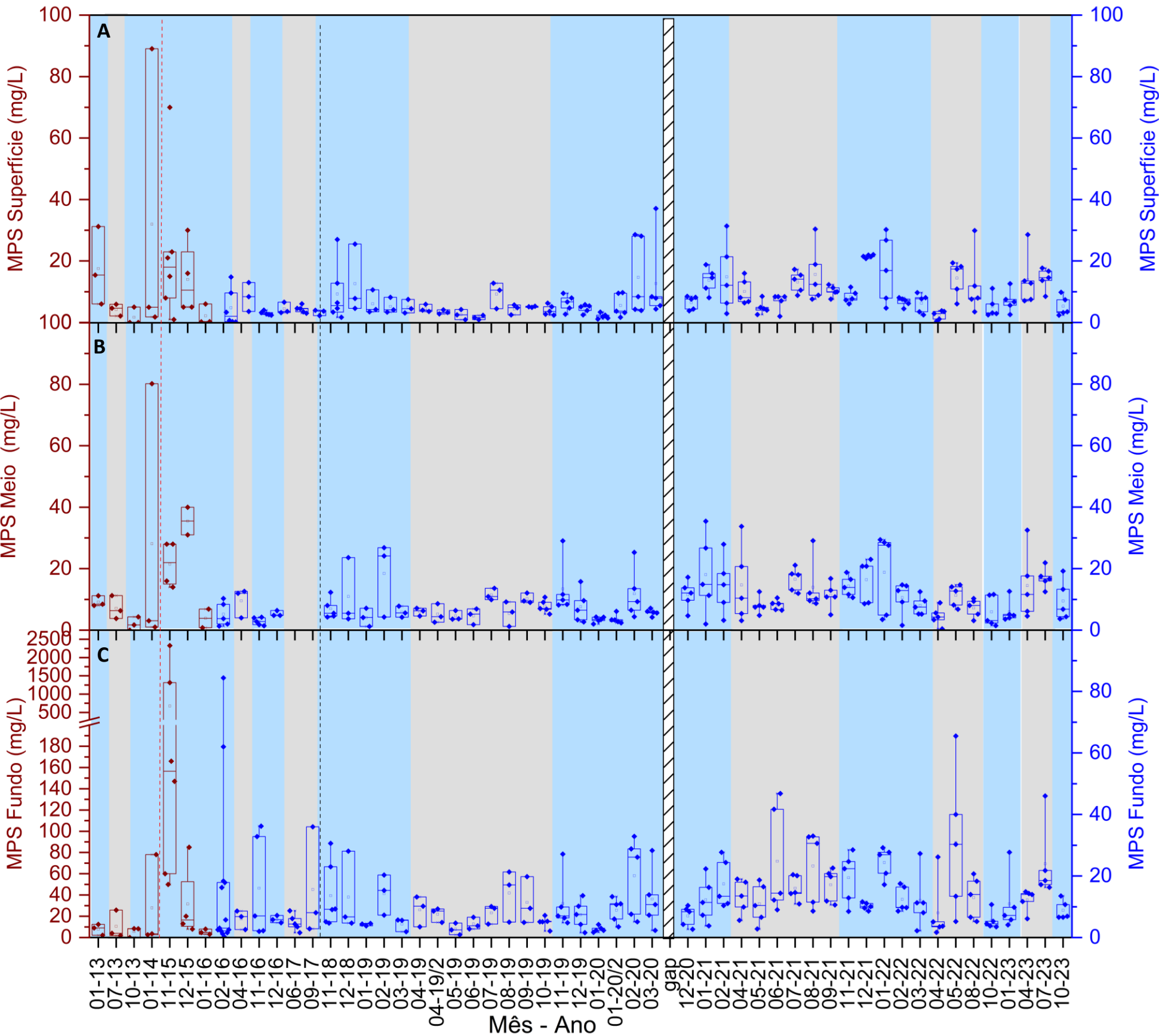


Figura 14: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio, fundo da coluna d'água, para o Setor Foz Central desde janeiro/2013. A linha vermelha indica o rompimento da Barragem de Fundão, a linha verde tracejada indica o início do PMBA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

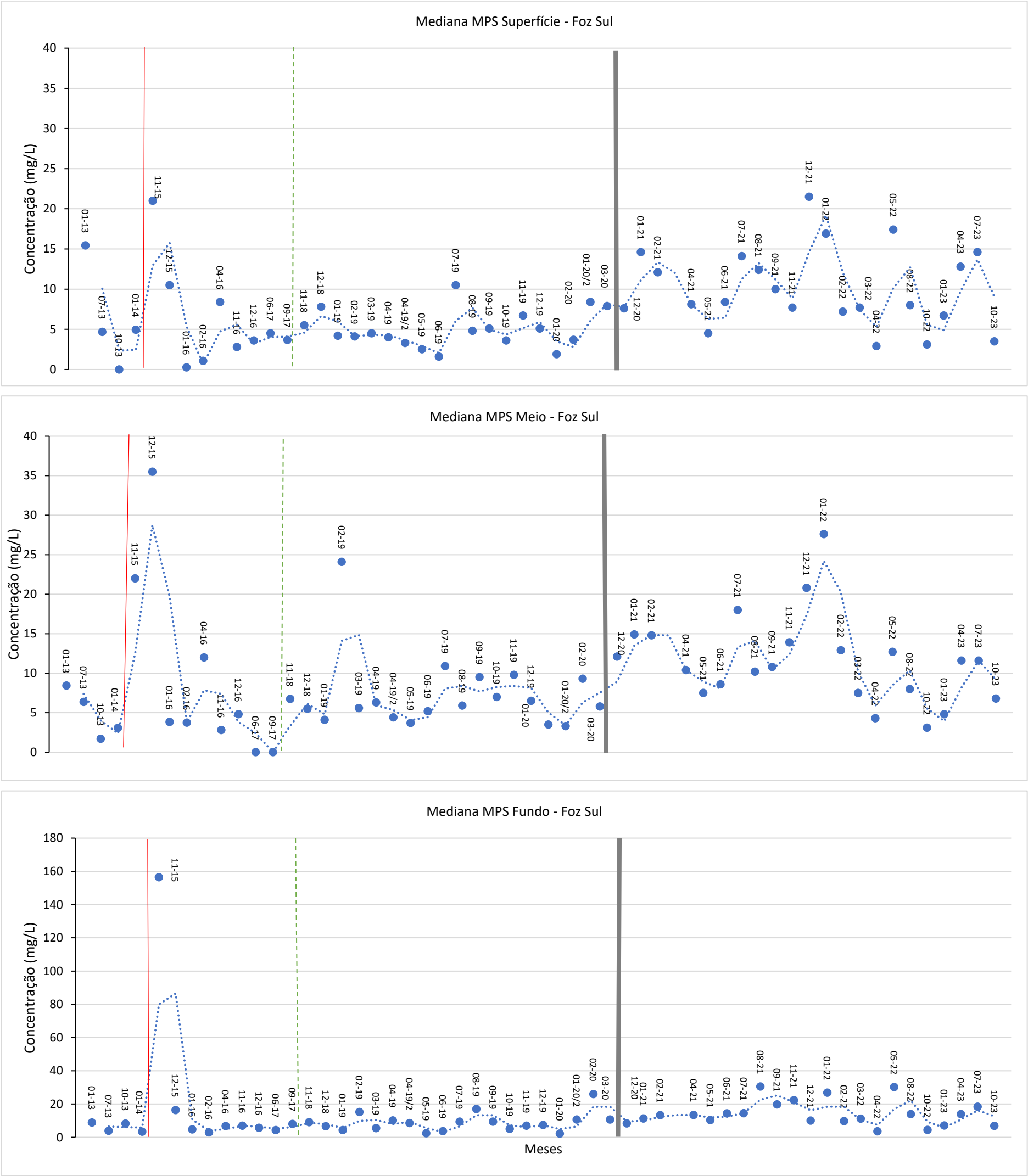
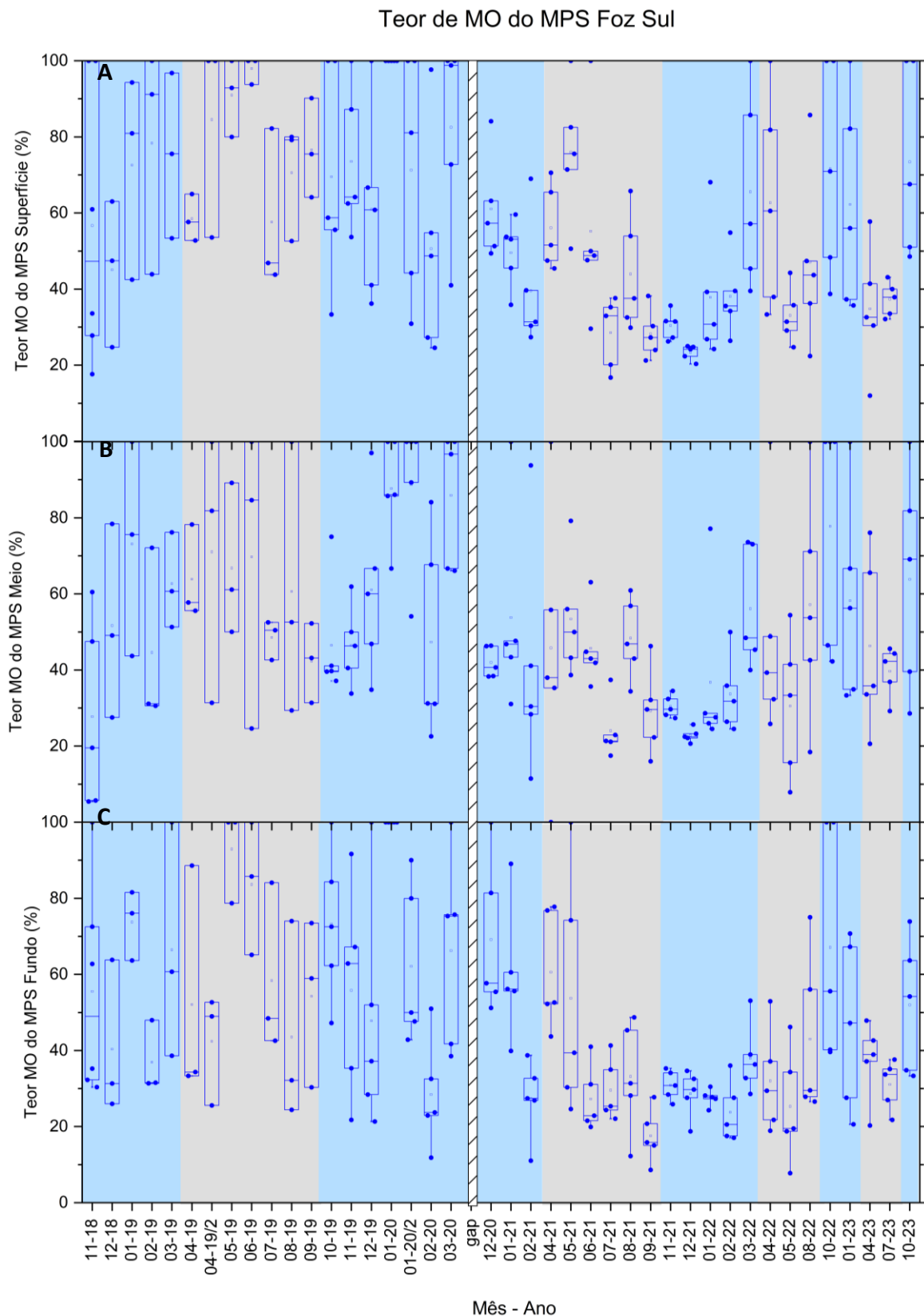


Figura 15: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. 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 para o Setor Foz Sul (Figura 13 a Figura 15) também apresentam tendência de aumento significativo ( $p$ -valor < 0,05) ao longo do período do monitoramento. Entretanto, embora o comportamento das concentrações de MPS no período chuvoso do Ano 5 na Foz Sul continua mostrando a influência direta das condições hidro-meteoceanográficas, o período chuvoso do Ano 5 mostra uma diminuição das medianas das concentrações de MPS associada a um aumento do teor de matéria orgânica (MO) no MPS em relação ao Ano 4. Esse comportamento foi inverso nos outros setores da Foz do Rio Doce. Porém, para o período seco do Ano 5, ocorreu um aumento das concentrações de MPS em todos os estratos da coluna d'água para esse setor, associado a uma redução do teor de MO no MPS, superando os valores de concentrações de MPS do período chuvoso desse mesmo ano e as concentrações do período seco do ano anterior (Ano 4).

Comparando os dados do monitoramento com dados pretéritos e o evento de rompimento da barragem, observa-se que a concentração de MPS em janeiro de 2014 foi bem elevada em relação aos valores de 2013. Isso vale para o MPS de fundo também, o que não foi claramente observado nos outros setores da Foz. O Setor Foz Sul é marcado pelo depocentro (Quaresma et al., 2015), ou seja, onde ocorre o maior acúmulo de sedimento terrígeno aportado pelo Rio Doce. Observando a série temporal de MPS, observa-se que, neste setor, há um aumento na variabilidade dos teores 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.

Figura 16: Concentração de Material Particulado em Suspensão (MPS) para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(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. 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.

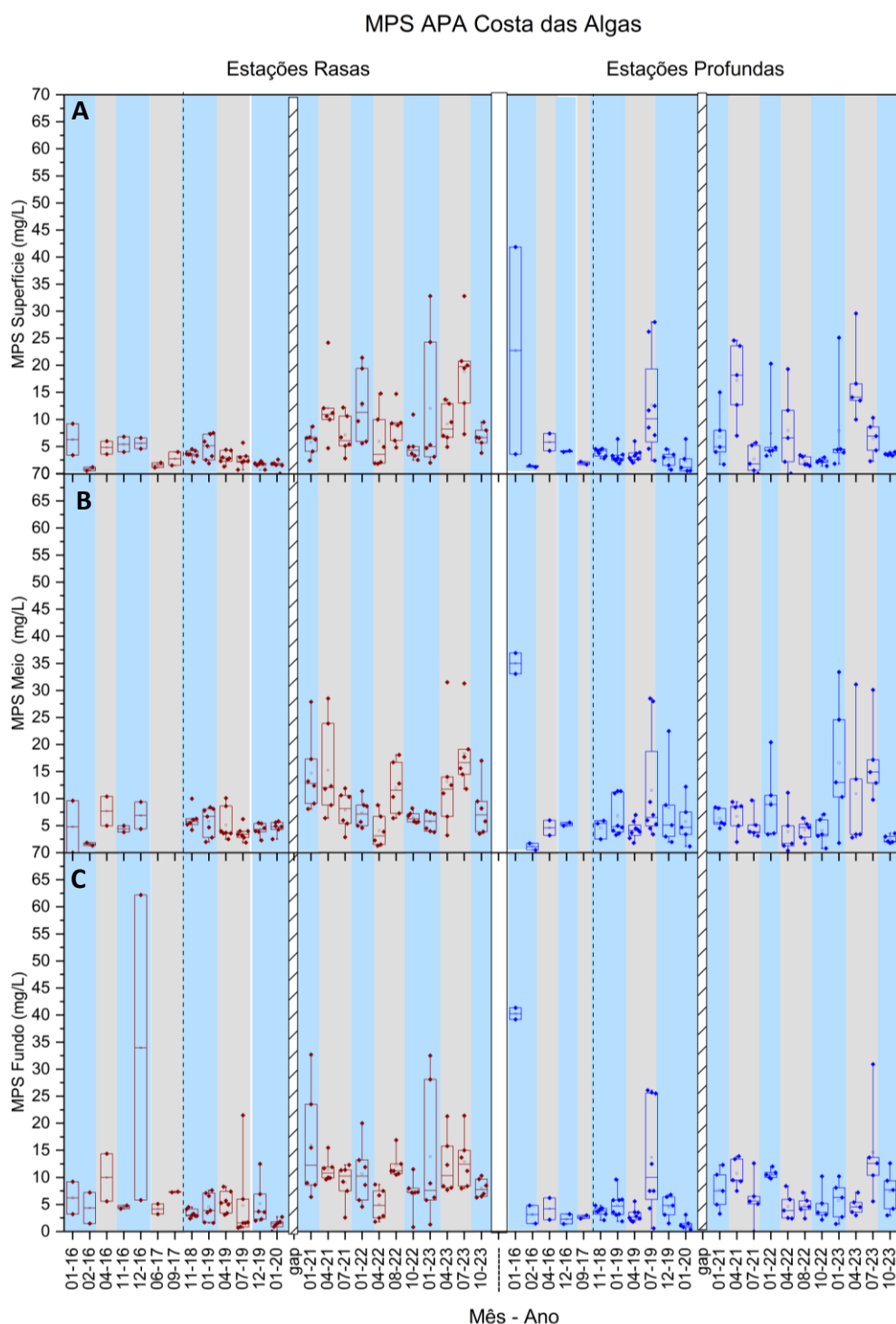


Figura 17: Médias móveis das medianas das concentrações do Material Particulado em Suspensão (MPS), em mg/L, superfície, meio, fundo da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. A linha verde tracejada indica o início do PMBA/Fest e a linha cinza indica gap de dados devido à pandemia.

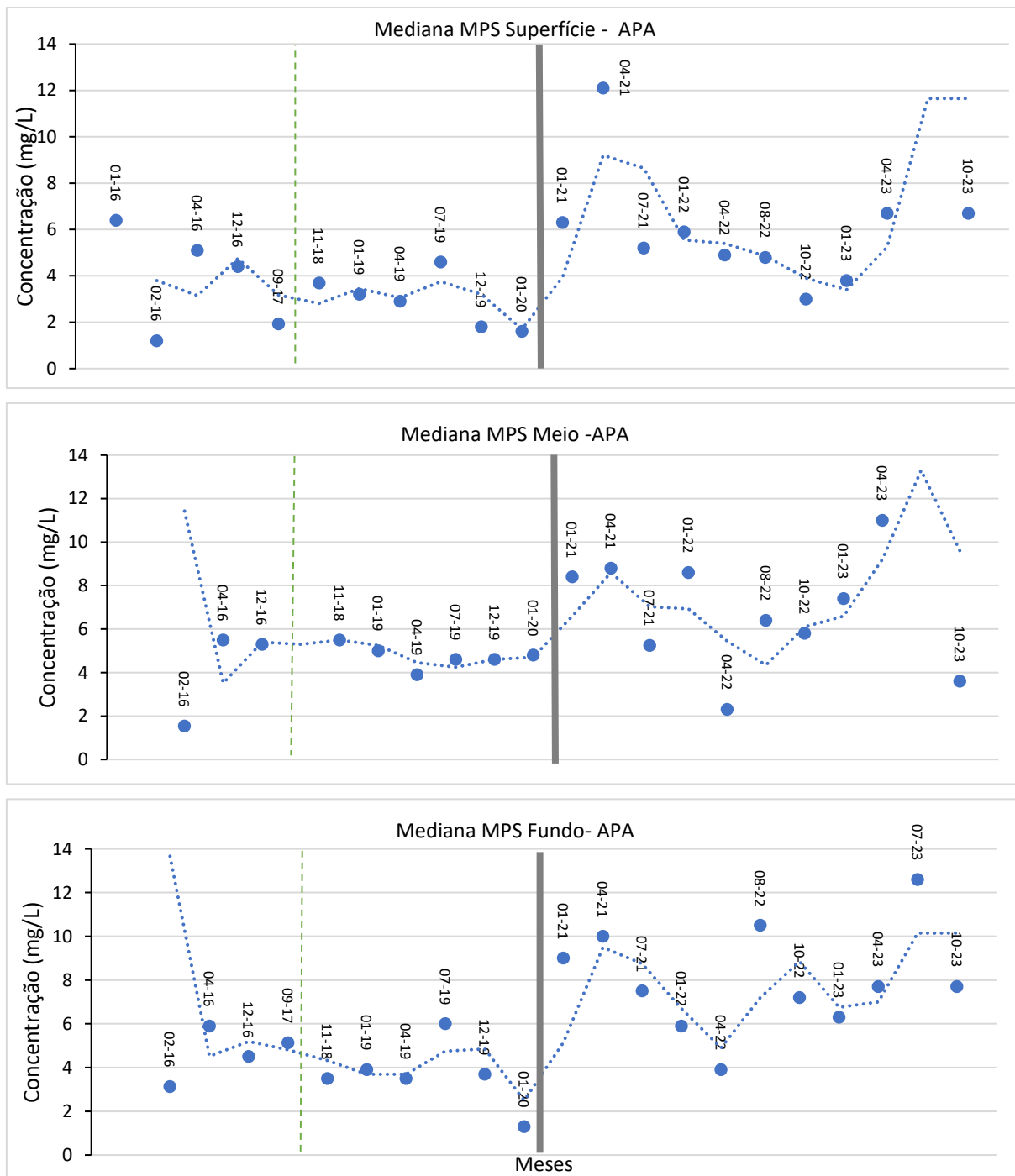
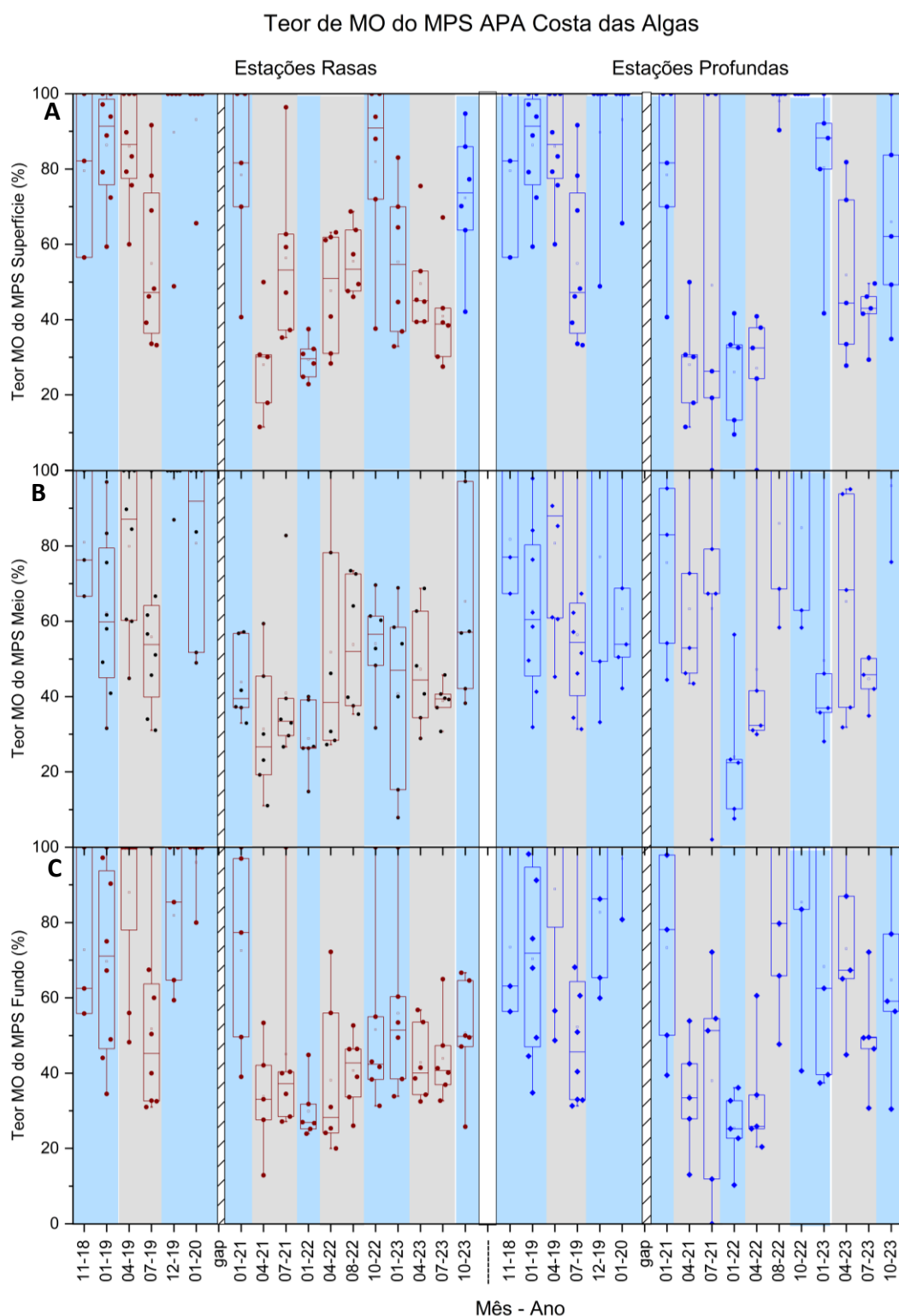




Figura 18: Teor de matéria orgânica (MO) do MPS para amostras de água coletadas, **(A)** superfície, **(B)** meio, **(C)** fundo (a 1 m do fundo) da coluna d'água, para o Setor APA Costa das Algas. As estações rasas estão localizadas mais próximas à costa até 36 m de profundidade e as estações profundas 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.

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 ( $p$ -valor < 0,05) das concentrações de MPS ao longo do período do Monitoramento (Figura 16 e Figura 18). 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). 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 m<sup>3</sup>/s (estação P21 em Linhares (Tema – Integração Fluvio-Estuarina/PMBA)). 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 (Climate Forecast System Reanalysis, 2023). Essa situação favorece à dispersão de MPS para sul. Comparativamente, as menores concentrações foram observadas em janeiro de 2020 (Ano 2), quando a vazão do Rio Doce apresentava baixos valores (entre 400 e 700 m<sup>3</sup>/s) nos dias que antecederam a coleta. Para o período chuvoso do Ano 5, assim como no setor Foz Sul, as concentrações de MPS foram menores quando comparado ao período chuvoso do ano anterior. Porém, também ocorreu um aumento das concentrações de MPS no período seco em relação ao período chuvoso do Ano 5 e quando comparado ao período seco do Ano 4.

### 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.

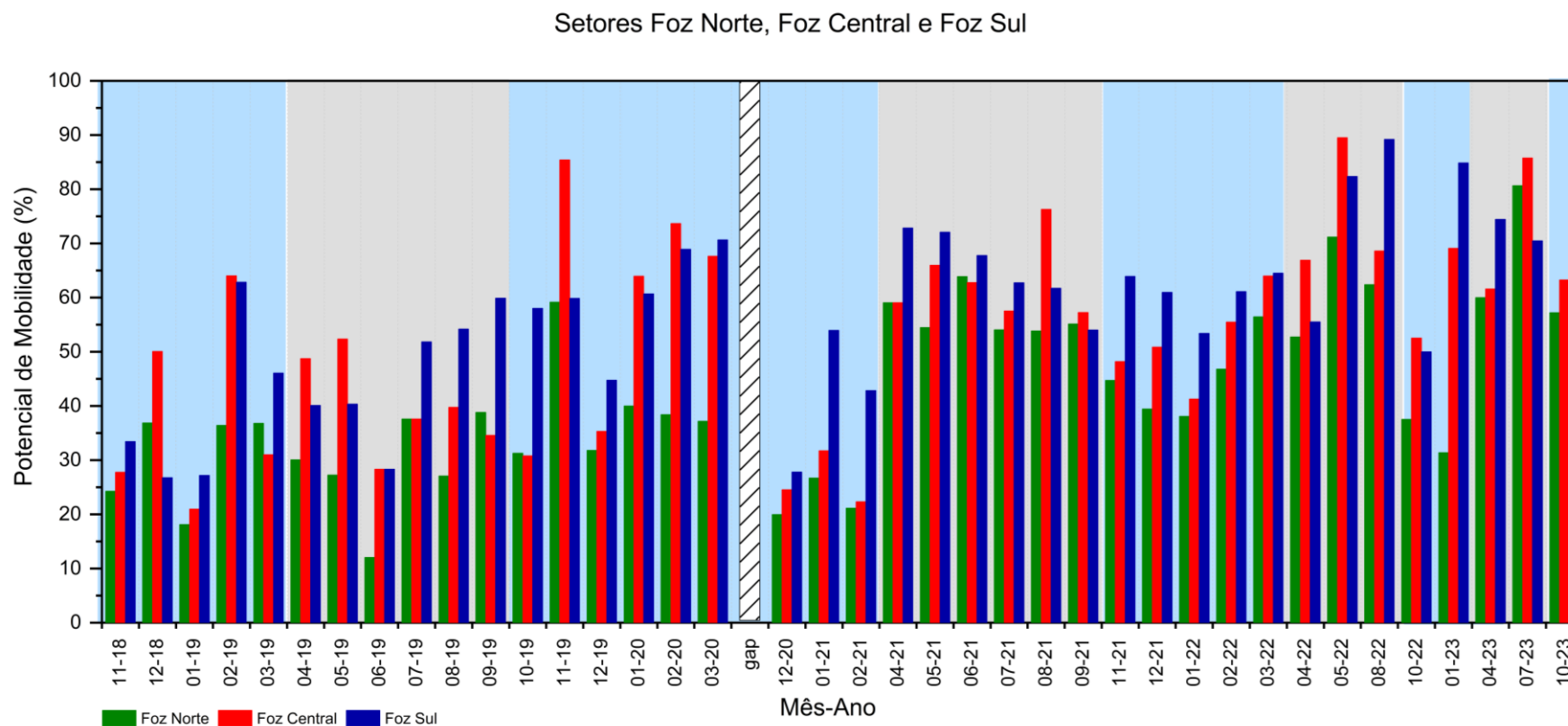


Figura 20: Percentual de Mobilidade do sedimento superficial (base) ao longo do PMBA/Fest, para o setor Norte. Áreas em azul indicam o período chuvoso e em cinza, o período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia.

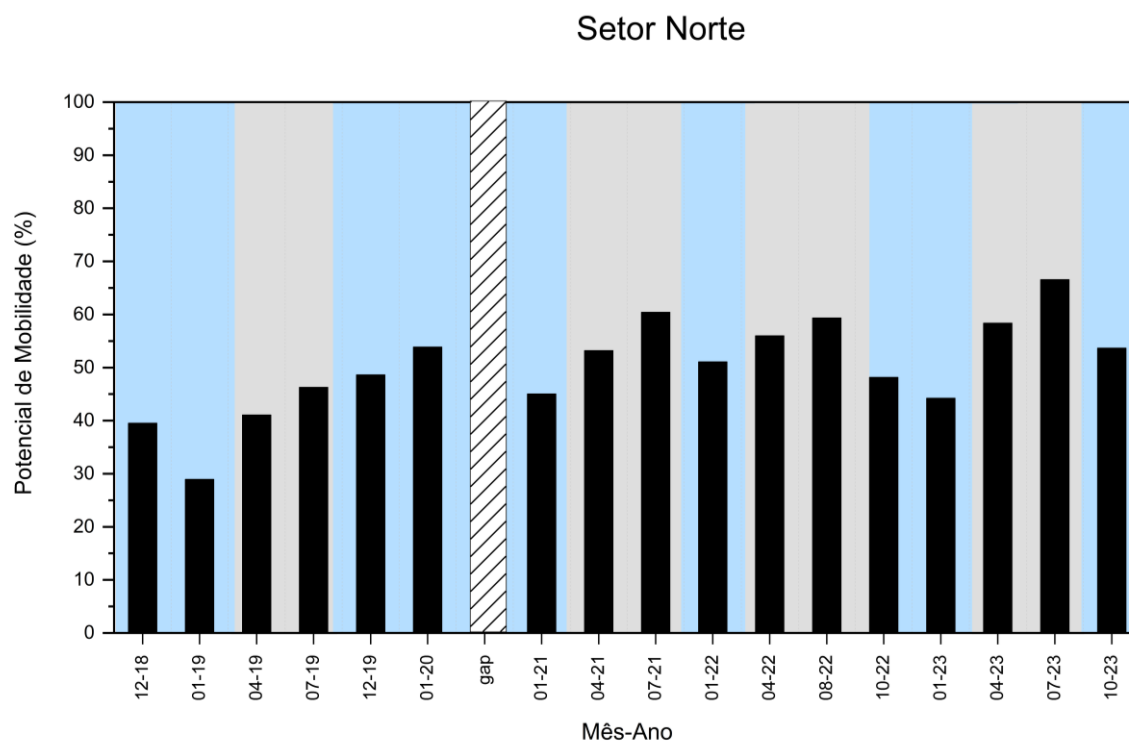
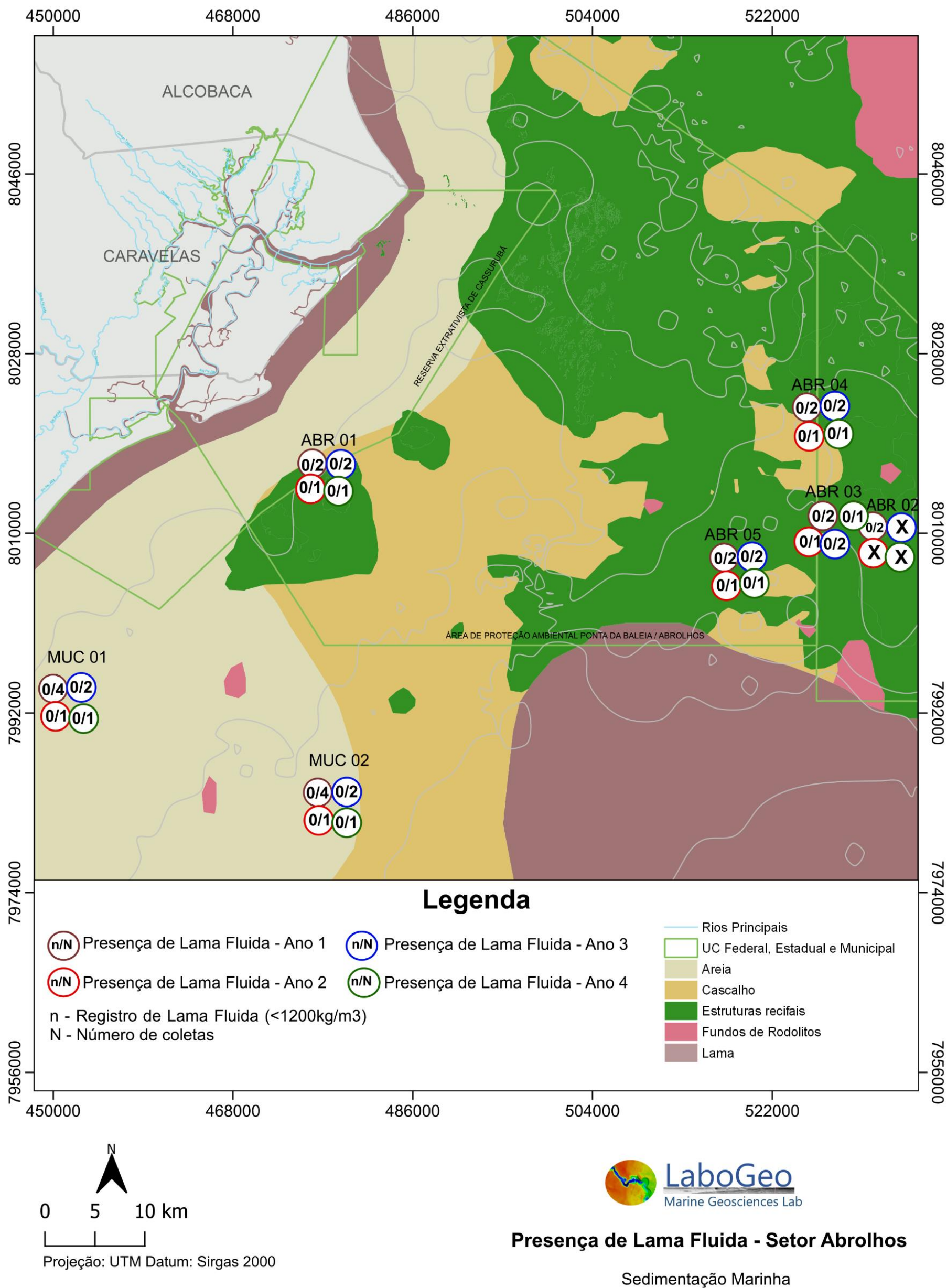


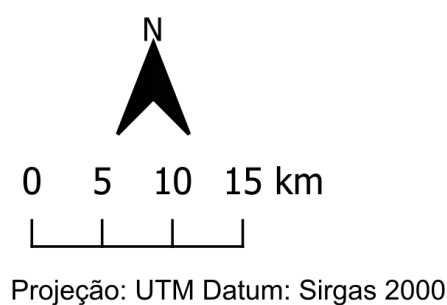
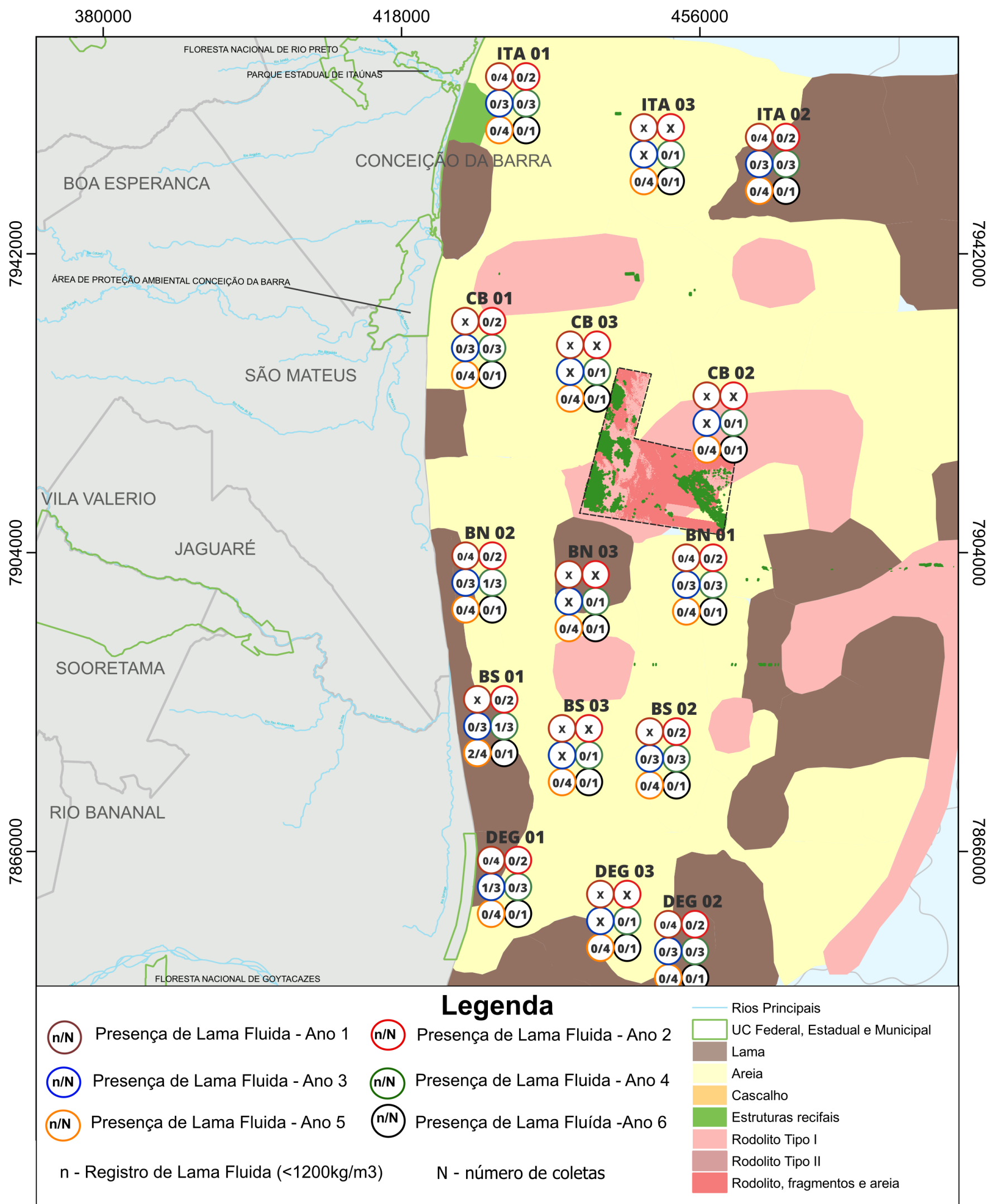
Figura 21: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do ANO 4 (janeiro/2021). Não ocorreram coletas para esse setor devido uma alteração da malha amostral, na qual não abrange mais esse setor. A informação de tipos de fundo foi produzida através de dados compilados do Labogeo/UFES.



Anita Ruschi - 27/02/2023



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



### Presença de Lama Fluida - Setor Norte

Sedimentação Marinha

Figura 23: Indicativo da presença de lama fluida para o Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" indicam que a estação não fazia parte da malha amostral no referente ano. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA-Fest e os demais dados foram compilados do Labgeo/UFES.

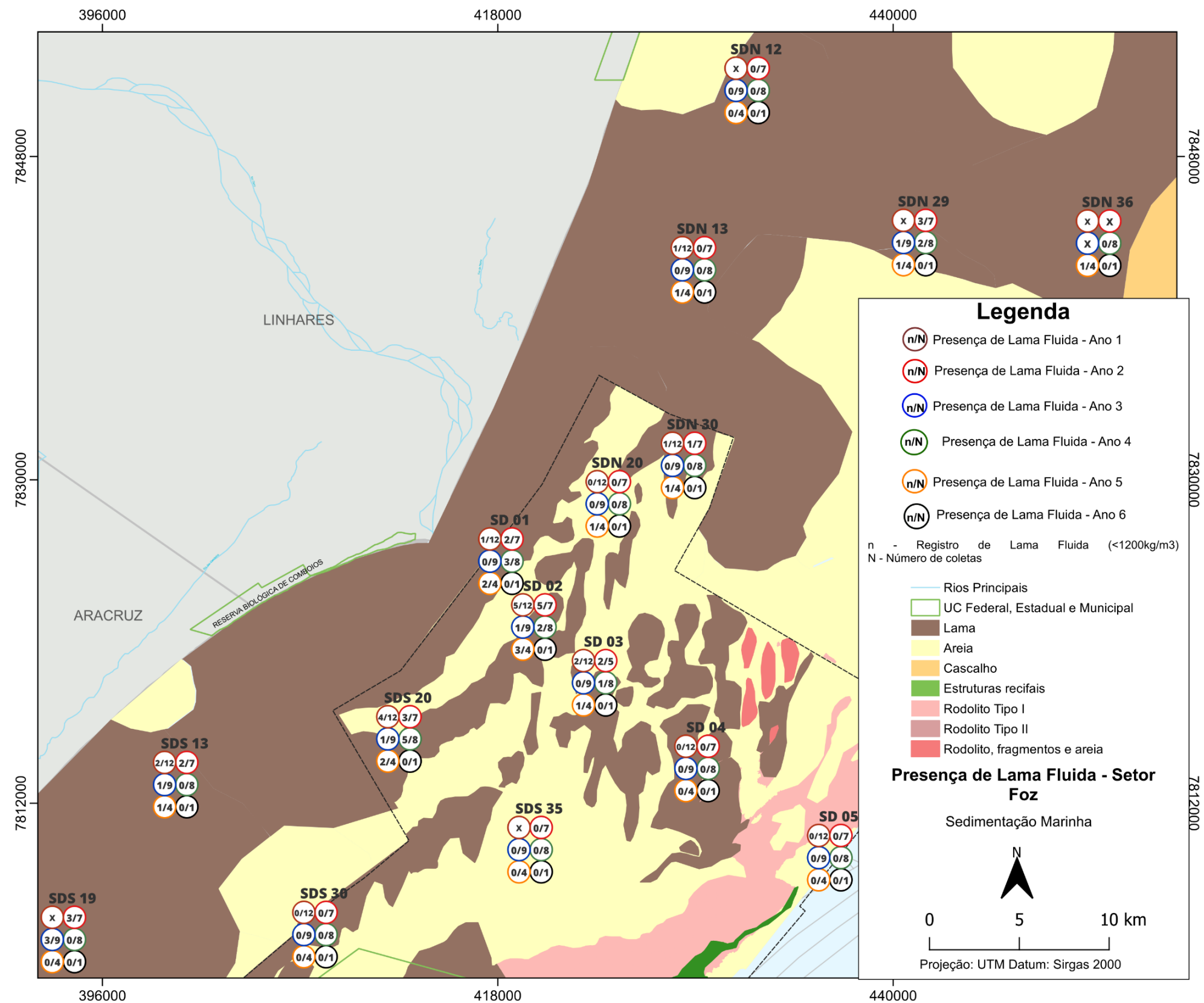
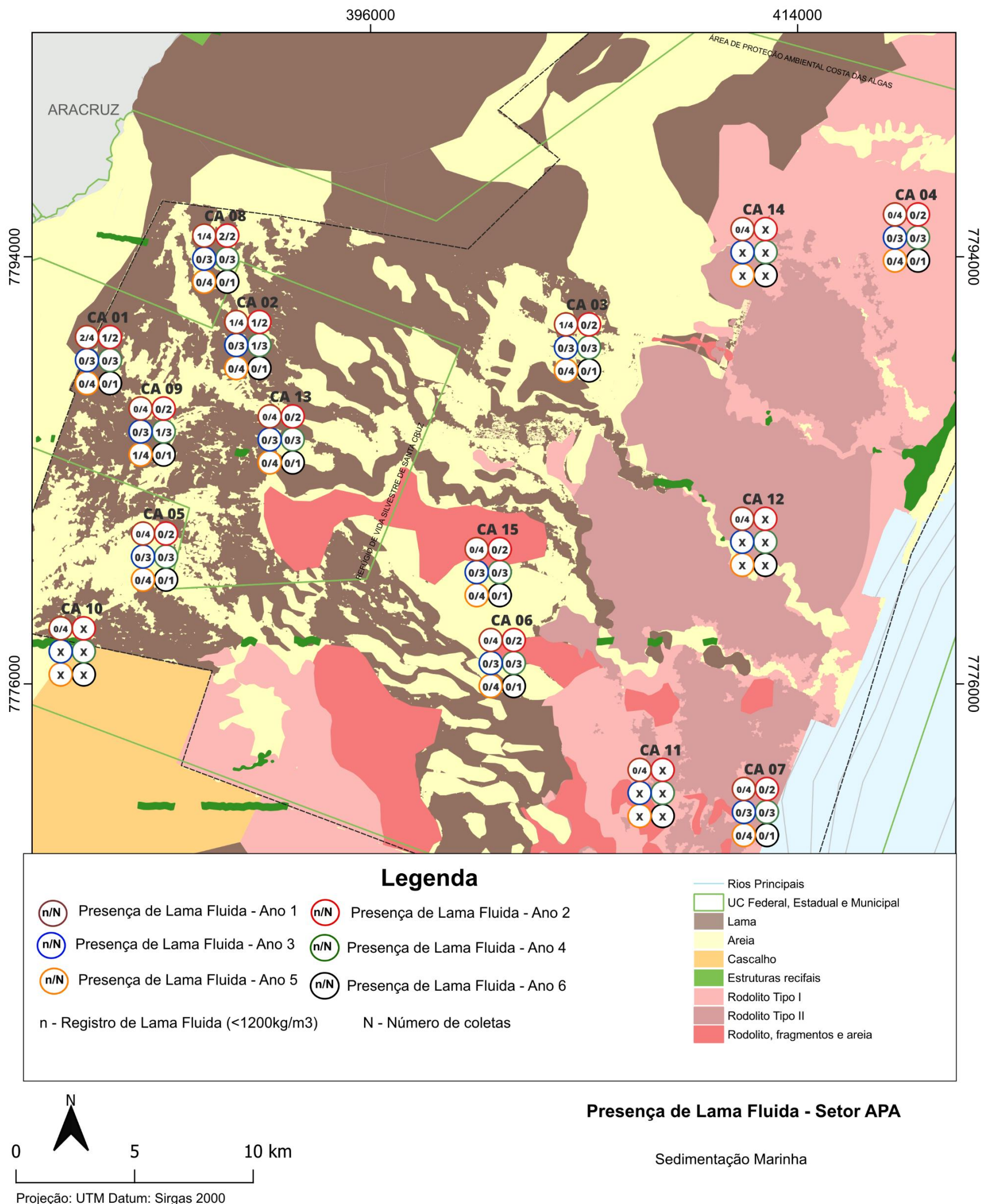




Figura 24: Indicativo da presença de lama fluida para o Setor APA Costa das Algas para os Anos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção das estações do monitoramento. Os mosaicos com detalhamento de tipos de fundo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



A densidade do sedimento superficial tem sido utilizada na identificação de fundos com lama fluida (Figura 21 a Figura 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 (Figura 21 a Figura 24). 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. No Ano 4 e Ano 5 a ocorrência de fundos de lama fluida foram maiores que o Ano 3, porém a ocorrência continuou menor que os primeiros anos do monitoramento.

Além da identificação de fundos com lama fluida, a densidade é utilizada no cálculo do potencial de mobilidade do sedimento superficial. O indicador de mobilidade de fundo é calculado para o mês de cada campanha para os setores Norte, Foz Norte, Foz Central e Foz Sul, em função da disponibilidade de dados hidrodinâmicos e densidade (só medida para fundos lamosos). Dessa forma, foi observado aumento no potencial de mobilização do sedimento para esses setores associados à redução da densidade superficial do sedimento de fundo durante o período do monitoramento. 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. Além disso, ocorre uma variação sazonal deste indicador com aumento da mobilidade no período seco. Apesar da diferença observada entre os períodos seco e chuvoso nos valores do potencial de mobilidade, apenas as estações da Foz Norte apresentaram diferença significativa ( $p\text{-valor} < 0,05$ ) entre esses dois períodos.

Nos setores da foz do Rio Doce, os maiores potenciais de mobilidade ocorreram no período seco do Ano 04. Para o período chuvoso, os potenciais de mobilidade do Ano 5 superaram os do Ano 4. 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 maior 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). Para o Setor Norte também foi observado aumento no percentual de mobilidade do sedimento de fundo no período seco do Ano 05, enquanto para o período chuvoso ocorreu uma diminuição do potencial de mobilidade quando comparado ao período chuvoso do Ano 4, seguido por um aumento da mobilidade no período chuvoso do Ano 6 (Figuras 19 e 20).



### 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 de 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. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ( $1.7 \times 10^{-6}$ ) da susceptibilidade magnética. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do ANO 4 (janeiro/2021). 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, na qual não abrange mais esse setor.

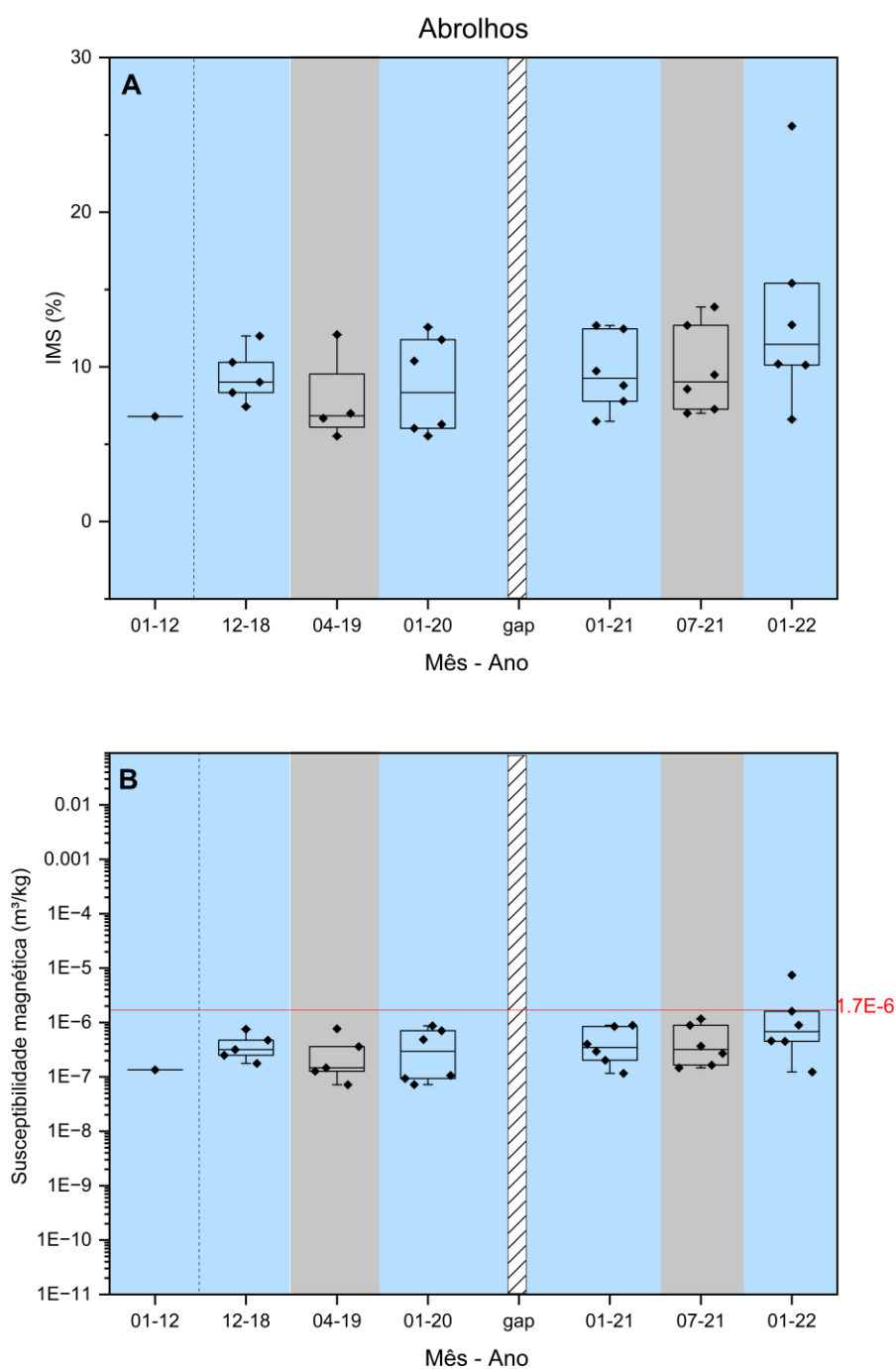
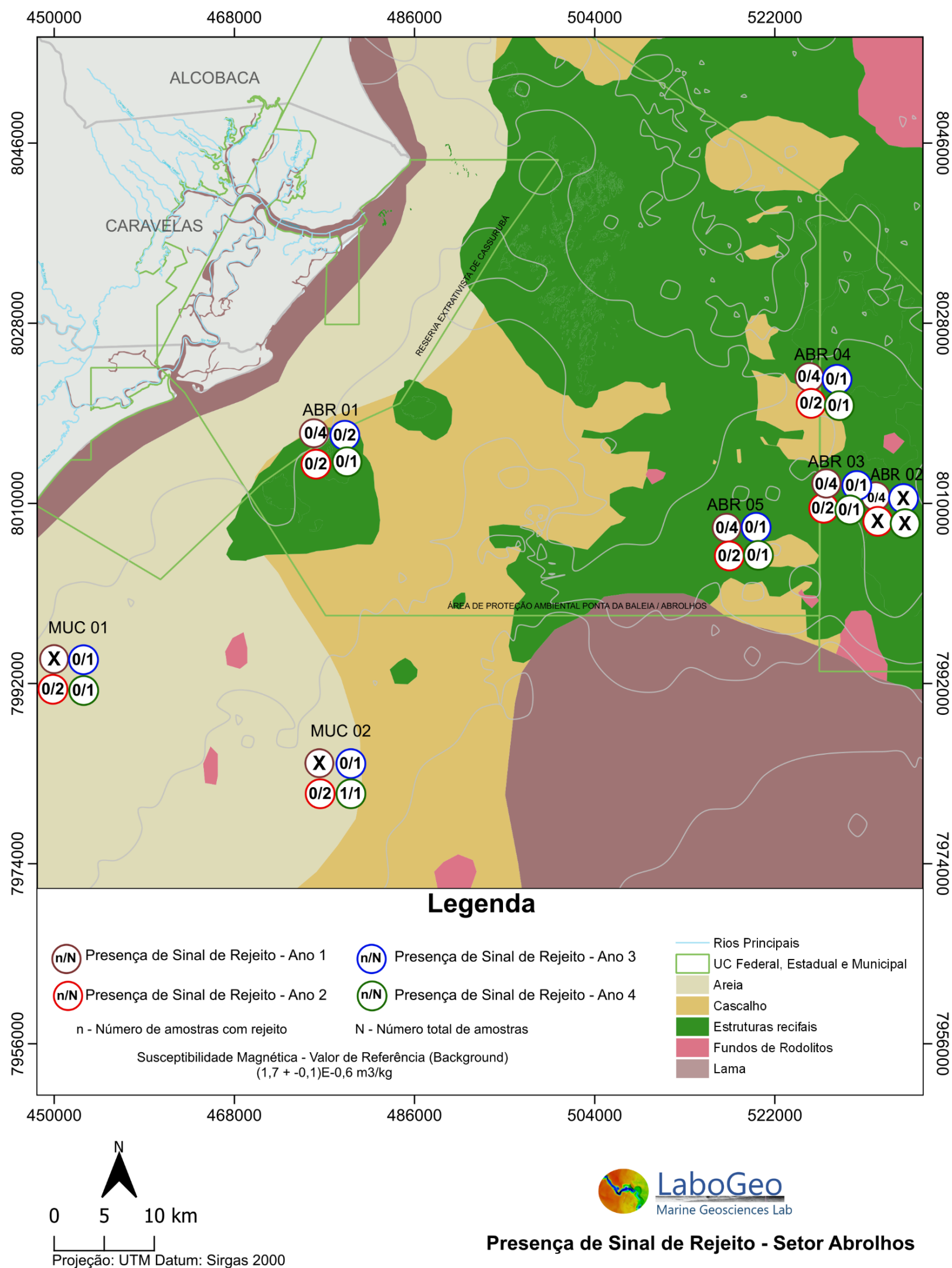


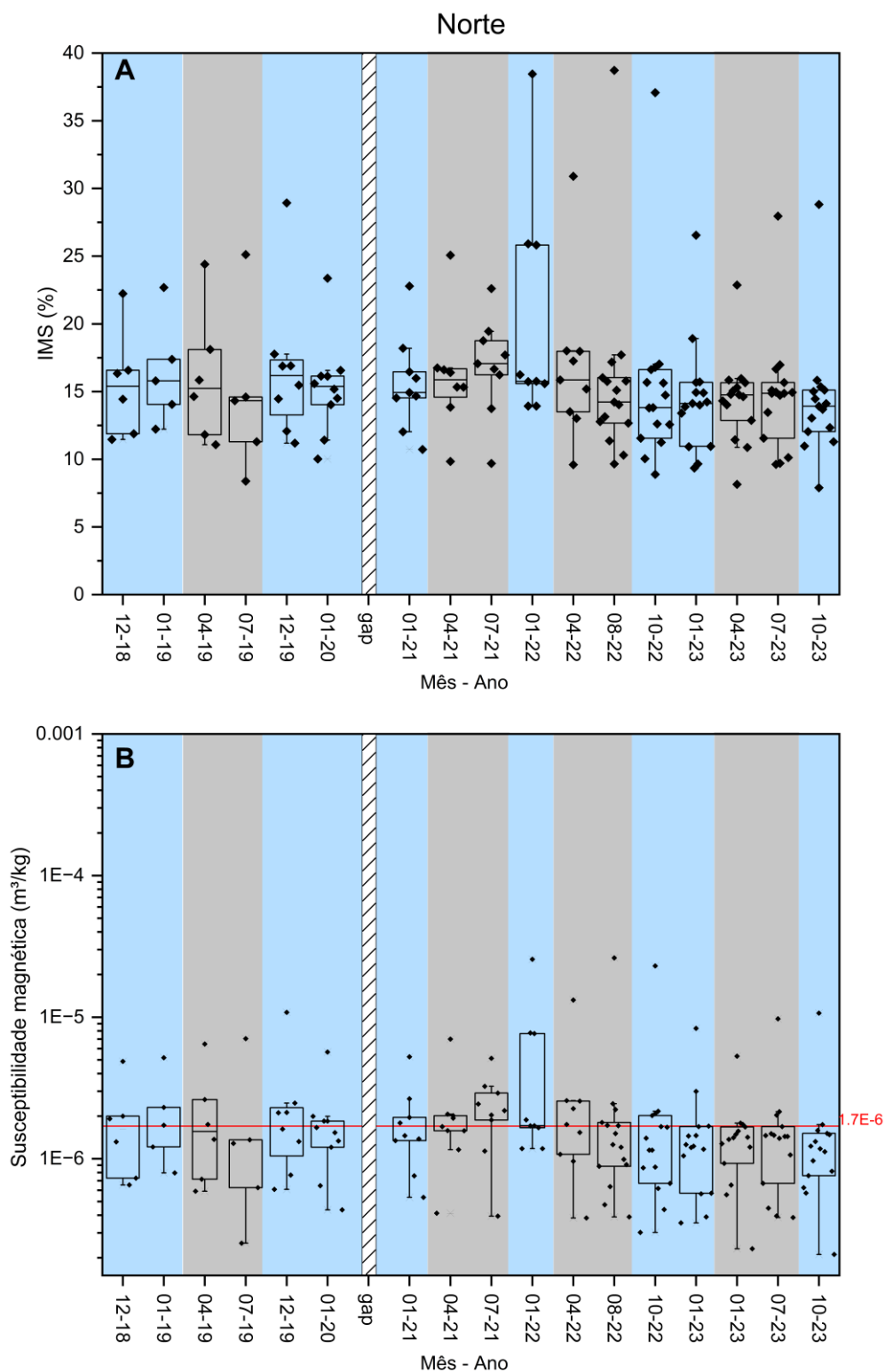
Figura 26: Indicativo da presença de sinal rejeito para o Setor Abrolhos para os Anos 1, 2, 3 e 4 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido remoção da estação do monitoramento. Os últimos dados coletados foram no período chuvoso do ANO 4 (janeiro/2021). Não ocorreram coletas no período seco para esse setor devido uma alteração da malha amostral, na qual não abrange mais esse setor. A informação de tipos de fundo foi produzida através de dados compilados do Labogeo/UFES.



Anita Ruschi e Michele Sardinha - 24/02/2023

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 de rejeito) apenas no período chuvoso do Ano 04, onde a presença do sinal do rejeito foi registrada em uma estação amostral (MUC 02) (Figura 26).

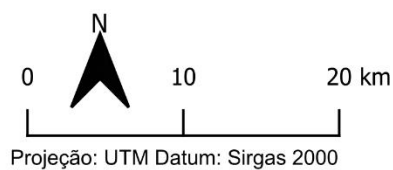
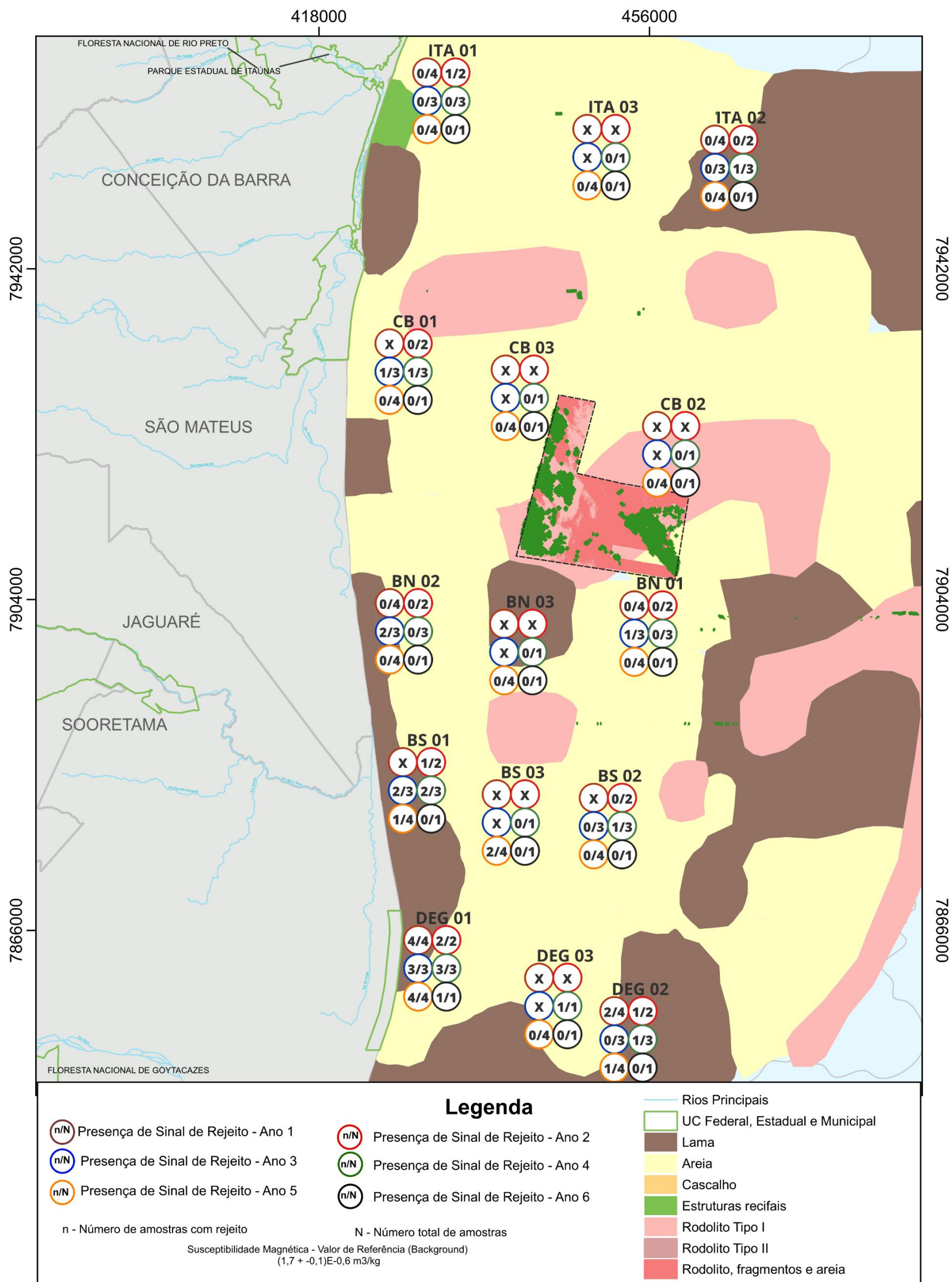
Figura 27: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Norte. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ( $1.7 \times 10^{-6}$ ) da susceptibilidade magnética. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.



O Setor Norte apresenta concentrações de IMS e susceptibilidade magnética pouco acima dos valores de referência (Figura 27). Na comparação entre período seco e chuvoso, não foram observadas variações significativas, apesar de ocorrer um aumento do IMS (%) e da susceptibilidade magnética no período chuvoso do Ano 4 em relação aos anos anteriores. No Ano 5, os valores de IMS foram menores em relação ao mesmo período do Ano 4. Quanto a presença do sinal do rejeito (Figura 28), apesar de ser observada em todas as campanhas, ocorreram com maior frequência nas estações mais ao sul e próximas à costa, como DEG 01, DEG 02 e BS 01. No período chuvoso do Ano 5, a estação BS 03 registrou pela primeira vez a presença do sinal de rejeito nas amostras coletadas. A maior ocorrência da presença de sinal de rejeito nas amostras ocorreu no Ano 03, seguido por uma diminuição da presença do sinal de rejeito a partir do Ano 04.



Figura 28: Indicativo da presença de sinal de rejeito para o Setor Norte para os Anos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 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. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA-Fest e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.



## Presença de Sinal de Rejeito - Setor Norte

Sedimentação Marinha

Figura 29: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de 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 devido à pandemia. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ( $1.7 \times 10^{-6}$ ) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

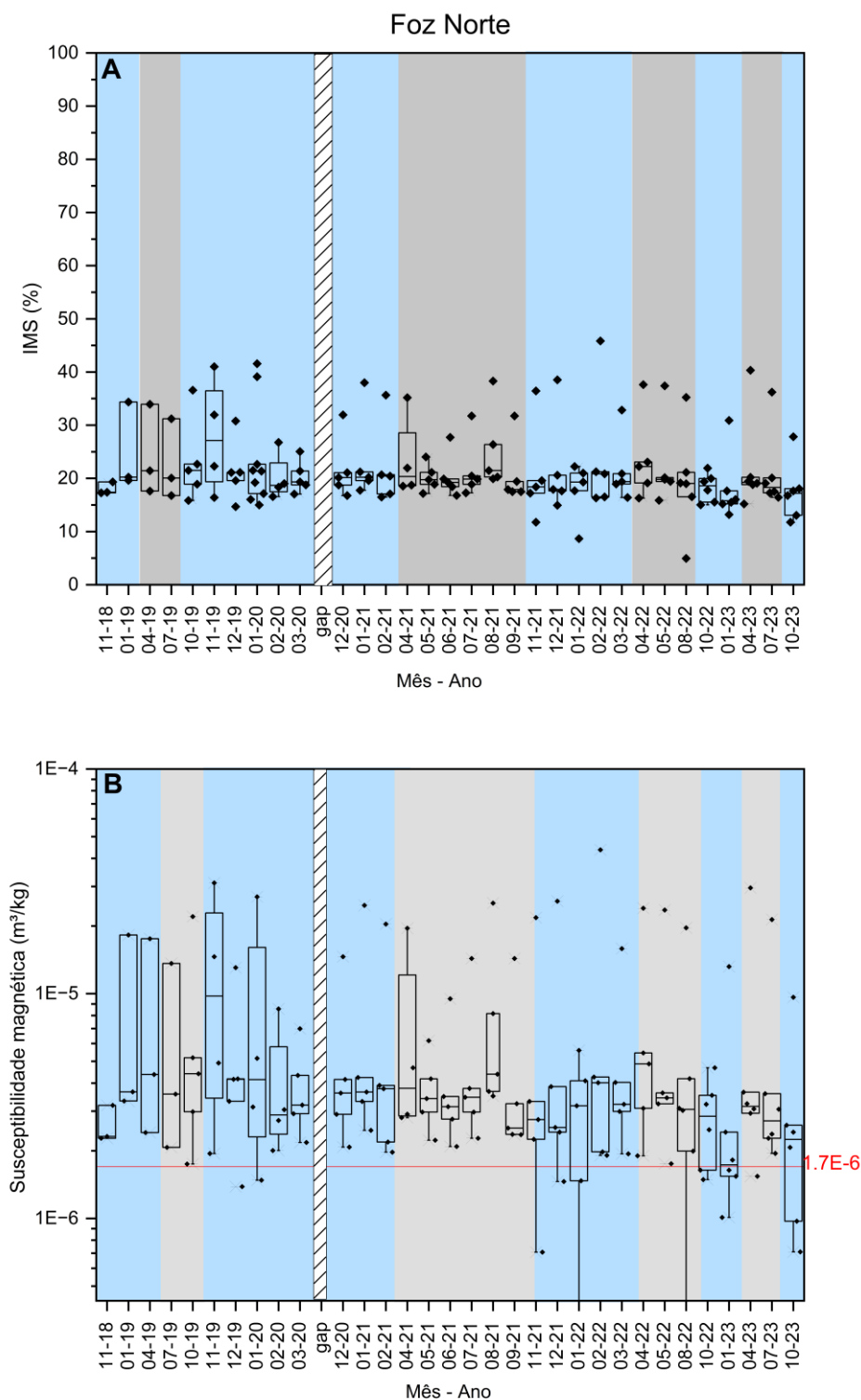


Figura 30: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set* - o marcador de rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Central. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o rompimento da barragem de Fundão. Linha tracejada em preto indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ( $1.7 \times 10^{-6}$ ) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

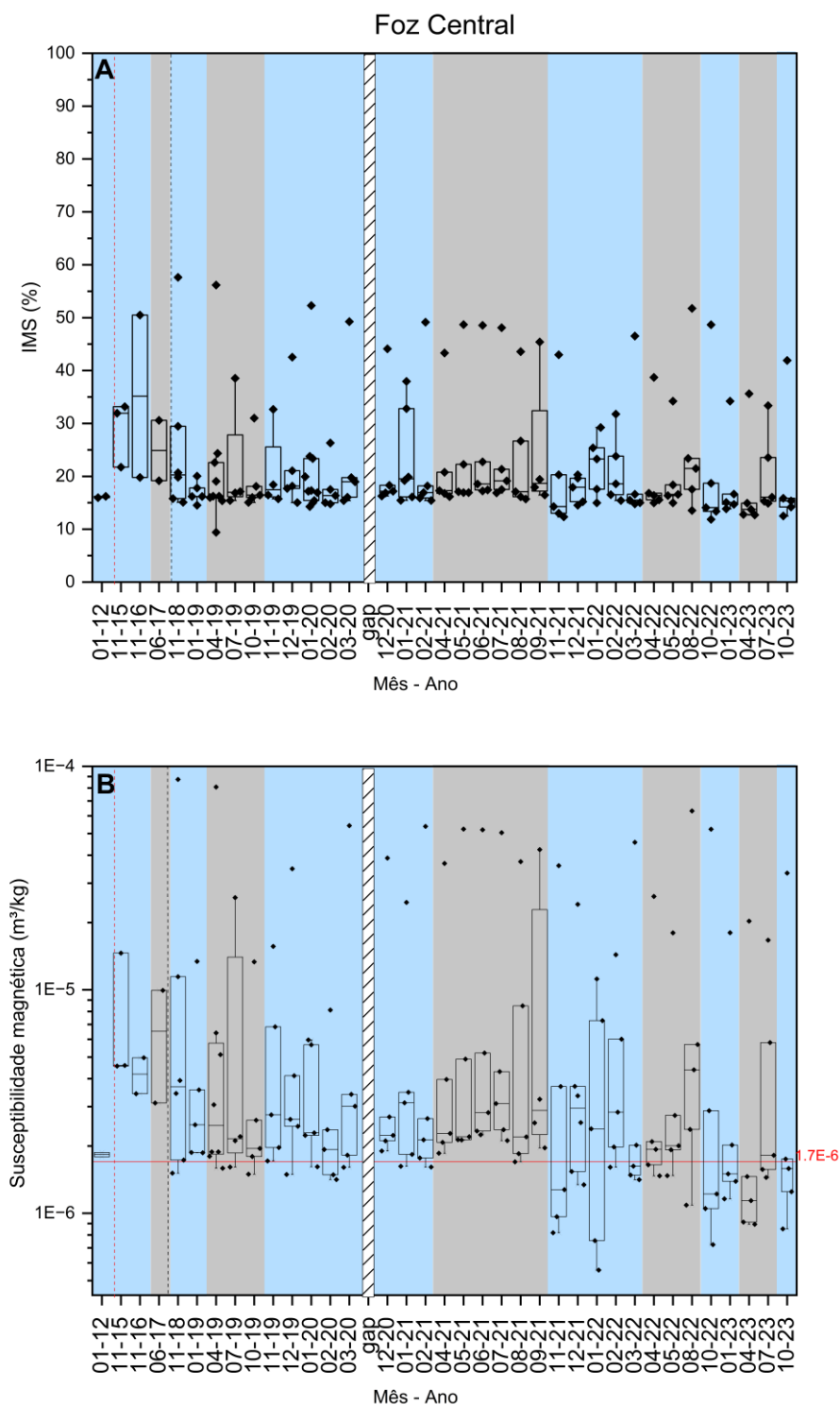


Figura 31: **(A)** Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento); **(B)** Valores de susceptibilidade magnética para o Setor Foz Sul. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Linha tracejada em vermelho indica o início do PMBA/Fest. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ( $1.7 \times 10^{-6}$ ) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.

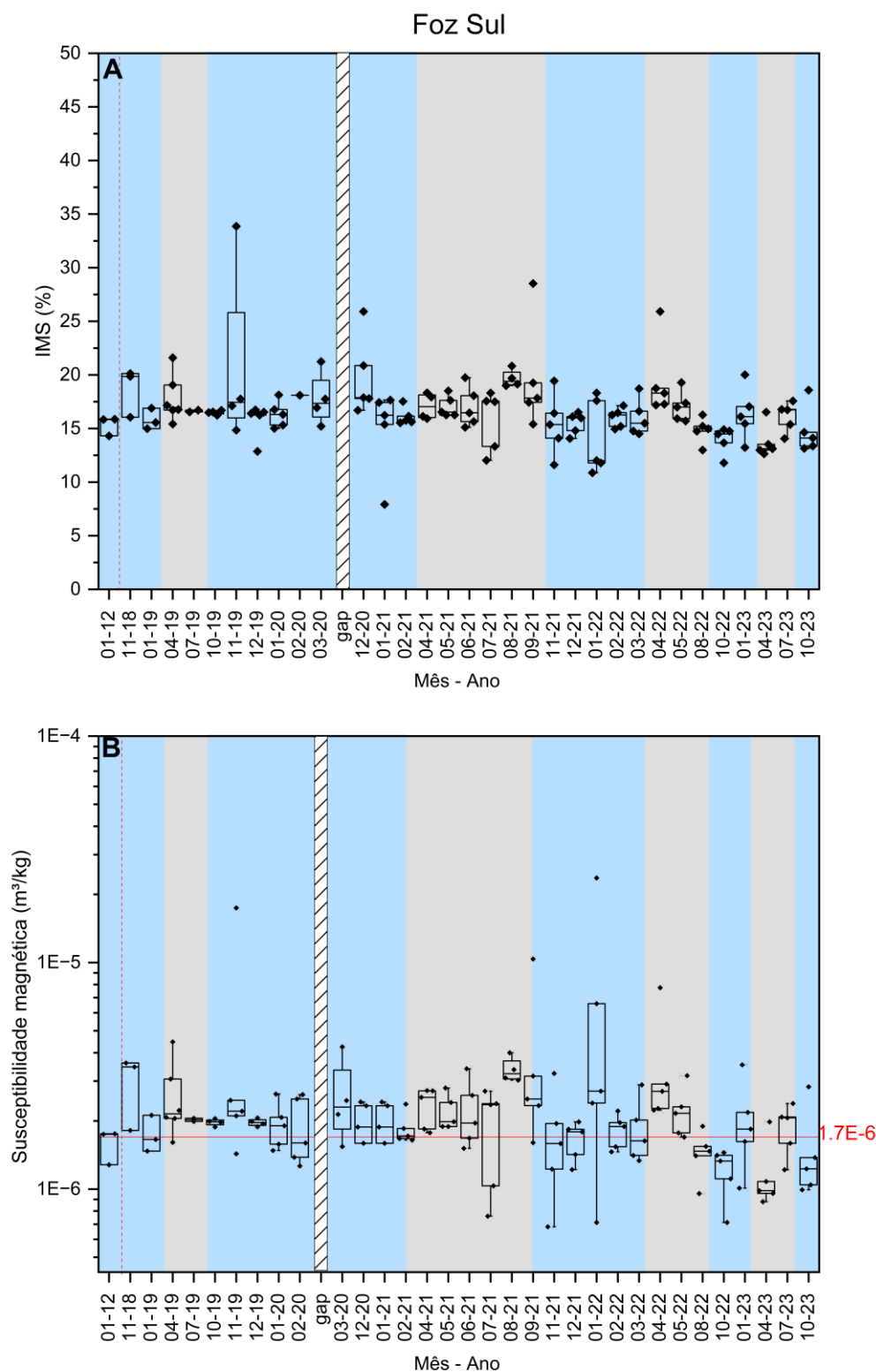
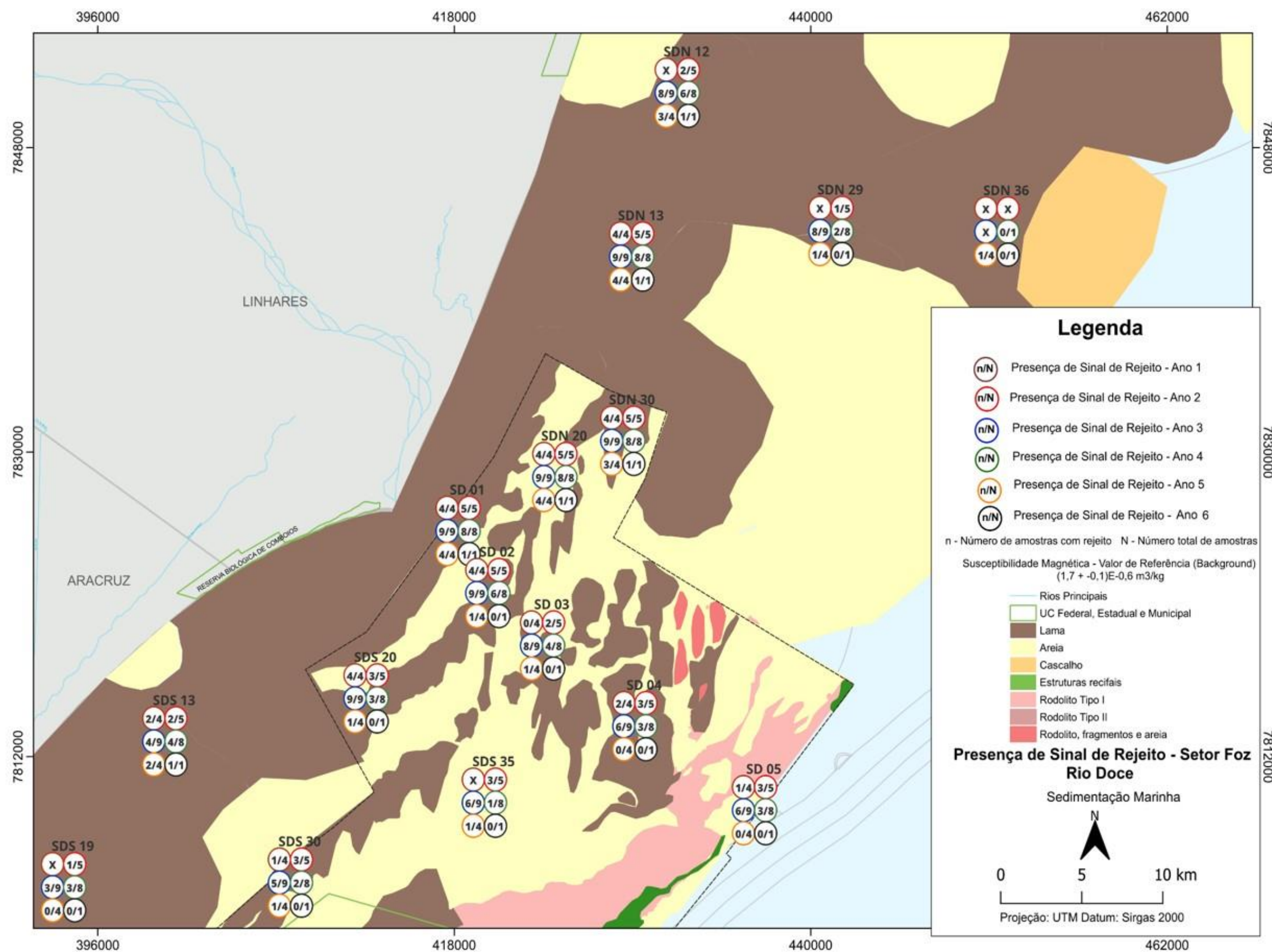




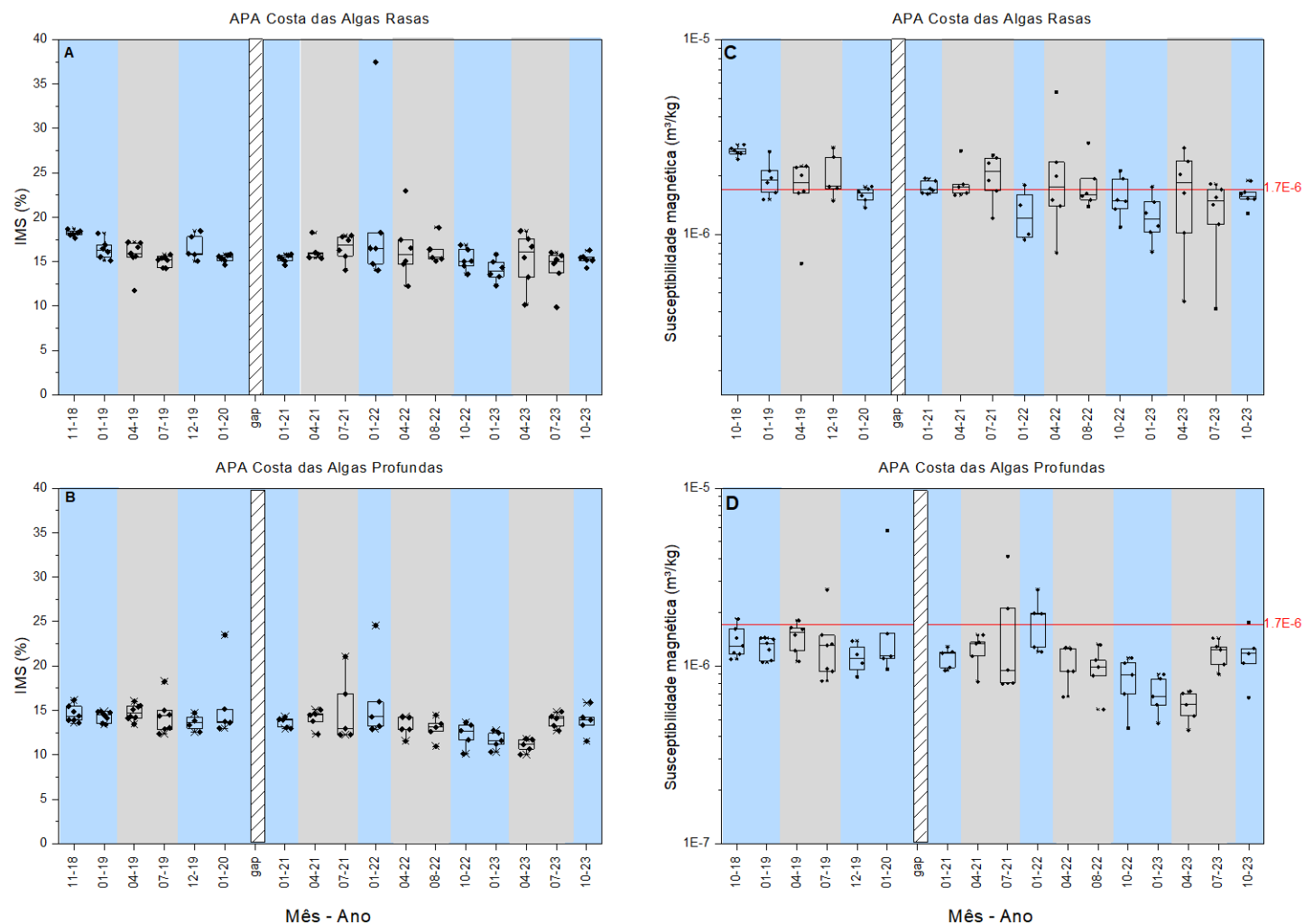
Figura 32: Indicativo da presença de sinal de rejeito para os Setores da Foz para os Anos 1, 2, 3, 4, 5 e 6 do PMBA/Fest. As campanhas assinaladas com um "X" são decorrentes da não realização de amostragem devido inserção das estações após o Ano 1 de monitoramento. O mosaico com detalhamento de tipos de fundo foi produzido pelo tema Sedimentação Marinha do PMBA-Fest e os demais dados foram compilados do Labogeo/UFES.



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. Esse padrão de transporte (Quaresma et al., 2015) explica os maiores valores do sinal de rejeito no setor Norte da foz do Rio Doce, quando comparado ao Setor Foz Sul.

Dentro dos setores da Foz do Rio Doce (Figura 29 a Figura 31), os maiores valores de IMS (%) e susceptibilidade magnética foram observados no setor Foz Central (Figura 30). Observa-se que na Foz do Rio Doce, o IMS (%) e susceptibilidade magnética apresentaram redução de seus valores, quando comparado aos valores dos primeiros anos de monitoramento, porém se mantém acima dos valores de referência. Além disso, os pontos mais rasos próximos a foz do Rio Doce continuam apresentando sinal de rejeito consideravelmente altos, como por exemplo o ponto SD01. Baseado nisso, acredita-se que o aporte de rejeito na foz tem sido constante. Esse patamar dinâmico também é possível de ser identificado nas estações do Setor Foz Norte (Figura 29). A presença do sinal de rejeito (Figura 32), é observada em todas as estações da foz do Rio Doce, tendo maior frequência nos pontos rasos (até 20m). A estação SD 05, que está na porção mais profunda adjacente à foz do Rio Doce (50m), apresentou o indicativo da presença do sinal do rejeito pela primeira vez no Ano 3 (julho de 2021). O maior número de ocorrências da presença do sinal de 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.

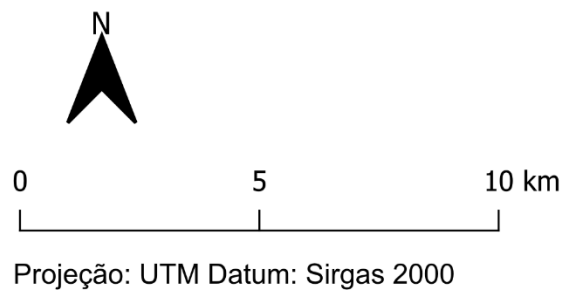
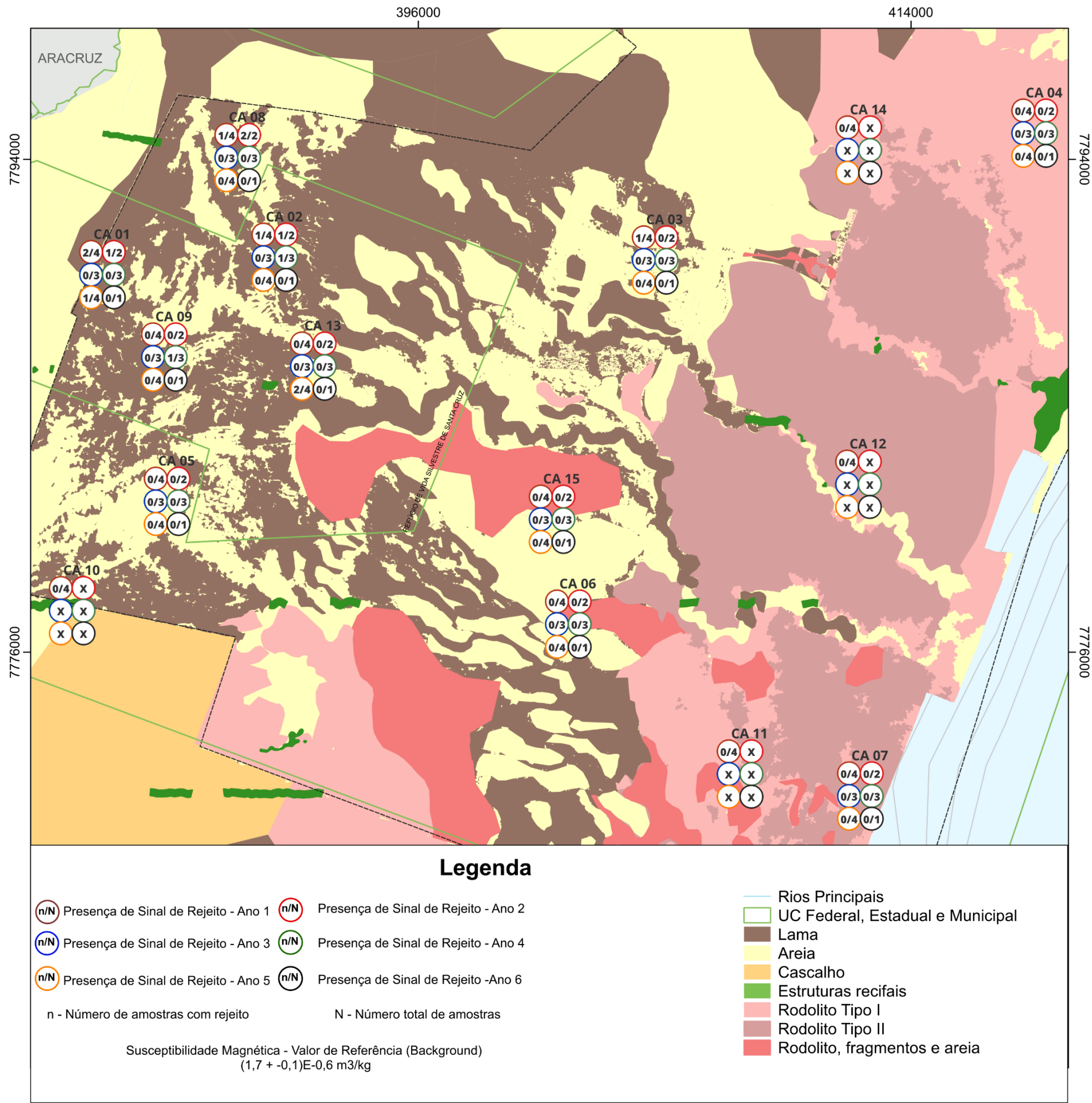
Figura 33: Valores de IMS (*Iron Mineralogical Set*- o marcador de rejeito no sedimento) para o Setor APA Costa das Algas **(A)** Rasas e **(B)** Profundas; Valores de susceptibilidade magnética para o Setor APA Costa das Algas **(C)** Rasas e **(D)** Profundas. Áreas em azul indicam período chuvoso. Áreas em cinza indicam período seco. Retângulo hachurado indica gap de dados devido à pandemia. Linha horizontal vermelha indica o valor de referência ( $1.7 \times 10^{-6}$ ) da susceptibilidade magnética. Os losangos pretos são as medições feitas nas estações amostrais do setor.



Os valores de IMS e susceptibilidade magnética para o Setor APA Costa das Algas (Figura 33) ficaram, em sua grande maioria, próximos ao valor de referência. Além disso, esses valores permaneceram no mesmo patamar ao longo do período de monitoramento. Os maiores valores de IMS (%) e susceptibilidade magnética observados foram para o período chuvoso e seco do Ano 04. Em relação a presença do sinal de rejeito (Figura 34), especialmente a maior ocorrência nesse setor ao longo dos 5 anos de monitoramento foi para as estações APA rasa até 36m (CA 01, CA 02, CA05, CA08, CA09, CA10 e CA13). Assim como os outros setores, o maior número de ocorrências da presença do sinal de rejeito foi no Ano 3.



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

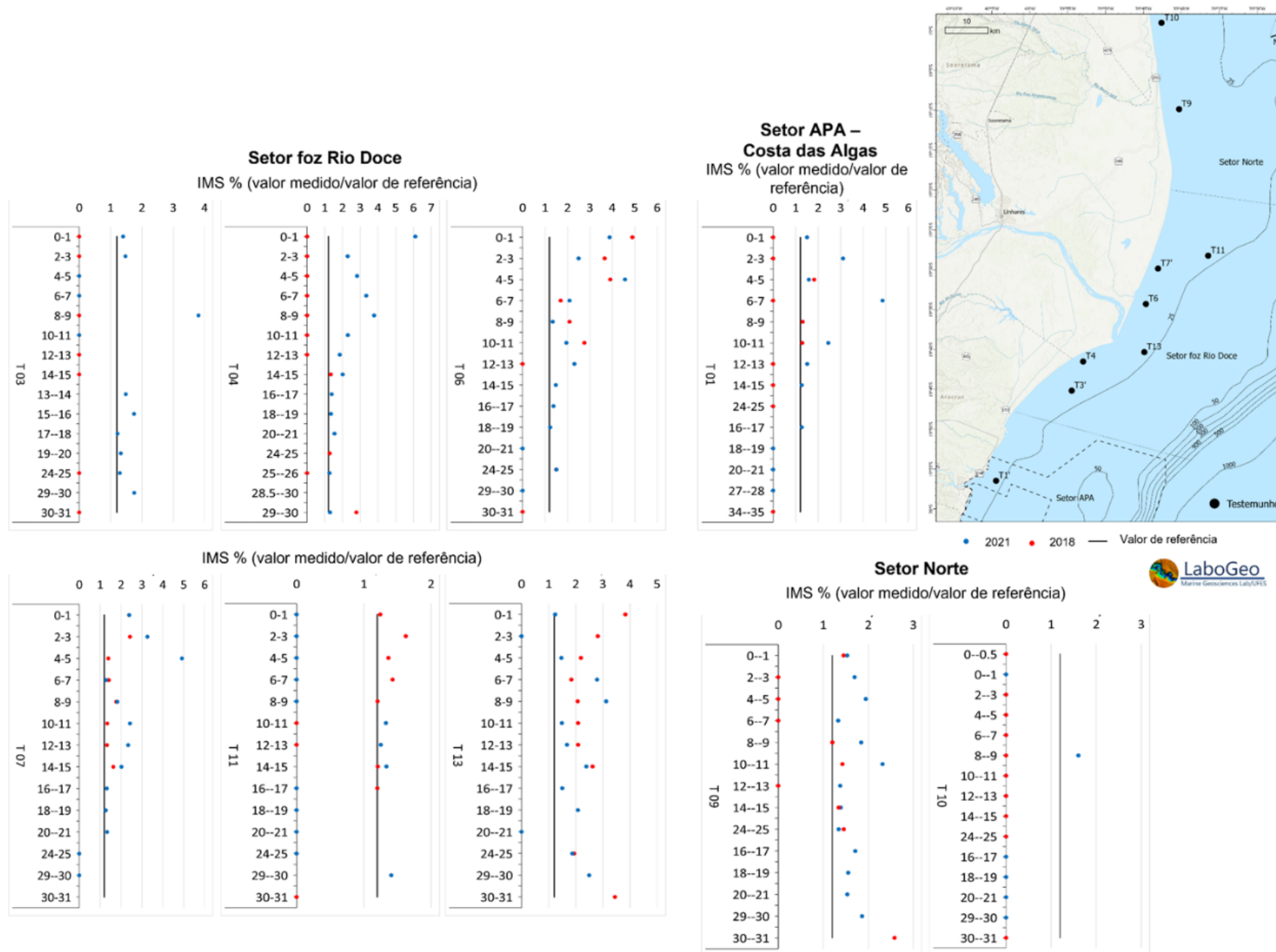


**Presença de Sinal de Rejeito - Setor APA**

Sedimentação Marinha

### 3.4 ACUMULAÇÃO DE REJEITO NO FUNDO MARINHO

Figura 35: Valores de IMS (%) para determinação do acúmulo de rejeito no depósito sedimentar: evolução do acúmulo de rejeito entre 2018 e 2021. 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



Os testemunhos foram coletados nos anos de 2018 e 2021, sendo que o resultado final foi apresentado no RRDM, 2022. O texto abaixo e a figura acima estão sendo repetidos, já que não houve previsão de nova coleta de testemunhos depois de 2021.

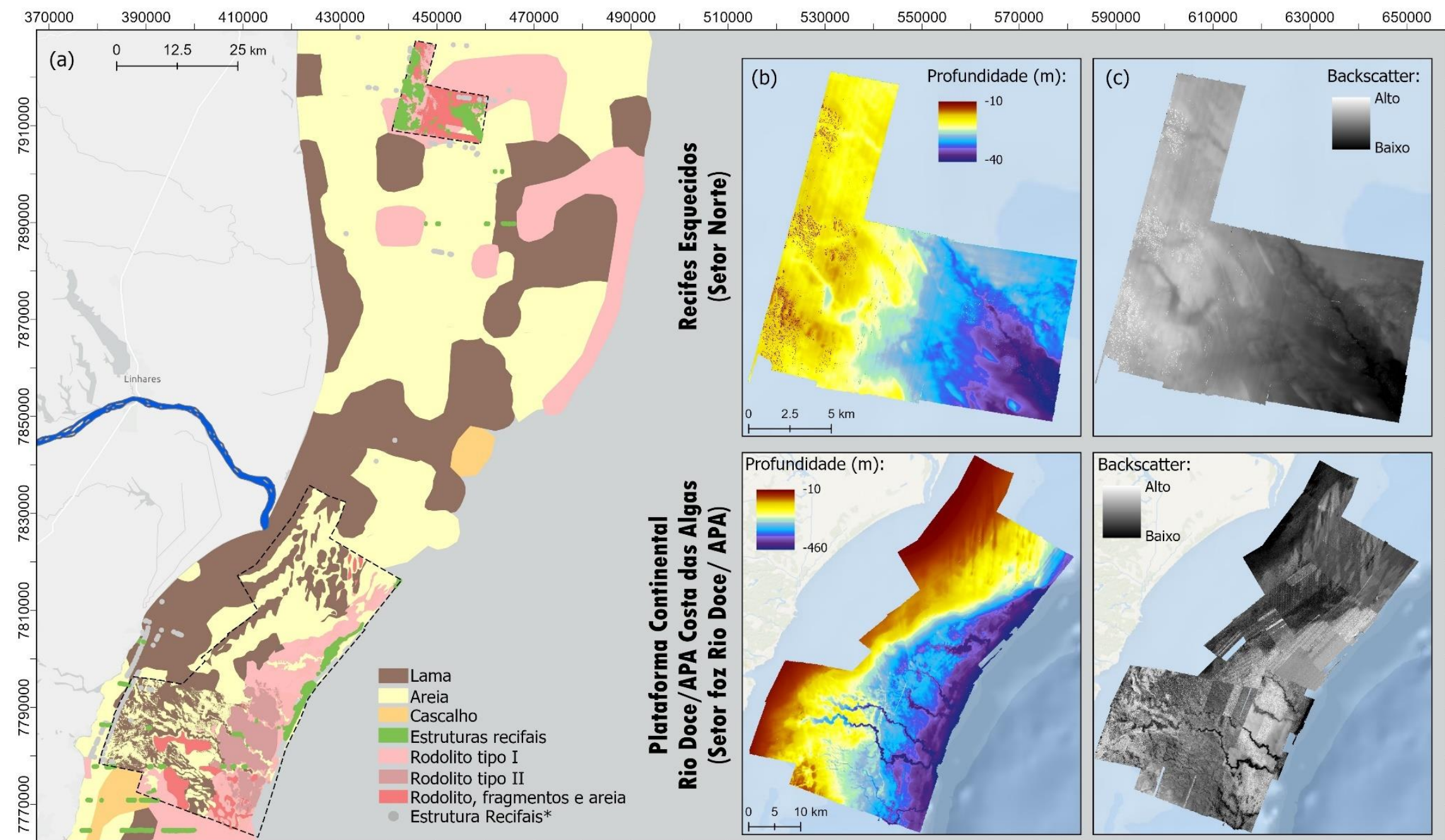
Após o intervalo entre o ano 1 (2018) e o ano 3 (2021), os índices de IMS(%) continuam evidenciando a presença de sinal de rejeito até 30 cm abaixo da superfície do leito marinho, em pelo menos um estrato em todos os testemunhos ao longo da plataforma (Figura 35). Nesse contexto, o material proveniente do Rio Doce inicialmente se deposita nos setores foz sul e central, sendo posteriormente deslocado para a direção preferencial de transporte da região, que é para norte/nordeste, conforme indicado por Quaresma et al. (2015), Vieira et al. (2019) e Oliveira et al. (2021). Os dados dos testemunhos sustentam essas observações, uma vez que foi constatado um aumento nos valores de IMS (%) nos testemunhos T3 e T4, localizados no setor foz sul, em comparação com o ano 1. O mesmo padrão é observado nos testemunhos T06, T07 (setor foz) e T09 (setor norte), indicando uma tendência de transporte para a direção norte.

O T1, localizado no setor APA Costa das Algas, revela uma presença do sinal de rejeito superior à última coleta (2018), sugerindo possivelmente uma continuidade no acúmulo de rejeito na região. É relevante ressaltar que o T13, que anteriormente, com base nos resultados de 2018, indicava um potencial transporte de rejeito para áreas mais afastadas na foz do Rio Doce, apresentou em 2021 uma diminuição nos valores de IMS (%) em direção ao topo do testemunho, indicando um potencial menor acúmulo de rejeito.



### 3.5 EXTENSÃO E INTEGRIDADE DE HABITAT MARINHO

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 5 anos de monitoramento, na APA Costa das Algas, foz do Rio Doce e Recifes Esquecidos. \* Essas estruturas recifais foram mapeadas a partir de perfis sísmicos e não por ecobatimetria ou sonografia.



Projeção: UTM  
Datum: SIRGAS 2000



**Habitat Físico (a)**  
**Batimétrico (b)**  
**Backscatter (c)**

Sedimentação Marinha

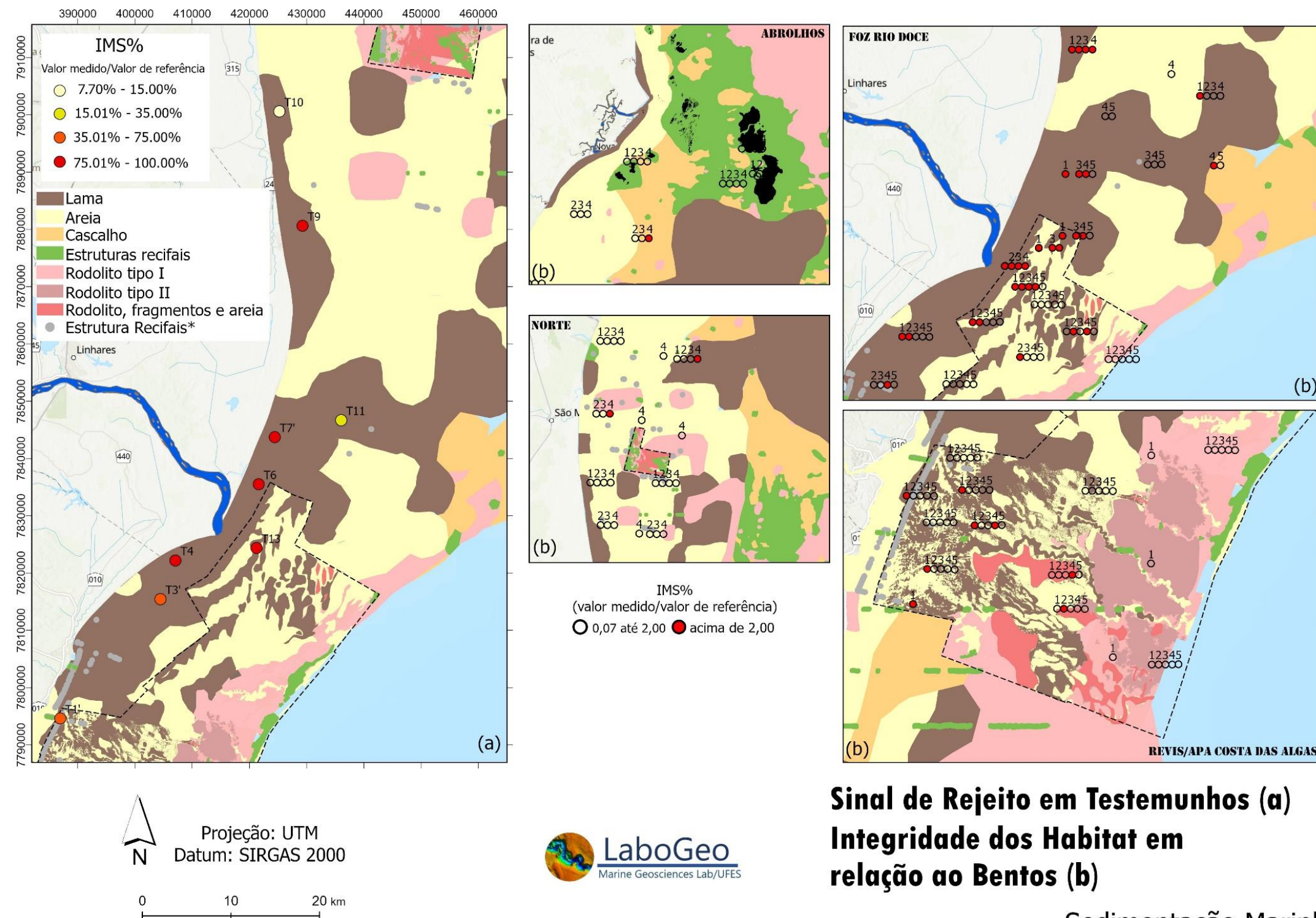
Ao longo dos 5 anos de aquisição de dados geofísicos na plataforma do Espírito Santo, as 3 grandes regiões mapeadas (APA Costa das Algas, Foz Rio Doce e Recifes Esquecidos) (Figura 36) revelaram em detalhe uma plataforma heterogênea tanto morfologicamente como considerando o tipo de fundo. Essa heterogeneidade 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 faciológicas ao longo 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). Hoje temos uma continuidade no mapeamento em alta resolução entre os setores APA e Rio Doce, com exceção da parte rasa (<20m). Essa continuidade nos permite inferir melhor os processos e entender como a plataforma responde aos diferentes estímulos dinâmicos e sedimentológicos, e consequentemente como o rejeito teria afetado os habitats bentônicos.

Na região mais ao sul da plataforma, no Setor REVIS/APA Costa das Algas, o detalhamento revelou em sua porção mais profunda um habitat mesofótico de vales incisos com profundidades equivalentes a quebra de plataforma, e regiões mais planas entre vales. O mapeamento evidencia que estes vales formam habitats mesofóticos que se estendem até as regiões mais rasas, servindo como feições facilitadoras para o transporte de sedimentos. Este setor é reconhecido como uma região com baixo aporte sedimentar, também conhecida como "região faminta" (Bastos et al., 2015, Vieira et al., 2019). Esse baixo aporte sedimentar é refletido na natureza da sedimentação encontrada na região, predominantemente carbonática. Assim, observa-se uma transição de uma sedimentação de areia/areia fina na porção mais rasa da plataforma, caracterizada por um fundo com distribuição granulométrica formando um mosaico acústico bastante complexo (conforme observado no Backscatter, Figura 36), para uma região com domínio de sedimentação carbonática, apresentando fragmentos de algas calcáreas vivas e rodolitos em diferentes formatos (tipo 1 - predominância de formato nodular e tipo 2 - formato nodulares e ramificado) e bioconstruções. Localmente, observa-se ainda a presença de briolitos, que são formados por briozoários (Holz et al., 2020). Na área da plataforma adjacente ao Rio Doce, especificamente no Setor Foz, destaca-se uma alternância entre habitats de fundo plano lamoso e bancos de areia lineares inclinados em direção à costa. As porções mais arenosas estão localizadas em direção ao mar aberto (a partir de 25-30 m de profundidade), apresentando extensões com cumes mais íngremes nas bordas. Assim, o habitat lamoso encontrado na plataforma interna da região do Rio Doce refere-se ao depocentro originado pelo aporte sedimentar terrígeno oriundo do Rio Doce, que posteriormente é retrabalhado pelos processos físicos presentes na plataforma. A presença de cordões arenosos e escarpas na região enfatiza a transição da dinâmica sedimentar de lama para areia em direção offshore. Dessa forma, o material depositado na área pode ser transportado ou retrabalhado para regiões mais externas da plataforma. Desta forma, a continuidade do mapeamento revela que a porção mais afastada da foz do Rio Doce, em direção offshore, exhibe a presença de rodolitos e fragmentos de algas em torno das isobatas de 35 a 40 m. Mesmos as cristas destes bancos arenosos também apresentam a ocorrência de rodolitos.

Já a continuidade do mapeamento entre os setores APA e Rio Doce destaca a transição entre a região influenciada pelo Rio Doce, com aporte sedimentar, e a região com predomínio de sedimentação carbonática. Essa transição é claramente refletida na batimetria, que passa de uma área mais suave para uma região mais recortada por vales e irregularidades. Essa mudança também é evidente na sedimentação, onde as áreas mais suaves são compostas por sedimentos de lama e areia, influenciados pelo aporte do Rio Doce, enquanto a região mais heterogênea apresenta fragmentos de algas calcárias, rodolitos e bioconstruções. O detalhamento desta região mostrou uma alteração dos rodolitos na direção sul, desta forma os rodolitos encontrados na região mais ao sul do setor APA/RD apresentam estruturas adjacentes de algas calcárias associados a eles tornando seu formato mais ramificado (tipo 2), diferentemente dos rodolitos encontrados mais próximo a região do Rio Doce que são mais nodulares (tipo 1). Já o setor Norte, dos Recifes Esquecidos, que segue desconectada em relação à área mapeada do setor contínuo APA/Rio Doce, compõe um habitat altamente complexo, marcado por estruturas recifais, vales incisos e formas de fundo. Essa região representa a única evidência de estruturas recifais ao sul da plataforma de Abrolhos, fazendo parte do maior complexo coralíneo do Atlântico Sul formando pináculos ou estruturas com mais de 5m de altura (Vieira et al., 2023). Além de toda complexidade de um habitat de recifes, a região também é marcada pela presença de rodolitos evidenciando ainda mais sua complexidade e importância.



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). Integridade dos Habitat em relação aos Bentos - Nascimento et al. (2022), a comunidade bentônica apresentou algum tipo de alteração à dados pré-desastre 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 5 anos analisados, quando disponível). \* Essas estruturas recifais foram mapeadas a partir de perfis sísmicos e não por ecobatimetria ou sonografia.



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 (Figura 37(a)). 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%(Figura 37 (a)) 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 5 anos do PMBA (Figura 37 (b)). 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 descontínuos de presença de rejeito entre os anos de monitoramento 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. Vale destacar que nas regiões mais offshore podemos encontrar Rodolitos (a partir da isóbata de 35m), sendo este habitat totalmente sensível a elevado índices de turbidez, além de ser considerado um ambiente com alta geodiversidade e que sustenta uma alta biodiversidade.

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 a possíveis terraços de abrasão e não necessariamente ocorre um monitoramento do impacto nestas áreas. É possível observar indícios da presença do sinal do rejeito nas porções mais externas da APA, porém os resultados não são consistentes, já que nas duas estações, o impacto só teria ocorrido em um ano, porém o habitat atingido foi o de fundos de rodolitos, que é um habitat vulnerável. Os dados nesta região foi possível diferenciar padrões na distribuição dos rodolitos ao longo da área mapeada, desta forma temos os 'Rodolitos Tipo I' composto por um fundo com mais de 90% de Rodolitos, já os 'Rodolitos Tipo II' são rodolitos com estruturas de algas calcárias associadas e a presença de areia e o 'Rodolitos, fragmentos e areia' é um fundo com rodolitos espaçados com a presença de fragmentos carbonáticas e areia. O mapeamento da região da APA mostrou a distribuição de diversos canais, onde parte deles apresentam um fundo composto por areia/lama, porém parte dos canais apresentam um fundo de Rodolitos. Nas estações ao norte de Degredo, o impacto na comunidade bentônica só foi observado no ano 4 do monitoramento, e

associado aos habitats arenoso e lamoso. Entretanto, essa região apresenta a ocorrência de fundos de rodolito e estruturas recifais, que são habitats vulneráveis e pouco sendo a única evidência recifal ao sul da plataforma de Abrolhos (Vieira, et al., 2023). Apesar de serem encontradas apenas uma única evidência da presença do sinal do rejeito, a região em questão apresenta uma alta complexibilidade e importância em termos ecológicos.

Para o setor Abrolhos, o impacto na comunidade bentônica também foi observado somente no ano 4 em um habitat de cascalho. Entretanto, o resultado não tem consistência espalho-temporal ao longo dos setores estudados.



#### **4 CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO**

Em termos de mapeamento de habitat, os resultados evidenciaram a heterogeneidade da plataforma com a presença de um extenso fundo de rodolitos de diferentes padrões, diversas estruturas recifais e vales incisos, além de evidenciar o lobo deltaico do Rio Doce e a presença de formas de fundo e estruturas erosivas, como escarpas e sulcos. Nesse relatório, para uma análise mais regional, os mapas são apresentados com uma nova classificação de classes de habitat em multi-escala, ou seja, os mapas mostram a distribuição das classes de fundo com base em dados regionais e outra escala mais detalhada com base no mapeamento de alta resolução feito ao longo do PMBA.

No último ano de projeto foi possível mapear a região entre o Rio Doce e a REVIS/APA, conectando as áreas amostradas que antes estavam isoladas. É importante destacar que a lateralidade do mapeamento garante que os habitats sejam espacialmente analisados quanto à sua integridade. Essa área revelou a presença de mais vales incisos, continuando a complexidade representada na APA. Observou-se uma diferenciação nos fundos de rodolitos com forma ramificada (sudeste da área) e fundo de rodolitos somente com formas nodulares (nordeste). Foi possível observar uma região bem-marcada na batimetria/backscatter das diferenças existentes entre uma região sob influência de aporte de sedimento e uma região faminta dominada por sedimentação carbonática (com baixo aporte sedimentar), marcando a influência do Rio Doce na morfologia da plataforma.

Considerando os processos sedimentares, após o grande aporte do material oriundo do rompimento da Barragem de Fundão nos meses iniciais (novembro de 2015 a janeiro de 2016) observou-se uma tendência de redução das concentrações de MPS a partir do primeiro ano. Entretanto, os valores continuaram maiores que os valores de referência (dados pretéritos de 2013 e 2014 nos setores Foz), principalmente durante eventos hidrológicos extremos do Rio Doce que, de acordo com as observações aqui realizadas, é a forte responsável pelos picos de MPS, juntamente com os eventos de alta energia na plataforma continental (sistemas de frentes frias), provocando a ressuspensão do sedimento de fundo.

A foz do Rio Doce, região mais afetada pelo aporte de rejeito de minério de ferro, como comprova os indicadores analisados por esse tema, apresenta um mosaico de habitat marcado por fundos lamosos, arenosos e presença de estruturas de rodolitos nas porções mais offshore. A presença de barras arenosas lineares em direção offshore a partir da profundidade de 25 m reforça a transição de fundos de lama para areia em direção offshore, indicando uma região de alta dinâmica junto ao fundo. Essa transição indica uma dinâmica sedimentar onde o material depositado no habitat lamoso pode ser transportado/remobilizado para regiões mais externas da plataforma. Isso fica claro a partir da observação de feições erosivas no fundo lamoso e do depósito com sinal de rejeito no testemunho T13. Além disso, a análise da densidade do sedimento superficial e do indicador potencial de mobilidade do fundo mostra que o material aportado à Plataforma Continental pelo Rio Doce durante o rompimento da barragem de Fundão alterou as propriedades físicas do sedimento local. Essa alteração pode ser



observada na frequência de ocorrência de menores densidades de fundo em relação aos anos anteriores ao rompimento da barragem. Esse fato, associado ao aumento da energia de ondas na região (ou variabilidade intra e interanual) promove um maior potencial de ressuspensão do fundo sedimentar, levando a uma maior mobilidade do sedimento de fundo. Assim sendo, essa alteração continua a ser identificada nos dias atuais, provavelmente devido ao fato que o material ligado ao rompimento da barragem continua alcançando a Plataforma Continental via aporte fluvial. Na plataforma adjacente à Foz, em sua porção média e externa, além de habitats de bancos arenosos há também a presença de rodolitos associados a macroalgas e fragmentos carbonáticos. Por fim, na porção mais distal, 50 m, encontram-se estruturas recifais e bioconstruções potencialmente formados por agregados de rodolitos. Na plataforma interna do setor Foz Central observa-se, de forma consistente, a presença do sinal de rejeito nos sedimentos e uma tendência de aumento significativo ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) da razão calculada (IMS%).

Uma análise em conjunto (dados de presença de sinal de rejeito, potencial de mobilidade de fundo e impacto na comunidade bentônica) mostrou que o habitat lamoso em frente à foz do Rio Doce, e em direção ao norte (até a profundidade de ~30m), encontra-se impactado, ou seja, com baixa integridade. Já para a porção externa ( $>$  que 30m de profundidade), habitat arenoso, indicam sinais de presença de rejeito de maneira menos constante ao longo dos anos de monitoramento.

No setor REVIS/APA Costa das Algas nas estações rasas até 36m, observou-se a presença do sinal de rejeito nos sedimentos de fundo ao longo de todo período do monitoramento, com aumento significativo ( $p$ -valor  $< 0,05$ ) do MPS. Nessa região há uma complexidade morfológica desde sua porção rasa, com formas de fundo intercaladas de areia e lama, além de porções de laterita, até sua porção média (antes dos 40m) com o início das feições de vales incisos onde há o predomínio de fundos de rodolitos geralmente associados à outras formas de algas calcárias. Vale destacar também que nas bordas dos canais, bem como nas porções mais distais offshore, há a presença de estruturas recifais na forma de crostas/fundos rígidos que são potencialmente agregados de rodolitos e descritos no relatório como bioconstruções, assim como os da porção offshore da região do Rio Doce. Assim, nesse setor, a análise conjunta revela que a porção rasa dos habitat de lama e areia são os mais impactados. Da mesma forma, na região central em direção à plataforma externa da APA Costa das Algas, há indícios da presença de sinal de rejeito e do impacto na comunidade bentônica. Os resultados não são constantes, pois em duas estações de amostragem, o impacto parece ter ocorrido apenas uma vez em anos diferentes (Figura 37). No entanto, é importante notar que o habitat afetado foi o de fundo de rodolito, um ambiente ecologicamente muito importante e ambientalmente vulnerável ao aporte de material fino.

O setor Norte, dos Recifes Esquecidos, que segue desconectada em relação à área mapeada do setor contínuo APA/Rio Doce, compõe um habitat altamente complexo, marcado por estruturas recifais, vales incisos e formas de fundo. Essa região representa a única evidência de estruturas recifais ao sul da plataforma de Abrolhos formando pináculos ou estruturas com mais de 5m de altura. Além de toda complexidade de um habitat de recifes, a região também é marcada pela presença de rodolitos evidenciando ainda mais sua complexidade e importância. Nesse setor, os indicadores analisados

evidenciam um aumento significativo do MPS na região de Barra Nova e Itaúnas, apresentou também aumento da mobilidade do sedimento superficial de fundo. Além disso, ocorreu maior frequência da presença do sinal de rejeito no sedimento de fundo nas estações mais rasas (DEG 01, DEG 02 e BS 01). À vista disso, o impacto na comunidade bentônica só foi observado no ano 4 do monitoramento no habitat arenoso e de rodolito (Norte), bem como de cascalho em Abrolhos. Entretanto, o resultado não tem consistência espaço-temporal ao longo deste setor estudado.

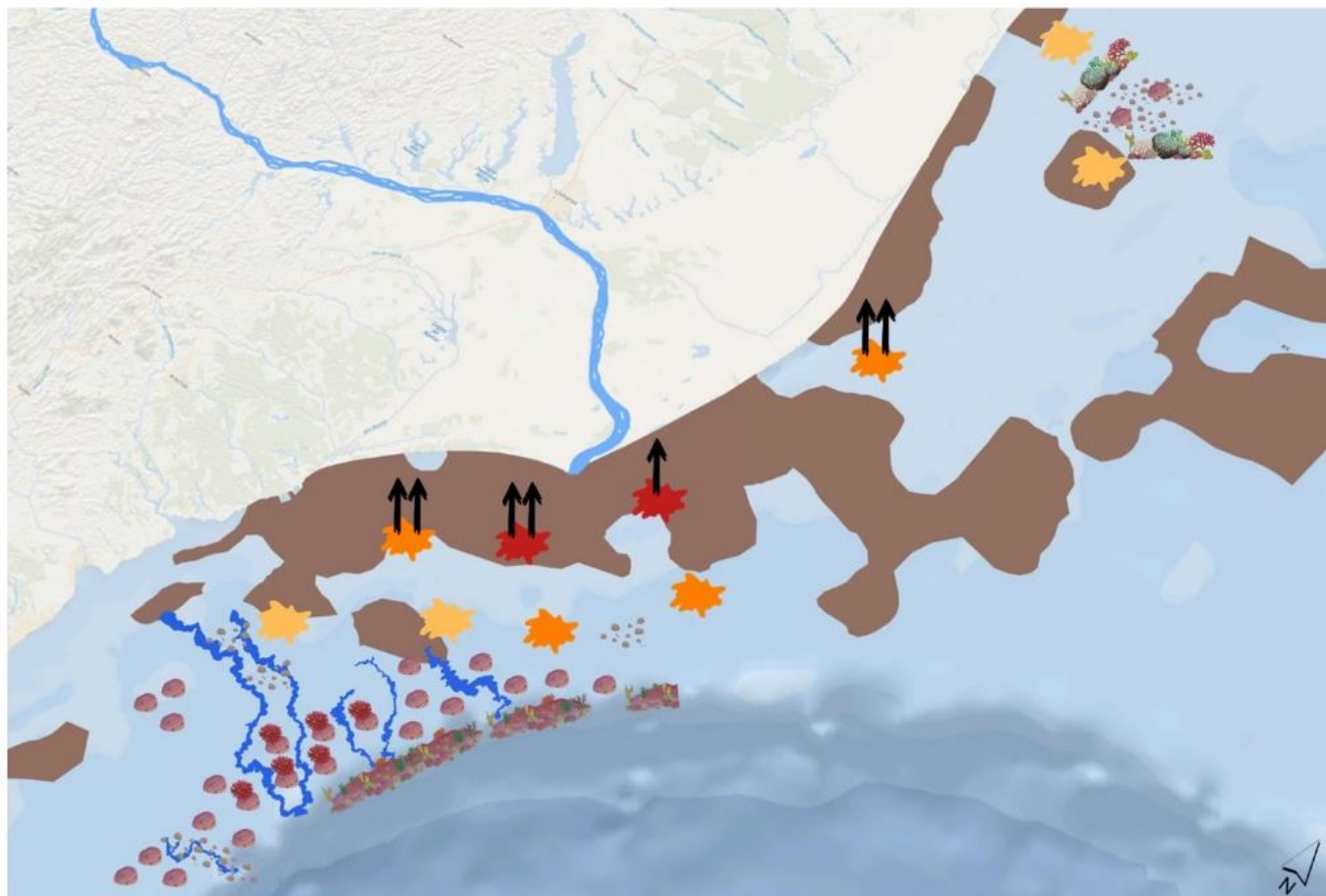
Embora o indicador concentração de MPS indique uma redução em relação ao observado no período inicial após o rompimento da barragem (2015 e 2016), mantém-se a observação de valores acima da referência, os outros indicadores mostram que o material oriundo do rompimento da barragem continua sendo depositado na plataforma continental adjacente, com maior ocorrência de impacto nas estações de até 20 metros de profundidade.

Uma comparação com resultados ecotoxicológicos na área dos habitats mapeados, vemos que a baixa integridade do habitat lamoso no setor Foz do Rio Doce é corroborada pelos resultados de ecotoxicologia, que encontraram elevadas concentrações de Fe, Cd, Cr e Pb no músculo de camarões no setor foz do rio Doce durante os períodos secos de 2018 e 2020 (FEST, 2023). Esse habitat é uma importante área de pesca de camarão, principalmente para comunidade local de Regência. A assembleia de macrofauna de crustáceos foi caracterizada por uma comunidade basal formada por espécies de grande relevância ecológica e interesse comercial, como os camarões sete-barbas (*Xiphopenaeus kroyeri*) e rosa (*Farfantepenaeus* spp.).

Embora haja indícios de impacto no setor Apa Costa das Algas, os resultados não são uniformes espacialmente. É importante notar que o habitat afetado é composto por bancos de rodolito, um ambiente ecologicamente muito importante e ambientalmente vulnerável ao aporte de material fino. O impacto no bentos é corroborado pelos resultados ecotoxicológicos em que foram encontradas elevadas concentrações dos elementos Cd, Cr e Pb no músculo de camarões para a APA Costa das Algas, durante os períodos secos de 2018 e 2020 (FEST, 2023).

No setor Norte, os resultados de integridade do habitat mostraram impactos observado no ano 4 do monitoramento no habitat arenoso e de rodolito, bem como de cascalho em Abrolhos. Entretanto, o resultado não tem consistência espaço-temporal ao longo deste setor estudado. Entretanto, a baixa integridade dos habitat do setor Norte é corroborada pelos resultados de ecotoxicologia que encontraram elevadas concentrações de Fe, Cd, Cr e Pb no músculo de camarões durante os períodos secos de 2018 e 2020 (FEST, 2023).

O tema em questão construiu um resumo gráfico dos principais resultados encontrados ao longo dos 5 anos do monitoramento. A presença do sinal de rejeito e a mobilidade do fundo são as médias destes resultados ao longo dos 5 anos de monitoramento.



**Presença do sinal de rejeito no sedimento de fundo**  
(média dos 5 anos das amostras por setor)

- > 70%
- 70 a 40%
- < 40%

**Mobilidade do sedimento de fundo**  
(média anual da mobilidade nos 5 anos do monitoramento)

- 50 a 60%
- 40 a 50%

Vales Incisos

Habitat de lama (regional)

Rodolitos

Rodolitos, fragmentos e areia

Bioconstruções

Recifes

## **5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS**

Para o mapeamento de habitat, cerca de 9% da área planejada no plano de trabalho não foi mapeada devido aos problemas associados ao equipamento e condições meteoceanográficas. O mau funcionamento do hardware compromete a qualidade dos dados coletados, tornando necessário enviar o equipamento para manutenção. Além disso, o equipamento está em uso desde do início do projeto, ou seja, a quase 5 anos, trabalhando de forma ininterrupta. Por outro lado, o não mapeamento dos 9% restantes (referente ao plano de trabalho dos últimos 18 meses) não impacta a análise final do relatório (Figura 38).

A extensão espacial dos setores foi escolhida no Plano de Trabalho de 2022 para justamente preservar a conectividade entre as áreas mais sensíveis impactadas. Sendo assim, o que antes eram 4 áreas isoladas duas no setor APA (raso e profundo), outra no Rio Doce e a última nos Recifes Esquecidos agora podemos entender a lateralidade entre as 3 primeiras áreas estando somente os Recifes ainda isolados espacialmente. Essa conduta foi de extrema importância haja visto que a finalização do mapeamento da APA Costa das Algas e sua conexão com o Rio Doce nos trouxe um entendimento de uma relação bem complexa entre a morfologia frente ao Rio Doce que passa de cordões lamosos e arenosos e com rodolitos sob as formas de fundo em profundidades acima de 35m até atingindo estruturas recifais para um complexo fundo recortado por vales e fundos de rodolitos e também estruturas recifais acima de 55m de profundidade em direção à APA Costa das Algas. Dessa forma, as áreas consideradas prioritárias em termos de complexidade e continuidade foram realizadas.

Em relação aos 9% faltantes, parte da área não mapeada está localizada na porção à noroeste do Rio Doce, justamente deixada por último por não participar da conexão lateral com a APA. Essa região potencialmente possui a continuação das formas de fundo arenosas e com rodolitos bem como os recifes mais distais frente à Foz do Rio Doce. A outra região não mapeada é uma pequena porção entre a APA e a extensão do que já foi mapeado no setor Rio Doce, essa área é composta potencialmente por um fundo mais regular e lamoso.





## 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.
- 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.
- 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.
- 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.
- FEST, Fundação Espírito-santense de Tecnologia. Relatório Anual do PMBA/Fest – RT-43, Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática. 193 pag. 2023.
- 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.
- HOLZ, V., BAHIA, R., KAREZ, C., VIEIRA, F., MORAES, F., VALE, N., SUDATTI, D., SALGADO, L., MOURA, R., AMADO-FILHO, G., & BASTOS, A. . Structure of Rhodolith Beds and Surrounding Habitats at the Doce River Shelf (Brazil). *Diversity*, 12(2), Article 2., 2020. <https://doi.org/10.3390/d12020075>
- 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,  $\delta^{13}\text{C}$  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., ALVES, P. R., Di DOMENICO, M., BRAGA, A. A., DE PAIVA, P. C., D'AZEREDO ORLANDO, M. T., SANT'ANA CAVICHINI, A., LONGHINI, C. M., MARTINS, C. C., NETO, R. R., GRILO, C. F., OLIVEIRA, K. S. S., DA SILVA QUARESMA, V., COSTA, E. S., CAGNIN, R. C., Da Silva, C. A., Sá, F., & De Lourdes Longo, L. . The Fundão dam failure: Iron ore tailing impact on marine benthic macrofauna. *Science of The Total Environment*, 838, 156205., 2022  
<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.156205>

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>

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.

VIEIRA, F. V., BASTOS, A. C., & QUARESMA, V. S. . Submerged reef and inter-reef morphology in the Western South Atlantic, Abrolhos Shelf (Brazil). *Geomorphology*, 442, 108917., 2023  
<https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108917>



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.

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.