

**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 Costeira

RT- 43/ JUN 23

RA2022 PMBA/Fest

Vitória,

Junho de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	METODOLOGIA	3
2.1	COLETA	5
2.2	ANÁLISE.....	6
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	9
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	13
3.1	VALOR DA RAZÃO ISOTÓPICA SR/ND EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA	15
3.2	EXCESSO DE FE E MN EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA	19
3.3	MINERALOGIA DOS SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA.....	21
4	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	22
5	REFERÊNCIAS	23

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

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

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

2 METODOLOGIA

A metodologia apresentada contempla o escopo em vigência no momento de entrega deste relatório, ou seja, as amostragens e análises previstas para o Novo Ciclo do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática – PMBA submetidas à Fundação Renova através do FORMULÁRIO DE APRESENTAÇÃO DE PLANO DE TRABALHO em 31 de agosto de 2022. Após a descrição da metodologia implementada, será apresentado um breve descritivo sobre as modificações metodológicas (parâmetros, análise de parâmetros ou grupo de parâmetros, dentre outros) que ocorreram ao longo da evolução do PMBA/Fest a fim de determinar os indicadores.

As atividades relativas a esta proposta de Sedimentação Costeira visam o monitoramento oceânico do fluxo sedimentar e natureza dos sedimentos para duas regiões, entre aquelas ecologicamente relevantes localizadas nas adjacências da Foz do Rio Doce: (1) ao Norte, na porção capixaba do Banco de Abrolhos, onde encontramos os recifes esquecidos; e (2) ao Sul, na APA Costa das Algas. Este monitoramento é proposto para acontecer em duas partes: (1) monitorar, em caráter sazonal, o material sedimentável nas regiões definidas acima, objetivando sua assinatura geoquímica, ao nível isotópico, cujo emprego possibilita inferir a origem geológica dos sedimentos; (2) buscar uma relação entre o aporte sedimentar e as variáveis meteoceanográficas que atuam nas regiões de interesse através da aquisição de dados oceanográficos medidos *in situ*, modelos numéricos e uso de produtos de satélite. O estudo da sedimentação é empregado na caracterização de impactos decorrentes da atividade antrópica (ex.: a presença de traços de rejeitos de minério decorrentes do rompimento da barragem de Fundão) e do aporte decorrente da erosão de zona costeira decorrente do ciclo hidrológico, tempestades e a passagem de sistemas frontais que atingem a região. Além da análise isotópica dos

sedimentos, o estudo prevê a análises mineralógicas e de composição elementar sobre os sedimentos no sentido de oferecer maior robustez as interpretações relativas à proveniência mineral.

O sistema isotópico do Sm-Nd é baseado no decaimento do isótopo radioativo ^{147}Sm para o isótopo radiogênico ^{143}Nd a uma taxa de $6,54 \times 10^{-12}$ por ano (Lugmair & Marti, 1977) e com uma meia vida de 106 bilhões de anos (Dickin, 2005). Todas as medidas isotópicas em laboratório são feitas por meio de razões em relação a um isótopo natural, não radiogênico, nesse caso ^{144}Nd . Essa normalização evidencia a proporção radiogênica do Neodímio, refletindo a origem da rocha (manto versus crosta terrestre) e, por consequência, dos sedimentos dela derivados. No caso da razão isotópica $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ os valores medidos possuem variações significativas muito pequenas entre as amostras. Portanto, é convencional apresentar os dados utilizando uma notação (ϵNd) que indica a diferenciação da amostra de um modelo de reservatório do manto comum a todo planeta Terra, chamado CHUR (meteoritos condriticos; De Paolo & Wasserburg, 1976). A equação para tanto é apresentada a seguir:

$$\epsilon\text{Nd} = \left(\frac{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{amostra}}}{^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}_{\text{CHUR}}} - 1 \right) \times 10^4 \quad \text{Eq. 1}$$

Por sua vez, o sistema isotópico do Rb e Sr é baseado no decaimento do isótopo radioativo ^{87}Rb para o isótopo radiogênico ^{87}Sr a uma taxa de $1,42 \times 10^{-11}$ por ano (Aldrich et al., 1953). As razões isotópicas são normalizadas pelo isótopo natural ^{86}Sr .

O fracionamento entre os isótopos destes sistemas ocorre primordialmente durante a diferenciação da crosta a partir do manto. As rochas cálcicas e ferro-magnesianas do manto tendem a concentrar o Sm e o Sr durante a diferenciação (fusão parcial), enquanto o Nd e o Rb se concentram nas rochas mais silicosas e potássicas da crosta, formadas a partir da fusão parcial das rochas do manto. Portanto, a crosta sempre terá uma razão $\text{Sr}_{\text{radiogênico}}/\text{Sr}_{\text{natural}}$ maior, e uma razão $\text{Nd}_{\text{radiogênico}}/\text{Nd}_{\text{natural}}$ menor em relação ao manto de origem (De Paolo & Wasserburg, 1976).

Ainda que os sistemas Sm-Nd e Rb-Sr mostrem uma correlação negativa entre os valores em rochas ígneas da crosta oceânica e da crosta continental, esta mesma correlação não é observada em sedimentos e rochas sedimentares metamorfas. Isso acontece por causa do intemperismo e alteração química dos minerais. Durante o intemperismo, os elementos terras-raras e o rubídio tendem a ser adsorvidos e ocupam espaços nas estruturas dos argilo-minerais. O estrôncio, por sua vez, tende a ser lixiviado dos minerais e se concentra na água. Em sedimentos antigos, observamos um aumento da razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ em relação às rochas de origem, em virtude do contínuo decaimento radioativo do ^{87}Rb contido no sedimento. No entanto, em sedimentos atuais, não há tempo para que a razão isotópica seja significativamente alterada por conta do decaimento do ^{87}Rb . Portanto, nesses casos, a razão isotópica deve corresponder àquela da sua origem, mesmo que esta tenha um histórico de intemperismo anterior.

Meta 1 – Consolidar o uso da assinatura de origem dos sedimentos a partir de isótopos radiogênicos como ferramenta para detecção da presença de traços de rejeitos proveniente da barragem de Fundão nas áreas oceânicas dos recifes esquecidos na porção capixaba do Banco dos Abrolhos e APA Costa das Algas.

A estratégia adotada por este grupo de trabalho objetiva estabelecer uma assinatura geoquímica ao nível isotópico da origem mineral para os sedimentos que aportam nas regiões de interesse aqui definidas. De forma complementar a esta abordagem técnica, realizamos a análise de todos os potenciais termos-fonte sedimentares que atuam na região, ou seja, os sedimentos que fluem pela foz do Rio Doce, sedimentos dos principais rios que desembocam diretamente na região e sedimentos das zonas costeiras expostos a erosão pluviométrica. Neste contexto, um modelo de mistura isotópica é aplicado no sentido de inferir sobre os percentuais de contribuição de cada fonte sedimentar postulada. Os minerais e as rochas tem razões distintas de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, de acordo com a derivação geológica. Estas razões isotópicas estão menos sujeitas a interferências ambientais quando comparadas aos elementos químicos de um modo geral. No estudo hidrológico as diferenças na composição isotópica do Sr e Nd no material particulado em suspensão carregados pelos rios que alimentam os oceanos, revelam uma sobreposição de assinaturas, refletindo a heterogeneidade das rochas fontes na escala de cada bacia de drenagem (GOLDSTEIN & JACOBSEN, 1988; WALTER *et al.*, 2000). Para se identificar a proveniência continental de sedimentos a combinação das assinaturas dos isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ é uma das mais qualificadas, devido, entre outros fatores, suas razões típicas em determinados domínios geológicos (LEE *et al.*, 2010). Essas razões estão pouco sujeitas ao fracionamento isotópico decorrente do intemperismo quando aplicado aos estudos de curta escala de tempo (GAIERO *et al.*, 2004). Além disso, a composição dos isótopos radiogênicos de Sr e Nd da litosfera são significativamente diferentes do manto, o que permite a distinção entre as suas origens litológicas das zonas vulcânicas jovens e dos velhos escudos continentais, (GROUSET & BISCAYE, 2005). Além dos isótopos de Sr e Nd.

Meta 2 - Caracterizar as condições meteoceanográficas para os intervalos de integração das amostragens visando comparações com os dados sedimentológicos. Para cada período de coleta sedimentar, empregaremos análises de dados meteorológicos coletados regionalmente e modelos para a dinâmica atmosférica e oceânica no sentido de interpretar os dados sedimentológicos à luz das alterações no ambiente marinho e componente atmosférica.

2.1 COLETA

As atividades de campo se constituem na instalação e manutenção das armadilhas que integram a coleta de material sedimentável e do monitoramento de parâmetros da coluna d'água durante as missões de campo programadas. Deve-se ressaltar que o monitoramento sedimentológico ocorre de forma contínua, uma vez que as armadilhas permanecem ininterruptamente expostas nas áreas de interesse sedimentológico. Basicamente, o sistema funciona com o aprisionamento do sedimento que se deposita livremente da coluna d'água no sentido do substrato marinho. O conteúdo sedimentar adentra um cone de captura através de uma grade instalada na "boca" do coletor. O material é

diretamente introduzido numa garrafa amostradora de borossilicato de 1 L, que é trocada a cada campanha. Possui internamente uma garrafa graduada de borossilicato de 1 L para aprisionamento do material sedimentado e que pode ser trocada a cada campanha. A manutenção dos integradores de sedimentos é de fácil manuseio podendo todo o conjunto ser retirado, se necessário, sem a remoção de seus fixadores. Sua tampa superior removível facilita sua manutenção como a remoção de cracas ou de algas alojadas no compartimento superior da armadilha. Além das armadilhas fixas com garrafa individual, está prevista a instalação de uma roseta de coletores programada para troca subaquática automática. Trata-se do amostrador *McLane* para 13 garrafas. Considerando-se os padrões típicos de sedimentação para a região, este sistema será programado para realizar coletas automáticas a cada 30 dias de forma a não gerar “overflow” sobre as garrafas amostradoras. Uma sonda multiparamétrica será empregada para a monitoração dos parâmetros oceanográficos. No setor continental, sedimentos das fozes dos principais rios regionais também serão amostrados a cada semestre visando determinar suas assinaturas isotópicas para Sr e Nd. Estes dados serão empregados no modelo de mistura isotópica entre as assinaturas dos sedimentos na foz do Rio Doce e fontes locais de sedimentos.

2.2 ANÁLISE

A partir do diagrama ϵNd versus $^{87}Sr/^{86}Sr$, podemos observar diferenciações entre campos dentro da própria crosta continental. Como exemplo, os granitoides de idade Ediacarana (635 a 541 Ma) e Cambriana (541 a 485 Ma) possuem ϵNd menos negativo e valores de $^{87}Sr/^{86}Sr$ menores do que as rochas de idade Paleoproterozoicas e Arqueanas (> 1600 Ma). Nesse sentido, estes reservatórios crustais caracterizam grupos geoquímicos dos quais os sedimentos podem ser diretamente derivados. Assim, as razões isotópicas de rochas sedimentares se diferenciam das razões elementares (e as complementam) por indicar as origens e contextos geotectônicos das rochas fontes.

Quando os sedimentos possuem valores isotópicos intermediários entre dois grupos isotópicos, são feitos testes de hipótese para indicar mistura entre os grupos. A equação utilizada para esta análise é apresentada abaixo (Faure, 1978):

$$R_M^x = \frac{R_A^x X_A + R_B^x X_B}{X_A + X_B} \quad \text{Eq. 2}$$

Na equação, R é a razão isotópica do elemento x, com concentração X, dos componentes (*end-members*) A e B. O valor f nessa equação representa a proporção do componente A em relação a B, para a mistura M.

Igualando as equações de mistura para as duas razões isotópicas de interesse, isto é, $^{143}Nd/^{144}Nd$ e $^{87}Sr/^{86}Sr$, temos a equação proposta por Allègre (1969)

$$\frac{R_1 - R_M}{R_M - R_2} = K \frac{\rho_1 - \rho_M}{\rho_M - \rho_2} \quad \text{Eq. 3}$$

Onde R é a razão isotópica $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e p a razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; 1 e 2, componentes da mistura isotópica (*end members*); M, amostra em análise (mistura entre fontes); K, razão entre a razão elementar Sr/Nd das componentes. A curva hiperbólica resultante, portanto, pressupõe misturas entre somente dois componentes. Ela é usada como um modelo para detectar misturas possíveis e também quantificá-las. No entanto, temos que lembrar que o método se baseia na tendência de comportamento pareado entre os dois sistemas isotópicos e em sua preservação a partir do momento da erosão de sua área fonte.

Em suma, as assinaturas geoquímicas dos sedimentos armadilhados baseiam-se nas razões dos isótopos de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e de forma complementar a caracterização mineralógica e de composição elementar. As razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ quando descritas num plano cartesiano são usadas como referência para estudos de proveniência sedimentar e para estudos de misturas isotópicas de dois componentes isotopicamente contrastantes. Estas técnicas, combinadamente, constituem-se em uma robusta metodologia para se demonstrar a existência (ou inexistência) de vestígios da pluma de sedimentos do Rio Doce sobre as áreas de interesse desta proposta. Sobre os sedimentos armadilhados, realiza-se um complexo processo de dessalinização, seguido de remoção da matéria orgânica, sílica biogênica e carbonados para finalmente analisar o resíduo litogênico remanescente e nesta fração avaliar o conteúdo isotópico.

- caracterizar as amostras quanto a composição elementar e mineralógica.

Estas atividades serão complementares as análises isotópicas visando uma mais ampla caracterização das amostras sedimentares. Tais resultados permitirão avaliar o enriquecimento de Fe nas amostras e suas mineralogias de origem. As determinações serão baseadas nas técnicas de FRX e DRX;

- As condições de pré-existência, referentes as características dos sedimentos antes do rompimento da barragem de Fundão, serão determinadas a partir de camadas sedimentares anteriores ao rompimento da barragem. Para tal, coletaremos um testemunho sedimentar de cada região, sendo suas camadas sedimentares datadas por ^{210}Pb , cuja escala de tempo da técnica geocronológica permite inferir acumulações de sedimentos em uma escala temporal de aproximadamente 150 anos, com resolução semi-decadal. Para tal será empregada a espectrometria gama de alta resolução fazendo uso de um detector de germânio hiperpuro coaxial (HPGe) de faixa de energia estendida (modelo GX5021 – Canberra) com eficiência relativa de 50% e resolução de 2,1 keV (FWHM) no ^{60}Co (1,33 MeV) pico de energia. Este sistema é instalado em uma blindagem de Pb de muito baixo ruído de fundo com espessura média de 15 cm, revestida internamente com Cu puro. O modelo geocronológico utilizado neste trabalho será o Constant Rate of Supply (CRS). A cronologia é baseada na fração não suportada do ^{210}Pb total:

$$^{210}\text{Pb}_{\text{unsupported}} = ^{210}\text{Pb}_{\text{total}} - ^{210}\text{Pb}_{\text{supported}} \quad \text{Eq. 4}$$

onde, $^{210}\text{Pb}_{\text{supported}} = ^{226}\text{Ra}$

Neste modelo, as taxas de acúmulo de sedimento em massa são uma medida de sedimentação que muda com a profundidade. As taxas de sedimentação são determinadas traçando o logaritmo do

excesso de atividades de ^{210}Pb em relação aos pesos acumulados de sedimentos secos e calculando as taxas de sedimentação em intervalos de inclinação constante. De acordo com Appleby e Oldfield (1983), a idade das camadas sedimentares pode ser obtida pela equação:

$$t = \frac{1}{\lambda} \ln \left(\frac{A_o}{A_x} \right) \quad \text{Eq. 5}$$

onde A_o é a atividade total de ^{210}Pb não suportado na coluna de sedimentos e A_x é a atividade total de ^{210}Pb não suportado na coluna de sedimentos abaixo da profundidade x e λ a constante de decaimento radioativo do ^{210}Pb (0,03114);

Para a caracterização meteoceanográfica, serão utilizados dados provenientes da reanálise ERA5 do *European Centre for Medium-Range Weather Forecasts* (ECMWF). A reanálise ERA5 é baseada em assimilação de dados e consiste de média de conjunto (*ensemble*) de 10 membros. Possui resolução espacial de $0,25^\circ$ para variáveis atmosféricas, e $0,5^\circ$ para variáveis oceânicas. Foram utilizados dados diários e mensais referentes às variáveis vento zonal (m/s), vento meridional em superfície e em 925 hPa (m/s), temperatura do ar em 925hPa, pressão média ao nível do mar (PMNM, hPa), precipitação total (mm/dia) e temperatura de superfície do mar ($^\circ\text{C}$). Estes dados podem ser encontrados de forma gratuita em <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/dataset/reanalysis-era5-single-levels-monthly-means?tab=overview>. Também será utilizado dados da reanálise oceânica *Global Ocean Data Assimilation* (GODAS) do *National Centers for Environmental Prediction* (NCEP). Os dados do GODAS possuem resolução espacial de $0,33^\circ$ em latitude, e $1,0^\circ$ em longitude. Foram utilizados dados mensais referentes às variáveis fluxo de momento zonal (N/m^2), fluxo de momento meridional (N/m^2), e salinidade de superfície do mar (psu). Este conjunto de dados pode ser encontrado gratuitamente em <https://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/GODAS/>. As análises serão realizadas utilizando os softwares R, Climate Data Operators (CDO) e Microsoft Excel.

No caso da identificação da ocorrência de frentes frias, será utilizado o método objetivo de rastreamento de Pampuch e Ambrizzi (2015, 2016). Esta metodologia foi aplicada em dados diários de PMNM, temperatura do ar em 925 hPa e vento meridional em 925 hPa provenientes da reanálise ERA5, para o período de integração das amostras sedimentares. A frente fria é identificada se são registrados: aumento na PMNM, diminuição da temperatura do ar a 925 hPa, e mudança de quadrante norte para quadrante sul do vento meridional a 925 hPa, de forma simultânea. Esta metodologia foi aplicada ao ponto mais próximo da foz do Rio Doce que consta do estudo de Pampuch e Ambrizzi (2015, 2016), ou seja, em latitude 20°S e longitude 40°W . Posteriormente, a quantidade total de frentes frias será contabilizada para cada período amostral. Também será contabilizada a quantidade de dias com vento de quadrante sul, sem excluindo a ocorrência de frentes. Tanto a quantidade de frentes frias quanto de dias com vento de quadrante sul será comparada ao número total de dias por campanha, de forma a se obter a frequência relativa de ambos os eventos.

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Dentro do ponto de vista metodológico, as únicas alterações realizadas estão relacionadas ao pré-processamento das amostras de sedimentos armadilhados. Foi implementado um novo protocolo para dessalinização e todas as amostras são secas a partir da liofilização. Um passo a passo dos novos métodos está apresentado abaixo:

Procedimentos analíticos para remoção de sais solúveis (dessalinização)

As amostras de sedimento deverão passar por um processo de dessalinização para remoção de sais solúveis precipitados junto ao sedimento. As etapas do procedimento incluem:

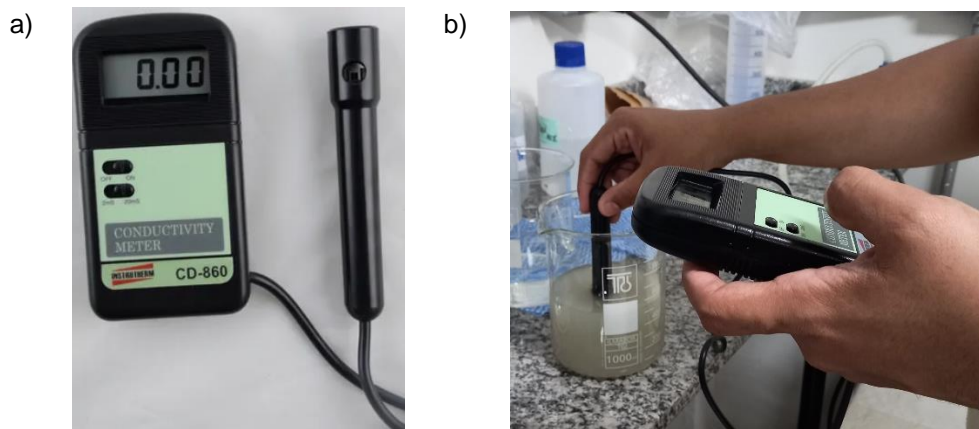
- 1) Transferência das amostras (sedimento + água do mar) da garrafa de coleta para um Cone *Imhoff* (Figura 1) – para fazer a transferência, deve-se homogeneizar a mistura sedimento + água do mar na garrafa e despejar no cone; caso a garrafa não esteja cheia de água do mar, será necessário adicionar água destilada/deionizada para auxiliar o procedimento; nesse caso, essa água já contará como 1ª lavagem e não deve exceder 500 mL; uma vez no cone, o material deve ser homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro previamente higienizado e descontaminado; aguardar 2 horas para decantação do material sedimentar e remover o sobrenadante; antes de se realizar a remoção do sobrenadante, deve-se aferir o volume total e de sedimento no cone.

Figura 1: Cone Imhoff utilizado para decantação das amostras de sedimentos.



- 2) Adição de água destilada/deionizada - o procedimento de dessalinização será feito por meio de lavagens com água destilada/deionizada; cada lavagem corresponderá a adição de 500 mL de água destilada/deionizada; serão realizadas lavagens até que a condutividade do sobrenadante seja = ou < que $0,20 \text{ mS cm}^{-1}$ (Bainbridge et al., 2021) ou até que após a adição de 3000 mL, as curvas de condutividade atinjam uma estabilidade; a condutividade da água destilada/deionizada deve ser medida com um condutivímetro (Figura 2) e deve estar abaixo de $0,005 \text{ mS}$.

Figura 2: a) Condutivímetro empregado no trabalho (Marca Instrutherm – Modelo CD-860: Escala: 0 a 1.999mS/cm, Resolução: 0,001mS e, b) aferição da condutividade a partir do sobrenadante das lavagens dos sedimentos.



- 3) Homogeneização das amostras – a cada adição de água destilada/deionizada, deve-se realizar a homogeneização da amostra com auxílio de um bastão de vidro previamente higienizado e descontaminado.
- 4) Tempo de decantação – entre cada lavagem o tempo mínimo de espera será de 2 h, quando será realizada a remoção do sobrenadante; com 1 h de decantação, deve-se girar o cone em 360° para mobilizar sedimentos que fiquem grudados nas paredes; 15 min antes da remoção do sobrenadante, deve-se agitar o bastão de vidro suavemente ao redor das paredes do cone, também para mobilização de sedimentos.
- 5) Remoção do sobrenadante – após o tempo de decantação, a remoção do sobrenadante do cone *Imhoff* será feita com auxílio de um kitassato acoplado a uma bomba, para um copo de Béquer; a condutividade do sobrenadante deve ser aferida e o mesmo descartado.

Figura 3: "Setup" para remoção do sobrenadante no cone Imhoff.



- 7) Procedimento de secagem da amostra (Figura 4) – este procedimento pode ser feito por secagem na estufa ou no liofilizador; deve-se dar preferência para liofilização, pois a amostra fica mais fácil de desagregar; após a dessalinização, a amostra deverá ser transferida para recipiente de vidro ou plástico, previamente higienizado e descontaminado e levada à estufa a ~ 60 °C ou ao liofilizador; quando utilizado o liofilizador, a amostra deve ser previamente congelada na câmara fria; o tempo de secagem será de no mínimo 24 h, a depender da amostra.

Figura 4: Liofilizador marca Chist e padrão de secagem após "overnight".



- 8) Procedimento de desagregação da amostra (Figura 5) – a desagregação da amostra seca será feita manualmente com auxílio de um gral de ágata; deve-se macerar a amostra cuidadosamente e remover fragmentos fósseis durante o processo; quando finalizado, deve-se pesar a amostra.

Figura 5: Procedimento para desagregação das amostras e remoção de macrofósseis.



Obs.: Procedimentos de higienização e descontaminação dos materiais e equipamentos utilizados deverão ser realizados antes e após a utilização de qualquer um dos itens do laboratório (cones *Imhoff*, equipamentos e recipientes de vidro, gral de ágata, pinça, dentre outros). Serão utilizados detergente e extran para lavagem, esponjas de louça e escovinhas. Se necessário, deve-se deixar o material de molho em extran. Após a lavagem, deve-se rinsar os materiais com água destilada/deionizada.

Análises laboratoriais e pesagem

Ao chegar as amostras *In Natura* no LARAMG, após etiquetadas, elas deveram ser pesadas. O peso (P_1) será considerado apenas como sedimento + água. Após o processo de dessalinização e secagem das amostras, o P_2 será calculado para cada amostra seca. P_2 corresponde ao peso da amostra dessalinizada seca e sem fósseis.

Cada amostra será, então, dividida em:

- Amostra para Isótopos de Sr e Nd (~ 2 g), destinada ao LAGIR/Uer;
- Amostra para ICPOES (~15 g), destinada ao laboratório contratado pela FEST;
- Amostra para DRX (~10 g), destinada ao laboratório contratado pela FEST;
- Amostra por FRX (~10 g), destinada ao laboratório contratado pela FEST.

A depender da massa de material disponível para análises, deve-se priorizar as análises de isótopos sobre DRX e ICP OES. Análises de ICP OES serão priorizadas em relação as de DRX.

O peso P_3 será de ~ 1 g e será utilizado para os cálculos de % de carbonatos + sílica biogênica e de matéria orgânica. No LAGIR, as amostras irão passar por processos de:

- Remoção de Carbonatos e Sílica Biogênica. Após este processo as amostras devem ser pesadas, sendo **P₄** o valor do peso da amostra sem carbonatos e sem sílica biogênica.
- Remoção de Matéria Orgânica. Após esse processo as amostras devem ser pesadas, sendo **P₅** o valor do peso da amostra sem carbonatos, sem sílica biogênica e sem matéria orgânica. Este valor é também referente ao peso da amostra da fração siliciclástica.

Após a pesagem, no LAGIR será realizada a análise de Sm-Nd e Sr da fração siliciclástica. Todo o excedente de amostra deverá voltar ao LARAMG para arquivo.

3 RESULTADOS DOS INDICADORES

Nesta seção serão apresentados os resultados dos indicadores de qualidade ambiental e da biodiversidade aquática do Tema, os quais foram desenvolvidos pelo PMBA/Fest e obtidos ao longo do monitoramento (setembro/2018 – setembro/2022) na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte a gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

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

As amostragens em Abrolhos ocorrem de acordo com a Tabela 1.

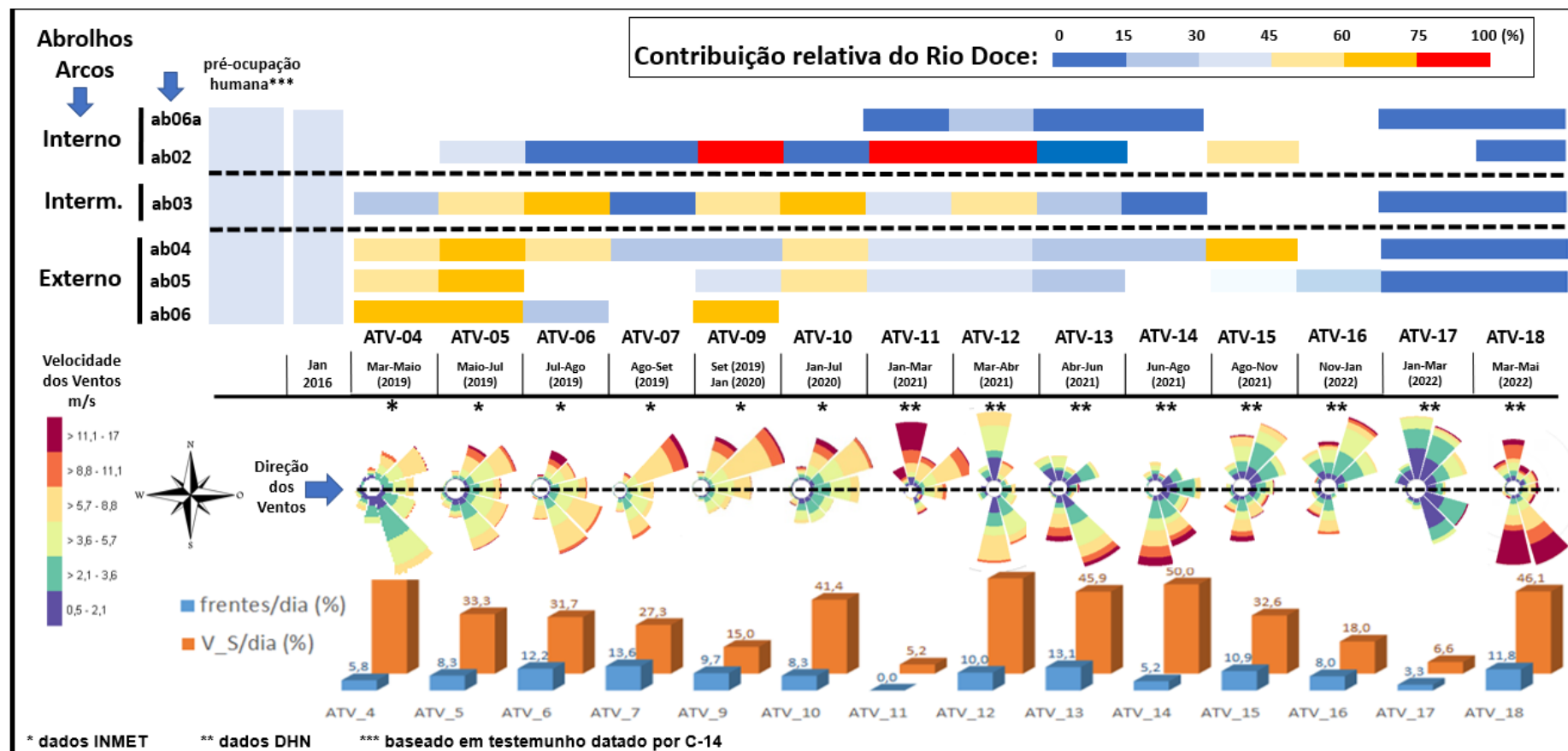
Tabela 1: Intervalos temporais de cada ATV.

ID	Período total de acúmulo de sedimentos nas armadilhas
ATV-04	27/03/2019 a 13-17/05/2019
ATV-05	13-17/05/2019 a 02-04/07/2019
ATV-06	02-04/07/2019 a 14/08/2019
ATV-07	14/08/2019 a 26-27/09/2019
ATV-09	26-27/09/2019 a 17-18/01/2020
ATV-10	17-18/01/2020 a 11/06/2020

ATV-11	30/01/2021 a 28/03/2021
ATV-12	28/03/2021 a 27/04/2021
ATV-13	27/04/2021 a 27/06/2021
ATV-14	27/06/2021 a 24/08/2021
ATV-15	21/08/2021 a 24/11/2021
ATV-16	24/11/2021 a 13/01/2022
ATV-17	13/01/2022 a 16/03/2022
ATV-18	15/03/2022 a 30/05/2022
ATV-19	30/05/2022 a 20/08/2022

3.1 VALOR DA RAZÃO ISOTÓPICA SR/ND EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA

Figura 6: Contribuição do aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura sedimentar) baseada nos isótopos de Sr e Nd, roda dos ventos obtidas in situ, frequência de frentes frias e frequência de vento sul em Abrolhos.



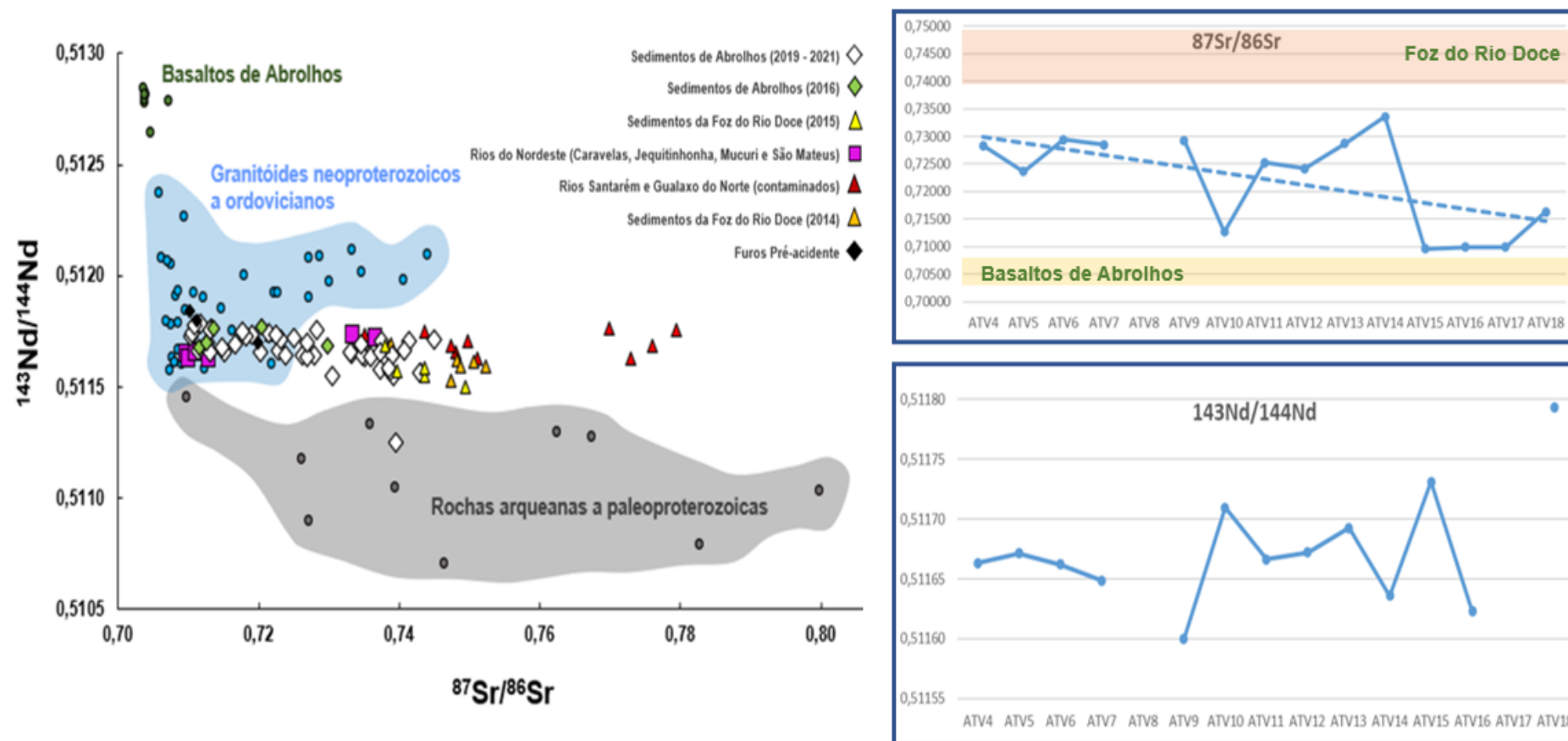
O diagrama apresentado na Figura 6 é o resultado da aplicação do modelo de mistura isotópica que considera as razões isotópicas para estrôncio e neodímio e as concentrações desses elementos nas amostras de sedimentos armadilhados e nos termos-fonte previamente postulados. Dois modelos de mistura foram empregados aqui, sendo um para o arco externo de Abrolhos que considera três componentes sedimentares de primeira ordem (as fozes do Rio Doce e do Rio Jequitinhonha e os basaltos de Abrolhos) e outro para o arco interno de Abrolhos que considera três componentes sedimentares de primeira ordem (as fozes do Rio Doce e do Rio Jequitinhonha e combinadamente os Rios Caravelas e Rio Mucuri). Desta forma, a escala em cores na Figura 6 permite avaliar quantitativamente a presença/ausência de material decorrente da foz do Rio Doce em Abrolhos. Como resultado ao longo do tempo, de 2019 a 2022, a contribuição do Rio Doce variou de 0 a 94 % nas amostras do Arco Interno, de 0 a 74 % nas amostras do Arco Intermediário e, de 0 a 72 % nas amostras do Arco Externo. A contribuição do Rio Jequitinhonha variou de 20 a 53 % nas amostras do Arco Interno, de 25 a 73 % nas amostras do Arco Intermediário e, de 0 a 88 % nas amostras do Arco Externo. Vale ressaltar que, embora o rio Mucuri tenha sido considerado junto ao componente do Estuário de Caravelas, sua assinatura isotópica ($Nd = 0,511721$ e $Sr = 0,736697$) é similar à do rio Jequitinhonha ($Nd = 0,511736$ e $Sr = 0,733328$), de modo que parte do que está sendo contabilizado como Jequitinhonha possa ter origem no rio Mucuri, cuja contribuição seria ausente ou menor que 50 % para as amostras localizadas nos arcos Intermediário e Externo. A contribuição dos basaltos de Abrolhos foi estimada em inferior a 35 % nas amostras do Arco Externo. A contribuição do Rio Doce se mostrou mais constante nas amostras do Arco Intermediário, na região de Popa Verde. A localidade com menor influência do Rio Doce é a região de Timbebas (de 0 a 23 %). Há o predomínio de sedimentos do Rio Jequitinhonha nas amostras coletadas na região de Timbebas. Na região de Sebastião Gomes, o sinal do Rio Doce é mais evidente a partir de setembro de 2019, enquanto, nas demais localidades, o sinal isotópico do Rio Doce variou de 0 a 75 %, com uma média de 45 %. De março a agosto de 2019 sedimentos do Rio Doce chegam, principalmente, nas amostras coletadas nos arcos Intermediário e Externo, com contribuições que variaram de 30 a 75 %. Nesse período, as direções dos ventos foram predominantemente nos quadrantes NE e SE, sendo a componente SE mais expressiva. Na região de Sebastião Gomes, Arco Interno, por outro lado, as contribuições do Rio Doce não excederam 30 % nesse mesmo período. A partir de setembro de 2019 a junho de 2021, quando a componente NE dos ventos regionais se torna mais expressiva, a contribuição do Rio Doce varia de 75 a 100 % nas amostras do Arco Interno, enquanto há uma clara redução da contribuição do Rio Doce para as amostras dos arcos Intermediário e Externo.

Para a Figura 6, também é apresentado o sinal sedimentar do Rio Doce em Abrolhos e a frequência de sistemas frontais (frentes frias) e componente de vento sul. É evidente no sinal sinótico a sazonalidade, sendo os aumentos do sinal do Rio Doce entre as ATV-04 e ATV-10 concomitantes a fase mais ativa de sistemas frontais. As reduções observadas a partir da ATV-11 ocorre independentemente da sazonalidade da ocorrência de sistemas frontais, sugerindo uma diluição do processo inicial de aporte sedimentar.

Em relação a variabilidade do sinal isotópico do Rio Doce nos sedimentos de Abrolhos e a vazão dos Rios que aportam na região de estudo, principalmente o Rio Doce, o Arco Interno, e especialmente a estação de coleta em Sebastião Gomes, foi a região que evidenciou uma melhor correspondência. Entre março a setembro de 2019 a vazão do Rio Doce cai de $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ para $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ e sua contribuição no Arco Interno varia de 30-45 % no período de maio-julho/2019 para 0-15 % no período de julho-setembro/2019. Entre setembro/2019 a janeiro/2020 a contribuição do Rio Doce aumenta para 60-75 % com as vazões do Rio Doce indo de $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ para $\sim 800 \text{ m}^3/\text{s}$. A vazão máxima do Rio Doce para a série temporal de 2019-2021 ocorre em março de 2020 ($\sim 2000 \text{ m}^3/\text{s}$) e decresce para $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ até setembro/2020, quando volta a aumentar novamente. Nesse período, a contribuição do Rio Doce no Arco Interno varia de 0-15 % a 75-100 %. A região de Popa Verde, Arco Intermediário, onde há uma influência mais constante do sinal isotópico do Rio Doce, os picos de influência ocorrem nos períodos de julho-agosto/2019 e janeiro-julho/2020. No período de março a agosto de 2019, quando as vazões do Rio Doce estavam decrescendo de $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ a $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$, houve um aumento do sinal do Rio Doce de 15-30 % para 60-75 %. Esse padrão pode estar associado à ação das frentes frias que geraram ressuspensão do material sedimentar e seu transporte em direção a regiões mais intermediárias de Abrolhos. Em agosto-setembro/2019 o sinal do Rio Doce cai para 0-15 % e volta a subir no intervalo de setembro/2019 a julho/2020, variando de 0-15 % a 60-75 %. Nesse período, o aumento do sinal acompanha um aumento da vazão do Rio Doce, de $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$ para $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$. De julho/2020 a agosto/2021 o sinal do Rio Doce decresce de 60-75 % para 0-15 %.

Nas amostras coletadas no Arco Externo, o sinal isotópico do Rio Doce é, no geral, menor que nos sedimentos dos arcos Interno e Intermediário. Isto implica em menor aporte de material sedimentar do Rio Doce nas porções mais afastadas do parcel de Abrolhos. O conjunto de ilhas poderia servir de barreira para a chegada de sedimentos vindos de SW, principalmente, no Chapeirão do Sueste. No período de março a agosto de 2019 as interações entre pluma fluvial e dinâmica marinha parecem ter sido mais complexas que de agosto/2019 a agosto/2021, quando o sinal isotópico do Rio Doce acompanha o aumento/diminuição da sua vazão. Entre março-julho/2019 e setembro/2019-janeiro/2020 o sinal isotópico do Rio Doce é mais forte no Chapeirão das Manchas em relação aos chapeirões do Pierre e Sueste, sugerindo que os sedimentos estão sendo carregados de SW para NE.

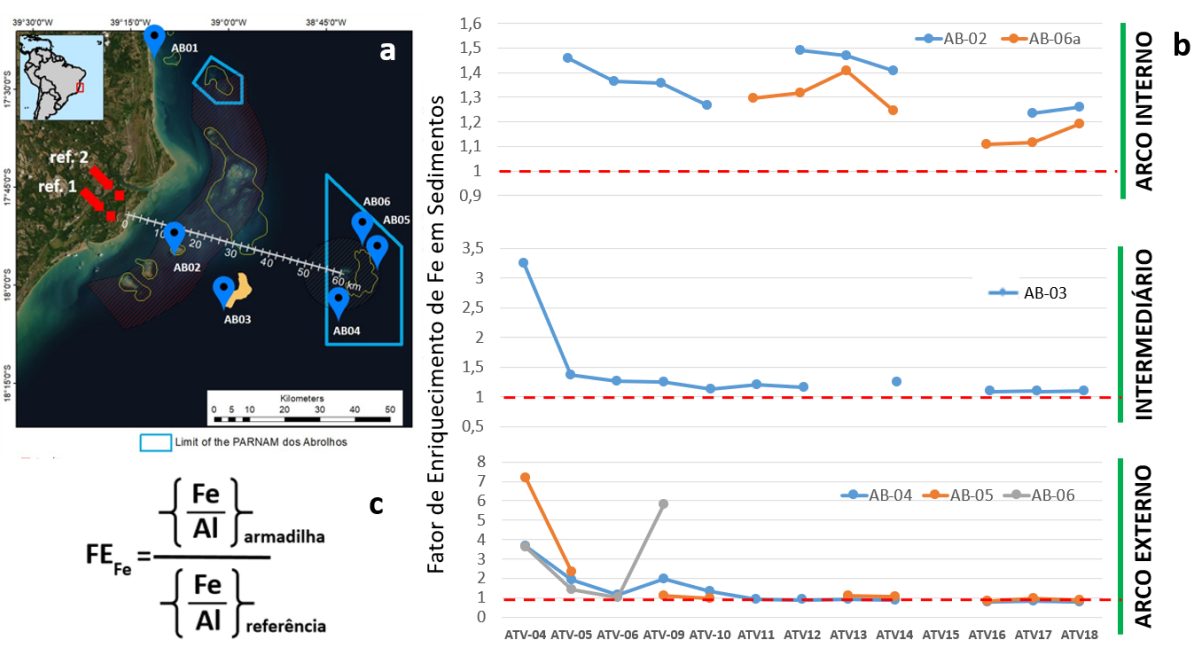
Figura 7: Comparação entre o isotópico referente ao aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura isotópica/sedimentar) em Abrolhos, baseada nos isótopos de Sr e Nd, e as tendências temporais dos isótopos de Sr e Nd, separadamente, durante todas as campanhas para a região de Abrolhos (arcos interno e externo).



Na Figura 7, é mostrado os dados para as armadilhas no contexto da geologia continental associada a região de Abrolhos. É possível observar as influências dos basaltos de Abrolhos representando os processos erosivos marinhos e os principais aportes continentais representados pelos domínios: “granitóides neoproterozoicos a ordovicianos” e “rochas arqueanas a paleoproterozoicas”. As assinaturas isotópicas dos sedimentos armadilhados correspondem claramente a uma mistura destas fontes geológicas, sendo as variações das razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ significativas na diferenciação entre os sedimentos originários da foz do Rio Doce e aqueles encontrados em Abrolhos em condições pristinas. A evolução temporal dos dados isotópicos para Sr e Nd considerando-se Abrolhos como um todo é representada nos quadros a partir dos valores médios para cada ATV. Observamos que entre 2019 e 2022 houve um decréscimo significativo do sinal isotópico para o Sr no sentido dos basaltos de Abrolhos, o que sugere uma progressiva redução da contribuição do sinal sedimentar da foz do Rio Doce sobre Abrolhos e uma tendência de restauração das condições originárias para Abrolhos em termos de assinatura dos sedimentos. Para as razões isotópicas de Nd, este se manteve relativamente constante ao longo do monitoramento.

3.2 EXCESSO DE FE E MN EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA

Figura 8: (a) Mapa de localização das estações de coleta de sedimentos armadilhados e localização dos 2 pontos (ref 1 e ref 2), Netto, 2008, onde foram amostrados 2 testemunhos sedimentares curtos anterior a chegada de rejeitos de minério a foz do Rio Doce, que geraram os valores de referência para a análise do enriquecimento de Fe para sedimentos armadilhados em Abrolhos; (b) Cálculo do enriquecimento de Fe ao longo das ATVs; A linha tracejada delimita o corte para aportes sedimentares externos quando os valores excedem esta referência; (c) modelo para cálculo do enriquecimento de Fe.

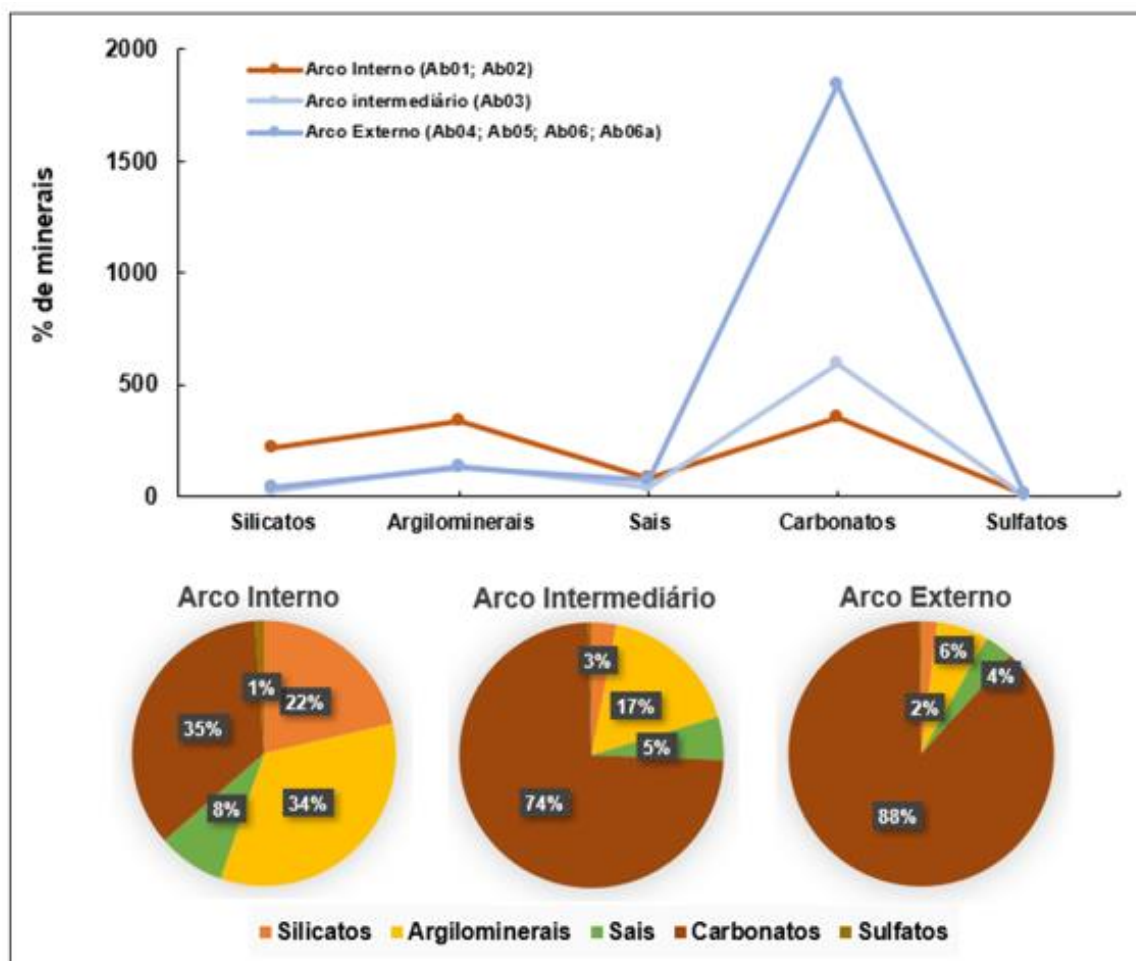


Excessos de Fe foram analisados nos sedimentos armadilhados em Abrolhos em virtude deste elemento representar um dos maiores contaminantes presentes nos rejeitos da Samarco. Os valores de referência para a análise do excesso foram obtidos a partir de 2 testemunhos sedimentares coletados próximos a foz do Rio Caravelas anteriormente ao rompimento da barragem de Fundão e

descritos na tese de Netto, 2008, “Modificações da Zona Costeira do Extremo Sul da Bahia nos últimos 150 anos, e sua relação com a sedimentação do Banco de Abrolhos - UFBA”. Foram utilizadas as razões Fe/Al dos testemunhos sedimentares como referências. Os resultados evidenciam claramente as anomalias de Fe, cuja variabilidade temporal está relacionada aos setores geográficos locais. Há predominância de valores de excesso $> 1,0$ para o arco interno, com tendência de redução (de 1,5 para 1,1) entre as ATVs 4 e 18. Esta tendência dos valores em direção aos padrões naturais indica uma provável redução do impacto dos rejeitos de minério enriquecidos com Fe para o arco interno de Abrolhos. Para a região intermediária, caracterizada pela estação ab-03, observou-se um grande aumento 1,5 e 3,0 no início do monitoramento, até a ATV6, seguindo de redução expressiva com tendência clara aos níveis naturais para a região, mantendo-se assim até o término do monitoramento. Para o arco externo, observamos um período de transição com fortes anomalias no início do monitoramento, entre as ATVs 4 e 9, com valor máximo atingindo fator de enriquecimento 7. Após esta fase, observamos decréscimo da componente exógeno e tendência dos valores aos padrões esperados para a região, ou seja, com a valores de 1,0. Os dados de enriquecimento de Fe obtidos no monitoramento para os arcos interno, externo e região intermediária, corroboram a análise dos dados isotópicos para Sr e Nd que evidenciaram a presença de um pulso sedimentar decorrente do aporte de traços de rejeitos de minério contendo Fe a partir da Foz do Rio Doce com tendência de redução progressiva na série temporal. Vale ressaltar que o arco interno ainda permanece, ao termino da etapa de monitoramento em Abrolhos, sob influência de sedimentos de fontes externas contendo Fe.

3.3 MINERALOGIA DOS SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA

Figura 9: Proporção de minerais nas amostras de Abrolhos distribuídas entre Arco Interno, Arco Intermediário e Arco Externo.



Os resultados de mineralogia indicam associações restritas de minerais que podem estar presentes em litotipos muito variados. A caulinita, gibbsita e illita são argilominerais secundários, formados a partir do intemperismo de feldspatos e micas em climas úmidos e, portanto, não são bons indicadores de proveniência neste estudo. A muscovita é um filossilicato primário ou secundário comum em rochas metamórficas de protólito sedimentar, granitos, leuco-granitos e pegmatitos (litotipos comuns em toda a costa do Espírito Santo e sul da Bahia). Quartzo, por sua vez, é um mineral resistado, ou seja, com nenhuma capacidade de alteração nos processos de intemperismo químico, e presente na maior parte das rochas. A associação mineralógica dos sedimentos coletados pode indicar uma proveniência a partir do retrabalhamento de rochas sedimentares, metassedimentares e de rochas granitóides mais antigas associadas as Bacias Hidrológicas no continente.

A mineralogia dos sedimentos de Abrolhos mostra a presença de minerais dos grupos dos silicatos (quartzo, albita, muscovita e apatita), incluindo os argilominerais (illita, caulinita e gibbsita), carbonatos (calcita, aragonita e calcita magnesiana), sais (halita) e sulfatos (bassanita e gipsita). As amostras de Abrolhos são constituídas, predominantemente, por carbonatos, que compõem 48,09 % a 76,15 % dos

minerais. Argilominerais são o segundo grupo mais abundante, variando de 3,54 a 27,10 %. Sais correspondem a < 10 %. Silicatos variam de 3,14 a 13,65 % e sulfatos ficam em torno de 1-3 %.

4 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

1. As amostras da campanha ATV-19 (30/05/2022 a 20/08/2022) foram prejudicadas pelo excesso de matéria orgânica (algas) que se formou sobre a abertura superior da maioria das armadilhas de sedimentos em Abrolhos. Com isso, muito pouco material foi acumulado nas garrafas amostradoras. Durante as atividades de processamento físico-químico com o pouco de material restante, que envolveu a dessalinização, remoção de matéria orgânica, remoção de sílica biogênica e remoção de carbonatos a quantidade de material litológico resultante foi extremamente baixa. Entretanto, está em curso um esforço a partir de um novo método para a detecção dos isótopos de Sr e Nd em quantidades minerais traço no sentido de recuperar as razões isotópicas destas amostras;
2. Item previsto: Instalação de boia oceanográfica em Abrolhos visando o monitoramento da turbidez, com transmissão de dados em tempo real. Apesar deste item ser discutido dentro do PMBA/Fest e representantes do IBAMA, optou-se pela não implementação do item considerando o fato de que o parâmetro “turbidez” não caracteriza uma assinatura de origem sedimentar. Os resultados posteriores do programa de monitoramento demonstraram que a não implementação do equipamento, não comprometeu as conclusões advindas do tema, visto que a aplicação de uma técnica de assinatura isotópica associada as análises mineralógicas e de enriquecimento em Fe foram robustas o suficiente para a detecção de traços dos sedimentos provenientes da foz do Rio Doce;
3. Análise da razão da fração solúvel Fe/Mn na água do mar: Este item foi inicialmente testado em 2016 e até 2018 foi realizado de forma experimental. O Anexo 8, na ocasião, descartou o uso desta técnica pois os resultados dos laboratórios contatados não apresentaram reprodutibilidade para a análise de Fe dissolvido que fosse desejável ao monitoramento. Por outro lado, nosso grupo de trabalho optou em focar na fração particulada pois permitiria uma comparação direta com os dados provenientes dos sedimentos armadilhados. A partir deste período passamos a utilizar a análise mineralógica como parametrização auxiliar;
4. Investigação quanto a presença/ausência de micropartículas com enriquecimento anômalo de Fe na coluna d'água. Esta ação foi cancelada ainda em 2019 (baseado em vários estudos pretéritos que foram conduzidos pela equipe desde 2016 na região) pois os resultados não acrescentaram conhecimento relevante visto que as associações entre micropartículas com enriquecimento de Fe eram aleatórias, além de representar apenas as condições no ato das coletas das amostras. Observamos que a aplicação de uma técnica voltada para a assinatura geoquímica de origem ao nível isotópico tenha sido mais efetiva na investigação da presença/ausência de traços dos rejeitos de minério. Para substituir esta análise passamos a

utilizar a análise elementar, o incluiu Fe e outros elementos majoritários em sedimentos armadilhados como forma de se investigar as anomalias de Fe em Abrolhos. A partir destes dados passamos a utilizar os Fatores de Enriquecimento de Fe em sedimentos, tendo como base as análises elementares em testemunhos sedimentares coletados no estuário do Rio Caravelas anteriores ao rompimento de Fundão. Este novo parâmetro passou a ser utilizado como principal ferramenta para comparação com as análises isotópicas;

5. Análise da razão isotópica de Sr e Nd na fração dissolvida na água do mar: Dentre todas as avaliações iniciais realizadas em 2019, 90% não apresentou detectabilidade para as análises de isótopos de Nd. Em 2020 o Anexo 8 optou em concentrar seus esforços nas análises de sedimentos armadilhados, seja através dos isótopos de Sr e Nd, da análise elementar e da mineralogia, além da calibração de imagens de satélite para MPS (Material Particulado em Suspensão).

5 REFERÊNCIAS

Almeida, C.M., Barbosa, C.F. Cordeiro, R.C., Seoane, J.C.S., Fermino, G.M., Silva, Turcq, B.J. 2013. Palaeoecology of a 3-kyr biosedimentary record of a coral reef-supporting carbonate shelf, Continental Shelf Research, 70:168-176,

Amorim, F.N., Cirano, M., Soares, I.D., Campos, E.J.D., Middleton, J.F., 2012. The influence of large-scale circulation, transient and local processes on the seasonal circulation of the eastern Brazilian shelf, 13 °S. Cont. Shelf Res. 32, 47–61. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2011.10.011>.

Amorim, F.N., Cirano, M., Marta-Almeida, M., Middleton, J.F., Campos, E.J.D., 2013. The seasonal circulation of the eastern Brazilian shelf between 10°S and 16°S: a modelling approach. Cont. Shelf Res. 65, 121–140. <http://dx.doi.org/10.1016/j.csr.2013.06.008>.

Bowen, H.J.M., Environmental chemistry of the elements, Academic Press, London, 1977

Campos, C.P., Mendes J., Ludka I.P., by Medeiros S., Costa-de-Moura J., Wallfuss C. 2004. A review of the Brasiliano magmatism in southern Espírito Santo, Brazil, with emphasis on post-collisional magmatism. In: Weinberg, R., Trouw, R., Fuck, R., Hackspacher, P. (Eds.), The 750-550 Ma Brasiliano event of South America. Journal of the Virtual Explorer, Eletronic Edition. ISSN 1441-8142, 17: Paper 1.

Campos, C.P., Medeiros, S.R., Mendes, J.C., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I., Ludka, I.P., Dantas, E., 2016. Cambro-Ordovician magmatism in the Araçuaí Belt (SE Brazil): snapshots from a post-collisional event. J. S. Am. Earth Sci. 68: 248-268. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.016>

Castro, M.P. 2019. Evolução do Grupo Macaúbas e Formação Salinas no Orógeno Araçuaí Central, MG. . 180 f. Tese (Doutorado em Evolução Crustal e Recursos Naturais) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2019.

De Paolo, D.J., Wassenburg, G.J. 1976. Nd Isotopic variations and petrogenetic models. *Geophys. Res. Lett.* 3 (5): 249-252. <https://doi.org/10.1029/GL003i005p00249>.

Dickin, A.P. 2005. *Radiogenic Isotope Geology*. Cambridge University Press, New York. <https://doi.org/10.1017/9781316163009>

Dussin, T. M. Associations Plutono-Volcaniques De L'espinhaço Meridional (Se-Brésil): Un Exemple D'évolution De La Croûte Protérozoïque. *Lab. Geologie Structurale, Univ. Orléans, Orléans, Tese De Doutorado*, 177 P, 1994.

Dussin, I.A., Dussin, T.M. 1995. Supergrupo espinhaço: modelo de evolução geodinâmica. *Geonomos*. 3, 19-26.: <https://doi.org/10.18285/geonomos.v3i1.212>

Evangelista, H., Godiva, D., Sifeddine, A., Leão, Z. M. A. N., Rigozo, N. R., Segal, B., Ambrizzi, T., Kampel, M., Kikuchi, R. K. P., Le Cornec, F. 2007. Evidences linking ENSO and coral growth in the Southwestern-South Atlantic. *Clim. Dyn.* 29: 869-880. <https://doi.org/10.1007/s00382-007-0271-8>.

Gonçalves, L., Alkmim, F., Pedrosa-Soares, A.C., Dussin, I.A., Valeriano, C.M., Lana, C., Tedeschi, M.F. 2015. Granites of the Intracontinental termination of a Magmatic Arc: An Example From The Ediacaran Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil. *Gondwana Res.* <https://doi.org/10.1016/j.gr.2015.07.015>.

Hatje, V., Pedreira, R.M.A., Rezende, C.E., Schettini, C.E., Souza, G.C., Marin, D.C., Hackspacher, P.C. 2017. The environmental impacts of one of the largest tailing dam failures worldwide. *Nat Sci Rep.* 7:10706 13. <https://doi.org/10.1038/s41598-017-11143-x>.

Johnson, M.A.; Shatalov, O., The', J. L.; The', C. L. Wind Rose Plots for Meteorological Data – WRPLOT View. Freeware. Version 8.0.2. [S.l.]: Likes Environmental Software, 2018. Accessed on march 2, 2021

Marshak, S., Alkmim, F.F., Jordt-Evangelista, H. 1992. Proterozoic crustal extension and generation of dome-and-keel structure in Archean granite-greenstone terrane. *Nature*. 357: 491-493. <https://doi.org/10.1038/357491a0>.

Marta-Almeida, M., Mendes, R., Amorim, F. N., Cirano, M., & Dias, J. M. 2016. Fundão Dam collapse: Oceanic dispersion of River Doce after the greatest Brazilian environmental accident. *Marine Pollution Bulletin*, 112(1-2), 359–364. doi:10.1016/j.marpolbul.2016.07.039 .

Martins, V.T.S., Teixeira, W., Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C. 2004. Sr and Nd Characteristics of Brasiliano-Pan African Granitoid Plutons of the Araçuaí Orogen, Southeastern Brazil: Tectonic Implications. *Gondwana Res.* 7: 75-89. [https://doi.org/10.1016/S1342-937X\(05\)70307-5](https://doi.org/10.1016/S1342-937X(05)70307-5).

Martins, M., Karfunkel, J., Noce, C.M., Babinski, M., Pedrosa- Soares A.C., Sial A.N., Liu D. 2008. The Pre-Glacial Sequence of the Macaúbas Group in the standard area and the record of the opening of the Araçuaí rift. *Rev. Bras. Geociênc.* 38: 761–772. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2008384761772>.

Miranda, L.B., Castro, F.B.M. 1981. Geostrophic flow conditions of the Brazil Current at 19°S. *Ciência Interamericana*, 22(1-2): 44-48.

Nalini, H.A., Bilal, E., Paquette, J-L., Pin, C., Machado, R. 2000. Géochronologie U–Pb et géochimie isotopique Sr–Nd des granitoïdes néoproterozoïques des suites Galiléia et Urucum, vallée du Rio Doce, Sud-Est du Brésil. *Comptes Rendus de l'Académie des Sciences - Series IIA - Earth and Planetary Science*. 331: 459-466. [https://doi.org/10.1016/S1251-8050\(00\)01440-3](https://doi.org/10.1016/S1251-8050(00)01440-3).

Noce, C.M., Teixeira, W., Quéméneur J.J.G., Martins, V.T.S., Bolzachini E. 2000. Isotopic signatures of paleoproterozoic granitoids from the southern São Francisco Craton and implications for the evolution of the Transamazonian Orogeny. *J South Am Earth Sci* 13: 225-239. [https://doi.org/10.1016/S0895-9811\(00\)00019-5](https://doi.org/10.1016/S0895-9811(00)00019-5)

Noce, C.M., Pedrosa-Soares, A.C., Silva, L.C., Alkmim, F.F. 2007. O embasamento Arqueano e Paleoproterozóico do Orógeno Araçuaí. *Geonomos*. 15 (1): 17-23. <https://doi.org/10.18285/geonomos.v15i1.104>.

Novo, T.A., Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Alkmim, F.F., Dussin, I. 2010. Rochas Charnockíticas do sudeste de Minas Gerais: A raiz granulítica do Arco Magmático do Orógeno Araçuaí. *Revista Brasileira de Geociências*, 40(4): 573-592. <https://doi.org/10.25249/0375-7536.2010404573592>

Oliveira, E.P., Carvalho, M.J., Mc Naughton, N. 2004. Evolução do segmento Norte do Orógeno Itabuna- Salvador- Curaçá: cronologia da acreção de arcos, colisão continental e escape de terrenos. *Geol. USP. Sér. Cient.* 4(1): 41-53. <http://dx.doi.org/10.5327/s1519-874x2004000100003>.

Pedrosa-Soares, A.C., Noce, C.M., Wiedemann, C.M., Pinto, C.P., 2001. The Araçuaí–West Congo orogen in Brazil: An overview of a confined orogen formed during Gondwanaland assembly. *Precambrian Research* 110, 307–323

Peterson, R., Stramma, L. 1991. Upper-level circulation in the South Atlantic Ocean. *Progr. Oceanogr.* 26(1): 1–73. [https://doi.org/10.1016/0079-6611\(91\)90006-8](https://doi.org/10.1016/0079-6611(91)90006-8).

Rodrigues, R.R., Rothstein, L.M., Wimbush, M., 2007. Seasonal variability of the south equatorial current bifurcation in the Atlantic Ocean: a numerical study. *J. Phys. Oceanogr.* 37, 16–30. <http://dx.doi.org/10.1175/jpo2983.1>.

Silveira, I.C.A., Schmidt, A.C.K., Campos, E.J.D., Godoi, S.S., Ikeda, Y.A. 2000. Corrente do Brasil ao Largo da Costa Leste Brasileira. *Rev. Bras. Oceanogr.* 48 (2): 171-183. <https://doi.org/10.1590/S1413-77392000000200008>.

Tedeschi M., Novo T., Pedrosa-Soares AC, Dussin, I. Tassinari C., Silva LC, Gonçalves L., Alkmim FF, Lana, C., Figueiredo C., Dantas E., Medeiros S., De Campos C., Corrales F., Heilbron M. 2016. The Ediacaran Rio Doce magmatic arc revisited (Araçuaí-Ribeira orogenic system, SE Brazil). *J. S. Am. Earth Sci.* 68: 167-186. <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.11.011>

Valeriano, C.M., Neumann, R., Alkmim, A. R., Evangelista, H., Heilbron, Neto, C.A., Paravidini G.S. 2019. Sm–Nd and Sr isotope fingerprinting of iron mining tailing deposits spilled from the failed SAMARCO Fundão dam 2015 accident at Mariana, SE-Brazil. *Applied Geochemistry*. <https://doi.org/10.1016/j.apgeochem.2019.04.021>.

Vilas Boas, G.S., Sampaio, F.J., Pereira, A.M.S. 2001. The Barreiras Group in the Northeastern coast of the State of Bahia, Brazil: depositional mechanisms and processes. An. Acad. Bras. Ciênc.73(3): 417-427.