

**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- 46/ JUN 24

RA2023 PMBA/Fest

Vitória,

Junho de 2024

EQUIPE TÉCNICA

Heitor Evangelista da Silva

Claudio de Morisson Valeriano

Eduardo Delfino Sodré

Elaine Alves dos Santos

Luciana Figueiredo Prado

Newton de Magalhães Neto

Letícia Bastos Eller

Pedro Henrique Gomes da Silva dos Santos

Gilberto da Silva Vaz

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	5
2	METODOLOGIA	5
2.1	COLETA DE SEDIMENTOS DA COLUNA D'ÁGUA	5
2.1.1	Emprego de armadilhas de sedimentos	5
2.1.2	Emprego de amostrador automático	9
2.1.3	Infraestrutura para as atividades embarcadas	11
2.1.4	Coletas de amostras no domínio terrestre	12
2.1.5	Sítios de amostragem no domínio terrestre (foz de rio)	12
2.1.6	Sítios de amostragem no banco de abrolhos	15
2.1.7	Sítios de amostragem em APA Costa das Algas e Recife Esquecidos	17
2.2	ANÁLISES AMBIENTAIS	23
2.2.1	Dados locais complementares	23
2.2.2	Emprego de traçadores para proveniência mineral (isótopos radiogênicos de Sr e Nd): interpretações e contexto geológico	23
2.2.3	Modelo de mistura sedimentar a partir dos isótopos radiogênicos de Sr e Nd	33
2.3	METODOLOGIAS LABORATORIAIS	34
2.3.1	Processamento físico das amostras e dessalinização	34
2.3.2	Secagem e pulverização das amostras de sedimento	35
2.3.3	Preparo físico-químico das amostras para análise de isótopos	36
2.3.4	Procedimento analítico para análise de isótopos em sedimentos	37
2.3.6	Procedimento Analítico para análise de metais por ICP-OES	39
2.3.7	Procedimento analítico para análise por difratometria de raios-X (DRX)	42
2.4	CARACTERIZAÇÃO METEOCEANOGRÁFICA	43
2.4.1	Base de dados meteoceanográficos	43
2.4.2	Identificação de frentes frias	44
3	RESULTADOS	44
3.1	VARIABILIDADE DA RAZÃO ISOTÓPICA SR/ND EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA	45

3.1.1	FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022.....	45
3.1.2	NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e outubro de 2023	56
3.2	EXCESSO DE FE E MN EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA.....	72
3.2.1	FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022	72
3.2.2.	NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e outubro de 2023	77
3.3	MINERALOGIA DOS SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA.....	84
3.3.1	FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022	84
3.3.2	NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e abril de 2023	91
4	CONSIDERAÇÕES FINAIS SOBRE OS 5 ANOS DE MONITORAMENTO ACERCA DOS INDICADORES OBSERVADOS E O AMBIENTE MONITORADO	96
5	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS.....	98
6	REFERÊNCIAS	99

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 DE SEDIMENTOS DA COLUNA D'ÁGUA

2.1.1 Emprego de armadilhas de sedimentos

Durante o período de monitoramento, as coletas sedimentológicas ocorreram de forma praticamente contínua, uma vez que as armadilhas permanecem ininterruptamente expostas nas regiões investigadas, ou seja, tais amostras não correspondem a períodos específicos, ou pontuais, no tempo, mas são integradas no sentido de se avaliar o efeito de transporte oceânico durante uma sequência temporal de processos meteoceanográficos. Para esta atividade e dentro de sua experiência pretérita, o grupo de trabalho desenvolveu um modelo de armadilha de sedimentos baseada nas características de taxas de sedimentação regional e no tempo de amostragem proposto pelo PMBA/Fest. O sistema desenvolvido (hoje em fase de patente) funciona como uma “armadilha de sedimentos”, na qual o

material sedimentar precipitável se deposita livremente no fundo do mar e ali é armadilhado. 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, que é trocada a cada campanha. Na fase inicial do trabalho, visando calibrações satelitais, em cada armadilha foi instalado um sensor de luminosidade e outro de temperatura, os quais forneceram medidas *in situ*, a cada minuto, destes parâmetros, proporcionando valores de sazonalidade.

Para a construção das armadilhas, foram testados vários materiais com diferentes potências de corrosão no ambiente marinho e que pudessem proporcionar um mínimo de contaminação química para as amostras coletadas em seu interior. As dimensões das armadilhas foram testadas de forma a serem compatíveis com as sedimentações típicas observadas em campo que ocorrem tanto no arco interno como externo de Abrolhos. Uma figura síntese das etapas de desenvolvimento das armadilhas está apresentada na Figura 1. Vale ressaltar que o processo de aperfeiçoamento das armadilhas não afeta a série temporal pois as análises apresentadas durante o monitoramento ambiental referem-se a unidade massa elementar/massa ou a assinatura isotópica qualitativa dos sedimentos. Por este mesmo motivo não apresentamos aqui dados de fluxo sedimentar visto que este parâmetro depende das características físicas das armadilhas. A versão, Modelo Abrolhos 3 (), é a versão final do desenvolvimento até a presente data, sendo esta totalmente destacável, de fácil acesso para instalação e manutenção durante mergulho autônomo. A armadilha é toda confeccionada com plástico de alta durabilidade, não gerando contaminações para as amostras como por exemplo de metais provenientes de ferrugem de algum material estrutural. Possui internamente uma garrafa graduada de borossilicato de 1 L para aprisionamento do material sedimentado e que é trocada a cada campanha. Sua manutenção e instalação é fácil podendo todo o conjunto ser retirado, caso necessário, sem a remoção de seus fixadores no substrato marinho. Sua tampa superior removível facilita sua manutenção como a remoção de cracas ou de algas alojadas no compartimento superior da armadilha que possam obstruir o fluxo sedimentar. As hastes de sustentação são aço inoxidável ALSI 316L, pois tem adição de molibdênio, elemento que potencializa a resistência à corrosão, sendo recomendado para ambientes mais suscetíveis à corrosão, como em regiões de maresia e químicos de alta oxidação. O corpo do modelo Abrolhos 3 possui um sensor que monitora a temperatura da água do mar (TIDBIT V2 Temp logger) e a luminosidade do ambiente marinho em comprimentos de onda centrados em 550 nm (PENDANT UA-002-64). Os dados dos sensores são obtidos por “*bluetooth*” com celular sem a necessidade de computador portátil na área de trabalho. O sensor é facilmente destacável, podendo-se descarregar os dados e fazer sua manutenção em cada campanha de trabalho.

Figura 1– Etapas do desenvolvimento das armadilhas de sedimentos realizada pelo grupo de trabalho e implementada no monitoramento pelo PMBA/Fest. Ao longo dos anos as dimensões das armadilhas foram compatibilizadas com os fluxos sedimentares em Abrolhos, com os tempos de integração requeridos no monitoramento e as condições locais de corrosão no ambiente marinho.

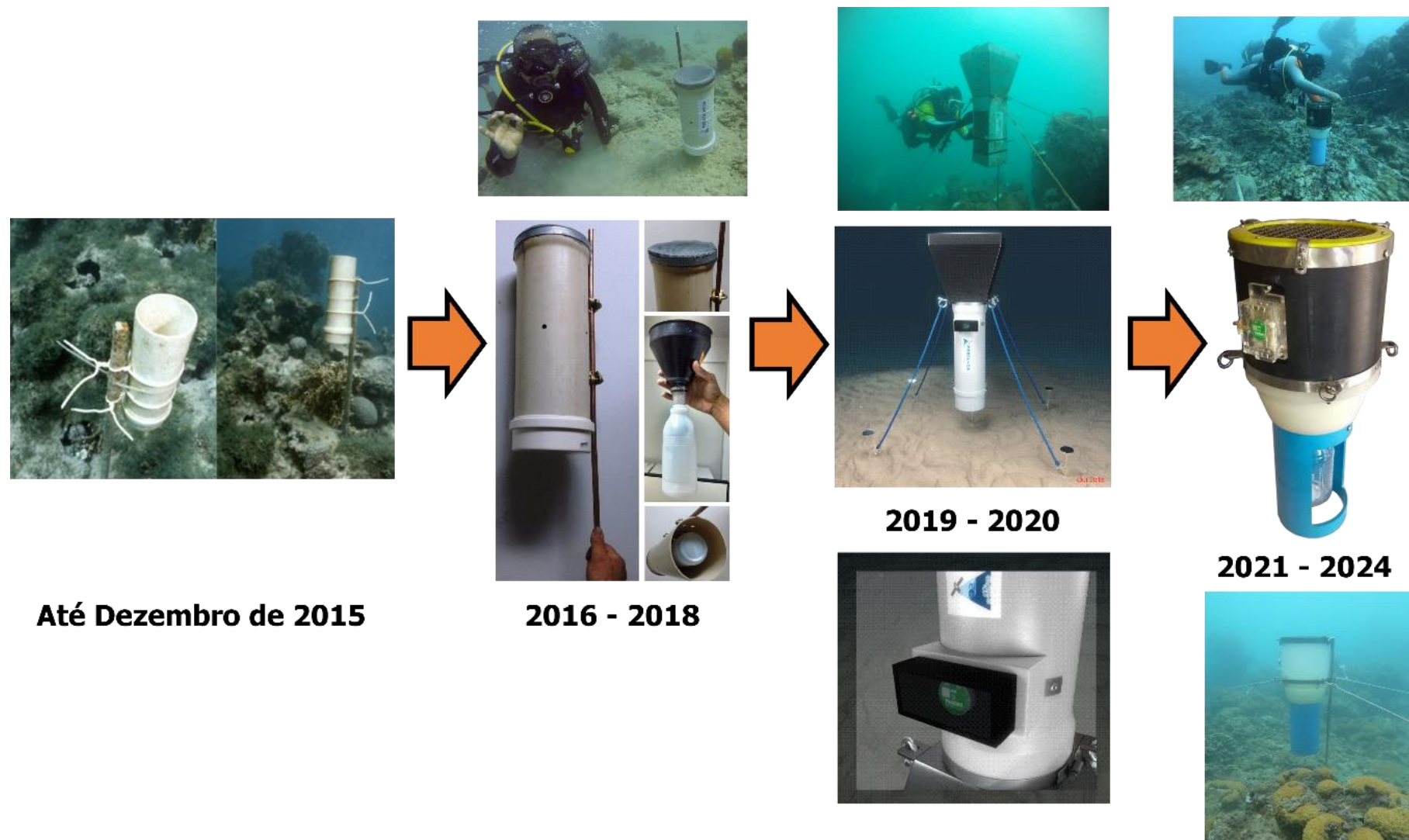
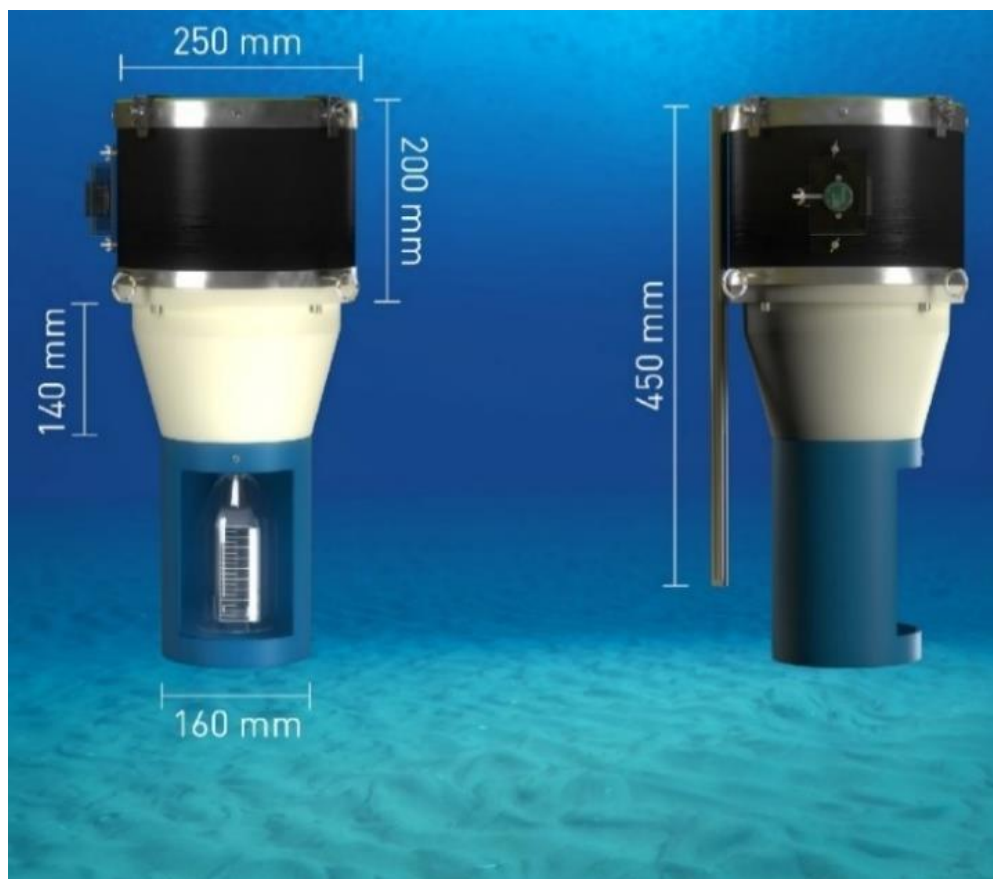


Figura 2 - Detalhes da versão final da armadilha de sedimentos (Modelo Abrolhos 3), desenvolvida pelo grupo de trabalho, e implementada no monitoramento pelo PMBA/Fest.



2.1.2 Emprego de amostrador automático

Além das armadilhas fixas de sedimento, que permitem troca manualmente, foi instalada uma roseta de coletores programada para troca automática. Trata-se do amostrador *McLane* para 13 garrafas amostradoras Figura 3. Neste trabalho, o amostrador *McLane* foi utilizado como um sistema de backup para as armadilhas de sedimentos, sua programação típica para amostragem e integração sedimentar foi de 1 mês. A mostra a configuração de instalação do equipamento na coluna d'água. Ao contrário de outros trabalhos da literatura, em cada frasco de coleta não foi introduzido formol ou qualquer outra substância hipersalina, visto que tais produtos alteram principalmente as razões dos isótopos estáveis de Sr nas amostras de sedimentos.

Figura 3- (Esquerda) Sistema automático de coleta de sedimento (McLane) e sua instalação; (Direita) Disposição do amostrador a partir do fundo marinho.



Neste projeto, o uso do sistema *McLane* foi bastante desafiador. Sua instalação em zonas costeiras mais rasa e sua tela superior de proteção, quando instalado em áreas com grande produtividade primária, leva ao surgimento de excesso de algas em todo o volume do amostrador, dificultando o fluxo vertical de sedimentos e a operacionalidade do motor que rotaciona as garrafas amostradoras. Após vários testes em Abrolhos, foi necessário adaptações de sua ancoragem e o equipamento teve que ser realocado em algumas campanhas, tendo sua instalação final em Abrolhos no dia 24/08/2021, no ponto S17°57'42.7"; W038°40'37.0". No contexto global de seu uso, o amostrador atuou como uma importante ferramenta de “*backup*”, pois algumas armadilhas foram perdidas por rede de arrasto, tombamento ou excesso de fixação de algas.

2.1.3 Infraestrutura para as atividades embarcadas

As campanhas oceanográficas do grupo de trabalho foram realizadas por meio de mergulho autônomo empregando uma embarcação tipo catamarã. Esta embarcação possui espaço para acomodação das garrafas de mergulho e uma rampa para acesso dos mergulhadores, além de proporcionar maior conforto para as missões embarcadas. Na grande maioria das campanhas realizadas em Abrolhos, foi utilizada a embarcação Oceano (Figura 4) De um modo geral, as atividades subaquáticas envolveram a troca das garrafas contendo sedimentos, a manutenção das armadilhas incluindo os estais de amarração, a desincrustação da tampa superior das armadilhas e na remoção e limpeza do sensor de luminosidade e temperatura.

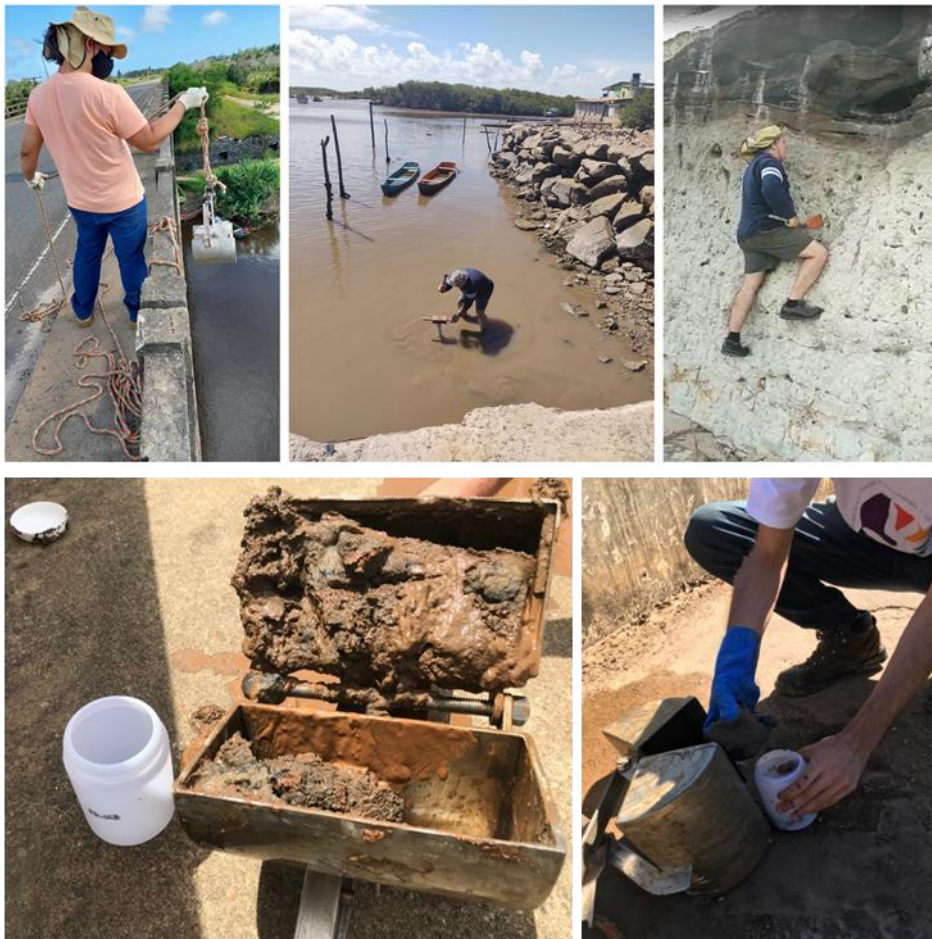
Figura 4 - Ficha técnica da embarcação Oceano utilizada nas atividades de campo em Abrolhos..



FICHA TÉCNICA	
Calado	1,5 metro
Passageiros	15
Tripulação	03
Tamanho	13,50 metros
Velocidade	12 m/h
Boca	6,8 metros

2.1.4 Coletas de amostras no domínio terrestre

Figura 5- Coletas de sedimentos no setor continental, em leito e desemboca de rios na região de estudo do projeto



As campanhas de coleta para amostras sedimentares no setor terrestre ocorreram em 2 domínios: (1) na zona costeira entre o Rio Paraíba do Sul/Rio de Janeiro até o Rio Jaguaribe/Bahia, realizada entre os dias 18/02/2019 e 26/02/2019, sendo amostrados 28 rios, em suas áreas de foz ou estuário, selecionados por suas dimensões; (2) e na região continental (ao longo do Rio Doce), apenas nas fozes de rios relacionados e nas margens do Rio Doce, a partir do Distrito de Bento Gonçalves até a área estuarina próximo a zona de praia. Estas amostragens ocorreram entre os dias 26/03/2019 e 29/03/2019, sendo 12 coletas realizadas ao longo do Rio Doce. A Figura 5 ilustra a de coleta de sedimento terrestre.

2.1.5 Sítios de amostragem no domínio terrestre (foz de rio)

A Figura 6 mostra os pontos de coleta de sedimentos superficiais em desembocadura dos rios relacionados ao estudo de origem sedimentar para o material que aporta em Abrolhos, APA Costa das Algas e Recifes Esquecidos. Na Tabela 1 detalhes das localidades.

Figura 6- Localização dos vinte e nove (29) pontos de amostragem de sedimentos superficiais realizados em desembocadura de rios durante a campanha entre os dias 18/02/2019 e 26/02/2019



Tabela 1- Localização e detalhamento das amostras coletadas na Campanha ii.

Nome da estação	Código da estação amostral	Localidade	Latitude	Longitude
Estação 1	1A/1B	Rio Santa Maria	-20.318.587	-40.298.984
Estação 2	2A/2B	Rio Fundão	-20.056.383	-40.193.132
Estação 3	3A/3B	Rio Piraquê-Açu	-19.948.902	-40.164.333
Estação 4	4A/4B	Rio Doce	-19.408.198	-40.064.506
Estação 5	5A/5B	Rio São Mateus	-18.594.692	-39.732.475
Estação 6	6A/6B	Rio Mucuri	-1.809.711	-39.893.908
Estação 7	7A/7B	Estuário Caravelas	-17.737.375	-39.263.502
Estação 8	8A/8B	Rio Alcobaça	-17.533.884	-39.223.484
Estação 9	9A/9B	Rio Jucuruçu	-17.346.062	-39.224.567
Estação 10	10A/10B	Rio Queimado	-17.014.378	-39.172.952
Estação 11	11A/11B	Rio Caraíva	-16.800.153	-39.146.911
Estação 12	12A/12B	Rio dos Frades	-16.642.565	-39.142.197
Estação 13	13A/13B	Rio Buranhém	-16.450.787	-39.067.505
Estação 14	14A/14B	Rio São João de Tiba	-16.270.156	-39.022.233
Estação 15	15A/15B	Rio Santo Antônio	-1.619.344	-38.978.263
Estação 16	16A/16B	Rio Jequitinhonha	-16.047.723	-39.271.281
Estação 17	17A/17B	Rio Salsa	-15.676.561	-38.936.807
Estação 18	18A/18B	Rio Una	-15.296.068	-39.075.042
Estação 19	19A/19B	Rio Cachoeiras	-14.804.822	-39.036.773
Estação 20	20A/20B	Rio Tijuípe	-14.398.121	-39.042.712
Estação 21	21A/21B	Rio Itacaré	-14.274.675	-38.997.781
Estação 22	22A/22B	Rio Orojo	-13.948.557	-3.919.621
Estação 23	23A/23B	Rio das Almas	-13.598.323	-39.105.554
Estação 24	24A/24B	Rio Jaguaripe	-1.311.259	-38.896.635
Estação 25	25A/25B	Rio Santarém	-13.736.138	-3.914.769
Estação 26	26A/26B	Rio Almada	-14.753.781	-39.063.936
Estação 27	27A/27B	Rio Itapemirim	-20.918.581	-41.075.350
Estação 28	28A/28B	Rio Itabapoana	-21.221.804	-41.308.401
Estação 29	29A/29B	Rio Paraíba do Sul	-21.740.011	-41.333.966

2.1.6 Sítios de amostragem no banco de abrolhos

A região costeira de Abrolhos é uma região de águas rasas, onde está localizado o complexo recifal de Abrolhos. O complexo recifal dos Abrolhos pode ser dividido em 2 arcos. O arco interno, a cerca de 12-15 km da costa, onde estão localizados os recifes de nova viçosa, Coroa Vermelha, Sebastião Gomes, Parcel das Paredes e Timbebas. E o arco externo, a cerca de 60 km da costa, onde estão localizados o arquipélago dos Abrolhos e o recife dos Abrolhos. Tanto o recife de Abrolhos quanto o recife de Timbebas são protegidos pelo PARNAM Abrolhos.

O estabelecimento dos pontos amostrais durante a fase de monitoramento de Abrolhos considerou 3 aspectos principais: (1) o monitoramento tanto do arco interno como do arco externo da zona recifal visto que cada qual apresenta diferentes aspectos morfodinâmicos e sedimentares; (2) a malha amostral ter representatividade quanto as localidades das Unidades de Conservação; (3) a proximidades das estações de monitoramento com as Estações de Monitoramento Permanente do programa *Reef Check* que entre vários objetivos busca avaliar a saúde dos recifes de coral obtendo dados da ecologia de corais o que possibilitara futuras comparações com os resultados apresentados por este grupo de trabalho. Desta forma, inicialmente, um conjunto de armadilhas foi instalado em 5 pontos do arquipélago dos Abrolhos, tendo na ocasião Porto Seguro, como ponto de referência do estudo. A partir de recomendações da CT-Bio sobre a localização dos pontos amostrais, em 2021 foi realizada uma reorganização das localidades, de forma a garantir representatividades amostrais em todas as Unidades de Conservação. Desta forma, a estação ora definida como AB-6 (Chapeirão das Manchas) foi deslocado para o Recife das Timbebas (nomeada como AB-06a). Este novo ponto foi instalado no dia 30/01/2021. Como resultado das primeiras análises do conteúdo sedimentar do ponto amostral AB-01 localizado em Porto Seguro, foi decidida sua remoção da rede de amostragem uma vez que seu sinal original para os traçadores isotópicos tem grande semelhança com o próprio Rio Doce. Neste caso, o Recife das Timbebas, por sua localização mais remota no Setor Norte do Banco de Abrolhos, foi tomado como ponto de referência para o trabalho.

Na Figura 7 é mostrada a localização das armadilhas de sedimentos no Parque Nacional Marinhos dos Abrolhos, no contexto da APA Estadual Ponta da Baleia/Abrolhos, limite da RESEX Cassurubá e da Zona de Amortecimento (Z.A.) da RESEX Cassurubá. A Tabela 2- Localização das estações de monitoramento na região de Abrolhos e Pontos de Controle. Localização das estações de monitoramento na região de Abrolhos e Pontos de Controle.

Figura 7- Área de monitoramento em Abrolhos e pontos de amostragem sedimentar passiva

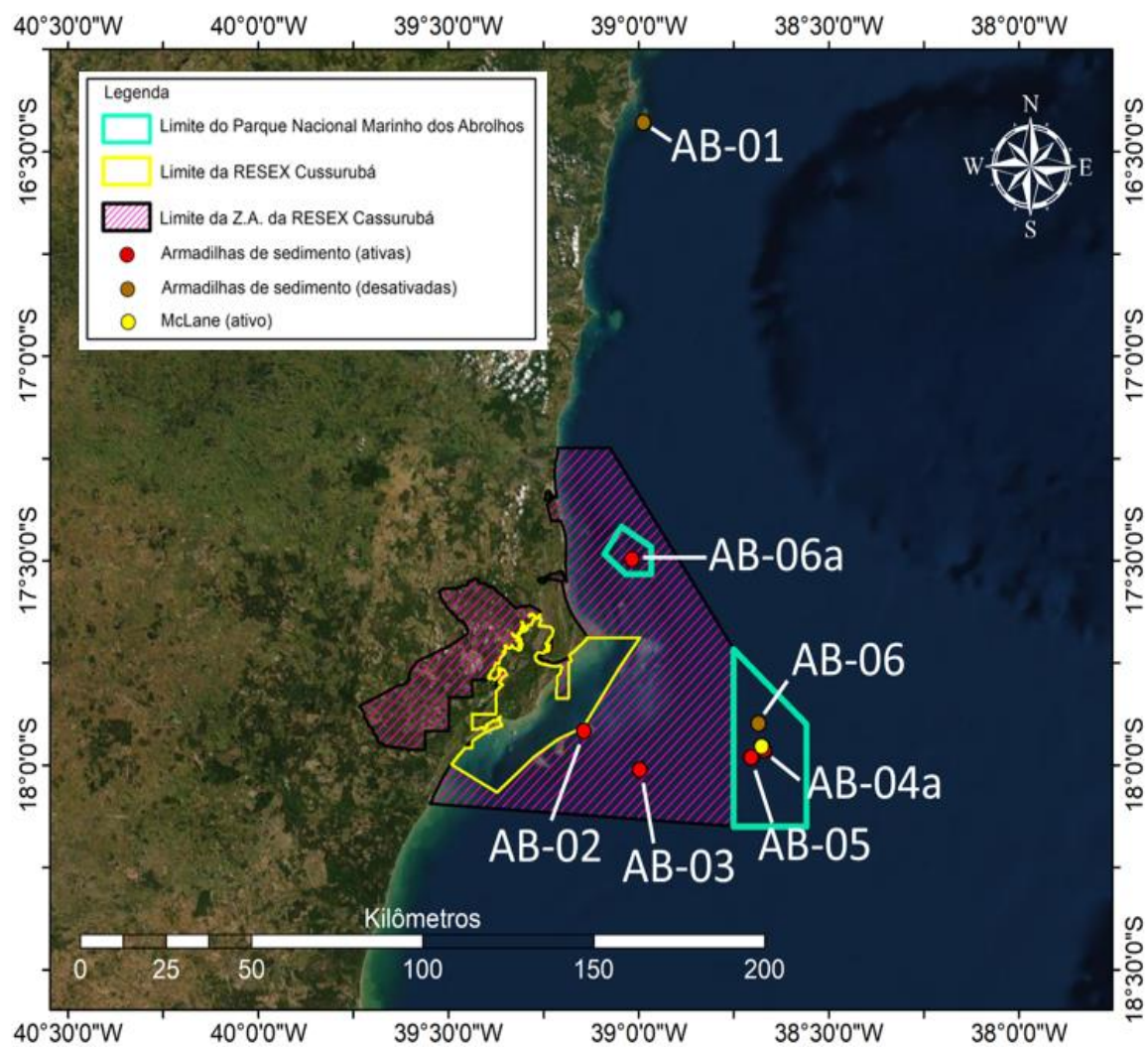


Tabela 2- Localização das estações de monitoramento na região de Abrolhos e Pontos de Controle.

Código da estação (Armadilha de Sedimento)	Latitude (°S)	Longitude (°W)	Localidade
AB_01	16° 25'25.0"	38°59' 09.4"	Porto Seguro - Ponto de Controle Inicial
AB_02	17°55'00.0"	39°08'37.5"	Sebastião Gomes
AB_03	18°02'09.6"	39°00'06.6"	Polpa Verde
AB_04	17°57'48.4"	38°40'11.4"	Chapeirão do Pierre
AB_05	17°58' 49.7"	38°42'17.6"	Chapeirão das Sueste
AB_06	17°53'19.3"	38°41'20.8"	Chapeirão das Manchas
AB_06a	17°29'39.12"	39°01'59.4"	Recife de Timbebas – Ponto de Controle Definitivo

2.1.7 Sítios de amostragem em APA Costa das Algas e Recife Esquecidos

As atividades relativas ao Novo Ciclo, visaram o monitoramento oceânico para “sedimentos armadilhados” em duas novas regiões de interesse 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 (Figura 8). Durante esta etapa do monitoramento, objetivou-se avaliar o impacto direto da pluma de sedimentos durante suas dinâmicas ao sul e ao norte da foz do Rio Doce. Além da instalação de 2 armadilhas de sedimentos tipo Abrolhos 3 em Recife Esquecidos, o sistema automático MacLane foi relocado de Abrolhos para Esquecidos, visto que naquela localidade há uma reconhecida biodiversidade aquática ainda não completamente caracterizada. Um testemunho sedimentar raso, datado por ^{210}Pb em excesso, foi coletado em APA Costa das Algas no sentido de se obter as condições locais de pré-existência em relação ao rompimento da Barragem de Fundão-MG. A Tabela 3 apresenta as coordenadas dos pontos de coleta.

Figura 8- Mapa de localização das estações de coleta para o Novo Ciclo de monitoramento.

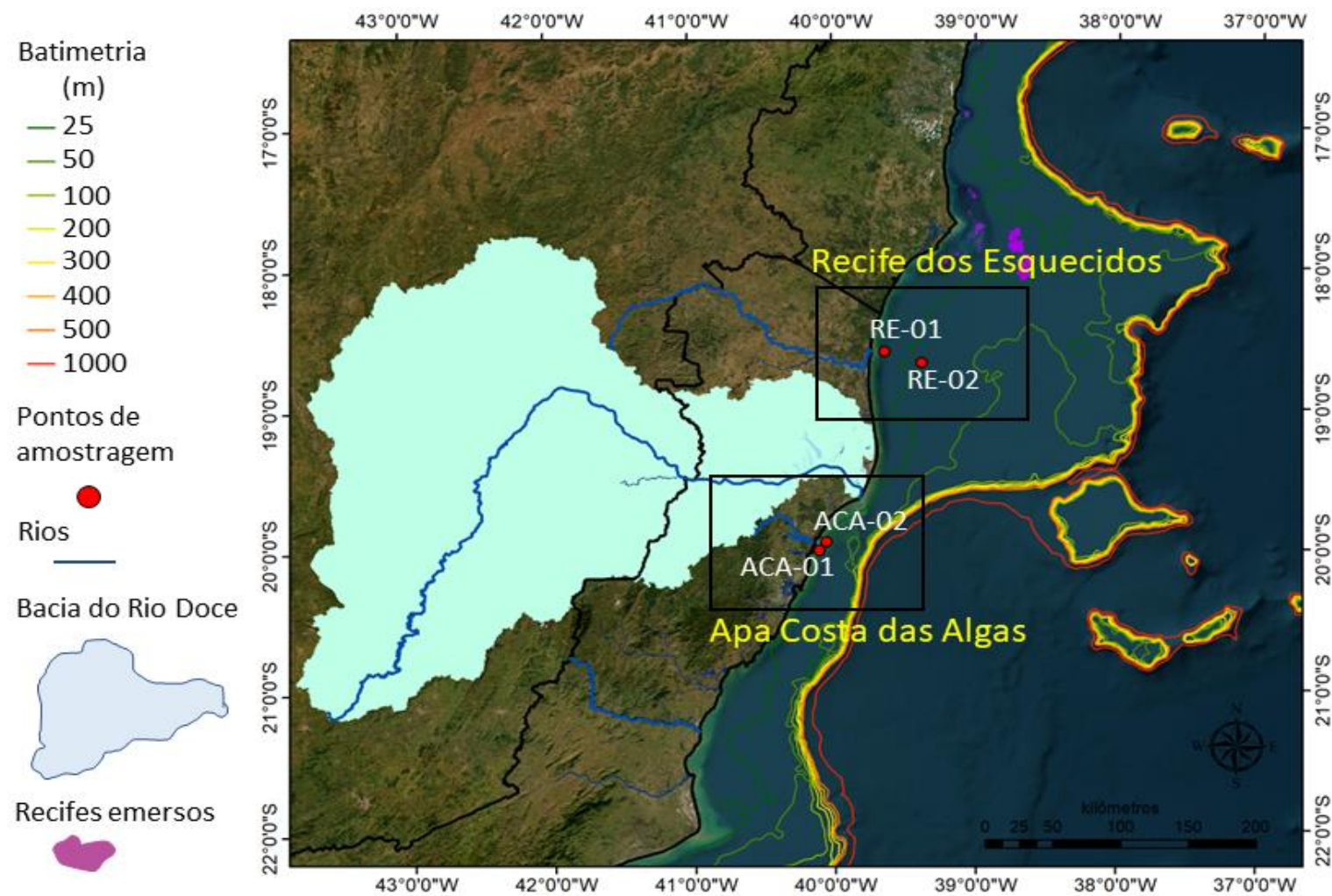


Tabela 3- Localização para: armadilhas de sedimentos para o Novo Ciclo; Sistema automático MacLane e; 1 testemunho sedimentar para referência local.

ID	Localidade	Latitude	Longitude	Prof. (m)
ACA-01	APA Costa das Algas	S20°00'112"	W40°07'353"	17.4
ACA-02	APA Costa das Algas	S20°00'900"	W40°06'298"	30.8
Testemunho APA	APA Costa das Algas	S19°50'906"	W40°03'387"	10m
RE-01	Recife Esquecidos	S18°36'301"	W39°38'307"	17.6
RE-02	Recife Esquecidos	S18°41'380"	W39°22'737"	29.4
MacLane	Recife Esquecidos	S18°36'14.7"	W39°38'18.6"	30

Durante o programa de monitoramento, o grupo de trabalho executou 15 campanhas oceânicas no Banco de Abrolhos e 5 campanhas oceânicas entre APA Costa das Algas e Recife Esquecidos. Durante as campanhas ocorreram medidas *in situ* de parâmetros da coluna d'água (temperatura, profundidade secchi, salinidade e pH), coleta de água da superfície do mar para análises de MPS visando calibração satelital, troca das garrafas amostradoras em cada estação fixa de coleta e manutenção das estações de integração de sedimentos. Esta atividade foi realizada com o apoio de uma equipe de 3 a 4 mergulhadores profissionais, para um período de 3 dias em média, dependendo das condições de mar. A Tabela 4 apresenta a série temporal de forma concisa e a Tabela 5 mostra a sequência temporal e identificação, ID, de todas as atividades embarcadas realizadas pelo grupo de trabalho, como também os períodos de integração e localidades das estações de coleta.

Tabela 4- Intervalos temporais de cada ATV (Atividade de campo embarcada) realizada pelo grupo de trabalho.

ID	Período total de acúmulo de sedimentos nas armadilhas	Localidade
ATV-04	27/03/2019 a 13-17/05/2019	Banco de Abrolhos
ATV-05	13-17/05/2019 a 02-04/07/2019	Banco de Abrolhos
ATV-06	02-04/07/2019 a 14/08/2019	Banco de Abrolhos
ATV-07	14/08/2019 a 26-27/09/2019	Banco de Abrolhos
ATV-09	26-27/09/2019 a 17-18/01/2020	Banco de Abrolhos
ATV-10	17-18/01/2020 a 11/06/2020	Banco de Abrolhos
ATV-11	30/01/2021 a 28/03/2021	Banco de Abrolhos
ATV-12	28/03/2021 a 27/04/2021	Banco de Abrolhos
ATV-13	27/04/2021 a 27/06/2021	Banco de Abrolhos
ATV-14	27/06/2021 a 24/08/2021	Banco de Abrolhos
ATV-15	21/08/2021 a 24/11/2021	Banco de Abrolhos

ID	Período total de acúmulo de sedimentos nas armadilhas	Localidade
ATV-16	24/11/2021 a 13/01/2022	Banco de Abrolhos
ATV-17	13/01/2022 a 16/03/2022	Banco de Abrolhos
ATV-18	15/03/2022 a 30/05/2022	Banco de Abrolhos
ATV-19	30/05/2022 a 20/08/2022	Banco de Abrolhos
ATV-20/21	04/09/2022 a 20/11/2022	APA Costa da Algas e Recife Esquecidos
ATV-22	20/11/2022 a 12/01/2023	APA Costa da Algas e Recife Esquecidos
ATV-23	12/01/2023 a 19/04/2023	APA Costa da Algas e Recife Esquecidos
ATV-24	19/04/2023 a 11/07/2023	APA Costa da Algas e Recife Esquecidos
ATV-25	11/07/2023 a 06/10/2023	APA Costa da Algas e Recife Esquecidos

Tabela 5- Dados gerais das Estações de coleta de sedimento e períodos de integração sedimentar.

ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO SEDIMENTAR																		
Nome da estação	Lat.	Long.	Localidade	Profundidade da Armadilha (metros)	Composição do substrato na base da armadilha	Profundidade na base do recife (metros)	Composição do substrato na base do recife	Atividade	Período de amostragem	Total de dias								
AB_01	16°25' 25.0"	38°59' 09.4"	próximo ao maciço do Recife de Fora	5	Recife de coral em forma de pináculo	12	Cascalho, areia e lages de algas calcárias	ATV 4	01/04/2019 - 16/05/2019	45								
								ATV 5	16/05/2019 - 04/07/2019	49								
								ATV 6/ATV7	04/07/2019 - 27/09/2019	85								
								ATV 9	27/09/2019 - 16/01/2020	111								
								ATV 4	29/03/2019 - 13/05/2019	45								
								ATV 5	13/05/2019 - 30/06/2019	48								
								ATV 6	30/06/2019 - 14/08/2019	45								
								ATV 7	14/08/2019 - 26/09/2019	43								
AB_02	17°55'00.0"	39°08'37.5"	Sebastião Gomes (arco interno de Abrolhos)	2 a 3	Recife de coral em forma de maciço com o topo soterrado	10	Argila	ATV 9	26/09/2019 - 17/01/2020	113								
								ATV 10	17/01/2020 - 11/06/2020	146								
								ATV 11	30/01/2021 - 28/03/2021	57								
								ATV 12	28/03/2021 - 27/04/2021	30								
								ATV 13	27/04/2021 - 27/06/2021	61								
								ATV 14	27/06/2021 - 24/08/2021	58								
								ATV15	21/08/2021 a 24/11/2021	95								
								ATV16	24/11/2021 a 13/01/2022	50								
								ATV17	13/01/2022 a 16/03/2022	62								
								ATV18	15/03/2022 a 30/05/2022	76								
								ATV 4	29/03/2019 - 13/05/2019	45								
								ATV 5	13/05/2019 - 30/06/2019	48								
								ATV 6	30/06/2019 - 14/08/2019	45								
								ATV 7	14/08/2019 - 26/09/2019	43								
								ATV 9	26/09/2019 - 17/01/2020	113								
								ATV 10	17/01/2020 - 11/06/2020	146								
								AB_03	18°02'09.6"	39°00'06.6"	Polpa Verde	6 a 7	Recife de coral em forma de mancha submersas	20	Argila	ATV 11	30/01/2021 - 28/03/2021	57
ATV 12	28/03/2021 - 27/04/2021	30																
ATV 13	27/04/2021 - 27/06/2021	61																
ATV 14	27/06/2021 - 24/08/2021	58																
ATV15	21/08/2021 a 24/11/2021	95																
ATV16	24/11/2021 a 13/01/2022	50																
ATV17	13/01/2022 a 16/03/2022	62																
ATV18	15/03/2022 a 30/05/2022	76																
ATV19	30/05/2022 a 20/08/2022	82																
ATV 4	28/03/2019 - 13/05/2019	46																
ATV 5	13/05/2019 - 01/07/2019	49																
ATV 6	01/07/2019 - 14/08/2019	44																
ATV 7	14/08/2019 - 25/09/2019	42																
ATV 9	25/09/2019 - 17/01/2020	114																
ATV 10	17/01/2020 - 11/06/2020	146																
AB_04	17°57'48.4"	38°40' 11.4"	Chapeirão do Pierre (arco externo de Abrolhos)	5 a 6	Recife de coral em forma de Chapeirão	18	Argila e cascalho									ATV 11	30/01/2021 - 28/03/2021	57
																ATV 12	28/03/2021 - 27/04/2021	30
								ATV 13	27/04/2021 - 27/06/2021	61								
								ATV 14	27/06/2021 - 24/08/2021	58								
								ATV15	21/08/2021 a 24/11/2021	95								
								ATV16	24/11/2021 a 13/01/2022	50								
								ATV17	13/01/2022 a 16/03/2022	62								
								ATV18	15/03/2022 a 30/05/2022	76								
								ATV19	30/05/2022 a 20/08/2022	82								
								ATV 4	28/03/2019 - 14/05/2019	47								
								ATV 5	14/05/2019 - 01/07/2019	48								
								ATV 6	01/07/2019 - 14/08/2019	44								
								ATV 7	14/08/2019 - 25/09/2019	42								
								ATV 9	25/09/2019 - 17/01/2020	114								
								ATV 10	17/01/2020 - 11/06/2020	146								
								AB_05	17°58' 49.7"	38°42' 17.6"	Chapeirão das Sueste (arco externo de Abrolhos)	8 a 10	Recife de coral em forma de pináculo	14	Argila, cascalho e algas	ATV 9	25/09/2019 - 17/01/2020	114
																ATV 10	17/01/2020 - 11/06/2020	146
ATV 11	30/01/2021 - 28/03/2021	57																
ATV 12	28/03/2021 - 27/04/2021	30																
ATV 13	27/04/2021 - 27/06/2021	61																
ATV 14	27/06/2021 - 24/08/2021	58																

ESTAÇÕES DE MONITORAMENTO SEDIMENTAR											
Nome da estação	Lat.	Long.	Localidade	Profundidade da Armadilha (metros)	Composição do substrato na base da armadilha	Profundidade na base do recife (metros)	Composição do substrato na base do recife	Atividade	Período de amostragem	Total de dias	
AB_06	17°53'19.3"	38°41'20.8"	Chapeirão das Manchas (arco externo de Abrolhos)	4 a 5	Recife de coral em forma de Chapeirão	20	Argila e cascalho	ATV15	21/08/2021 a 24/11/2021	95	
								ATV16	24/11/2021 a 13/01/2022	50	
								ATV17	13/01/2022 a 16/03/2022	62	
								ATV18	15/03/2022 a 30/05/2022	76	
								ATV19	30/05/2022 a 20/08/2022	82	
								ATV 4	28/03/2019 - 14/05/2019	47	
								ATV 5	14/05/2019 - 02/07/2019	49	
								ATV 6	02/07/2019 - 14/08/2019	43	
								ATV 7	14/08/2019 - 25/09/2019	42	
								ATV 9	25/09/2019 - 18/01/2020	115	
								ATV 10	17/01/2020 - 11/06/2020	146	
								ATV 11	30/01/2021 - 28/03/2021	57	
AB_06a	17°29'39.12"	39°1'59.4"	Recife do Timbebas (setor norte de Abrolhos)	4 a 5	Recife de coral em forma de Chapeirão	8 a 10	Sedimento fino/lama	ATV 12	28/03/2021 - 27/04/2021	30	
								ATV 13	27/04/2021 - 27/06/2021	61	
								ATV 14	27/06/2021 - 24/08/2021	58	
								ATV18	16/03/2022 a 30/05/2022	76	
								ATV16	24/11/2021 a 13/01/2022	50	
								ATV17	13/01/2022 a 16/03/2022	62	
								ATV18	15/03/2022 a 30/05/2022	76	
								Desmobilização de Abrolhos			
RE-01	18°41'02.4	39°22'44.2	Recife Esquecidos	15	Areia fina	15	Arenoso e com cascalhos	ATV20 Instalação	04/09/2022		
								Primeira coleta	04/09/2022 a 20/11/2022	76	
								ATV22	20/11/2022 a 12/01/2023	53	
								ATV23	12/01/2023 a 19/04/2023	97	
								ATV24	19/04/2023 a 11/07/2023	83	
								ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023	87	
RE-02	18°41'02.4	39°22'44.2	Recife Esquecidos	30	Banco de rodolito com areia grossa cascalhada	30	Arenoso e com cascalhos	ATV20 Instalação	04/09/2022		
								Primeira coleta	04/09/2022 a 20/11/2022	76	
								ATV22	20/11/2022 a 12/01/2023	53	
								ATV23	12/01/2023 a 19/04/2023	97	
								ATV24	19/04/2023 a 11/07/2023	83	
								ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023	87	
ACA-01	19° 58,095'	40° 06,680	APA Costa das Algas	15	Areia e uma laje de arenito por baixo	15	Arenoso e lamoso	ATV21	20/11/2022		
								Instalação			
								ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023	87	
ACA-02	19° 57,463	40° 03,075'	APA Costa das Algas	30	Banco de rodolitos com areia	30	Arenoso e lamoso	ATV21	20/11/2022		
								Instalação			
								Primeira coleta	20/11/2022 a 12/01/2023	53	
								ATV23	12/01/2023 a 19/04/2023	97	
								ATV24	19/04/2023 a 11/07/2023	83	
								ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023	87	

2.2 ANÁLISES AMBIENTAIS

2.2.1 Dados locais complementares

Durante as coletas/trocas das garrafas contendo sedimentos, foram realizadas análises de acompanhamento das condições da água do mar quando foram medidos os seguintes parâmetros: temperatura da superfície do mar (TSM) e condutividade a partir de uma sonda multiparâmetros YSI, pH a partir de um phmetro de campo, profundidade secchi a partir de disco de secchi, MPS a partir de coleta de 20 L de água do mar e posterior medida em laboratório e radiometria a partir de um radiômetro portátil visando obter as características espectrais da reflectância da radiação solar na superfície do mar.

2.2.2 Emprego de traçadores para proveniência mineral (isótopos radiogênicos de Sr e Nd): interpretações e contexto geológico

A metodologia central proposta por este trabalho é baseada na assinatura geoquímica dos sedimentos coletados a partir da coluna d'água, sob o ponto de vista da geologia isotópica. O emprego desta técnica foi motivado pelas muitas incertezas inicialmente levantadas com o uso do sensoriamento remoto e levantamentos de reconhecimento aéreo para a região sobre o alcance geográfico máximo das plumas sedimentares que fluem da foz do Rio Doce após o rompimento da barragem de Fundão-MG. Considerando a importância ecológica de Abrolhos como o recife de corais de maior diversidade do Atlântico Sul, uma resposta assertiva sobre a presença ou ausência de traços de rejeitos de minério naquela localidade tornou-se de grande importância. Outro fato a ser considerado é que a região de Abrolhos, principalmente a região que abriga o arco interno, apresenta naturalmente um elevado padrão de turbidez, o que dificultaria uma interpretação baseada em imagens ou fotografias aéreas.

A técnica empregada aqui é baseada em isótopos radiogênicos, e foi utilizada com sucesso em várias situações quando objetivou-se investigar uma proveniência mineral. Alguns casos na literatura que exemplificam o sucesso do emprego desta técnica foram: (a) a identificação da proveniência das poeiras minerais detectadas nos testemunhos de gelo da Antártica (Vostok e Dome-C) datadas do Último Máximo Glacial como originárias predominantemente do semideserto da Patagônia (Basile *et al.*, 1997; Smith *et al.*, 2003); (b) a origem saariana das poeiras minerais que cruzam o Oceano Atlântico e aportam sobre a Bacia Amazônica (Abouchami *et al.*, 2013); a idade de abertura do Oceano Atlântico e o estabelecimento da AMOC ("Atlantic Meridional Overturning Circulation") a partir de processos erosivos marginais no Atlântico (Batenburg *et al.*, 2018). A técnica dos isótopos radiogênicos apresenta uma vantagem sobre o uso de metais, Terras Raras ou radionuclídeos das séries naturais do U e do Th, visto que permite identificar padrões de mistura entre sedimentos de fontes variadas através de um modelo que considera as razões isotópicas e as concentrações de Sr e Nd das fontes envolvidas.

De um modo geral, os minerais e as rochas tendem a ter razões distintas dos isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, de acordo com a derivação geológica. Estas razões isotópicas estão menos sujeitas a ação dos intemperismos físico e químico ao longo do tempo do que os elementos químicos tipicamente terrígenos tais como o Fe, Ti, Ca, Rb, Al entre outros. No estudo hidrológico, as diferenças

na composição isotópica do Sr e Nd do 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 (Walter *et al.*, 2000; Goldstein, Jacobsen, 1988). A assinatura dos isótopos radiogênicos $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ é uma técnica muito qualificada para se identificar a proveniência continental de sedimentos, uma vez que podem apresentar valores típicos para domínios geológicos específicos (Lee *et al.*, 2010), por exemplo, a composição dos isótopos radiogênicos de Sr e Nd da crosta 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).

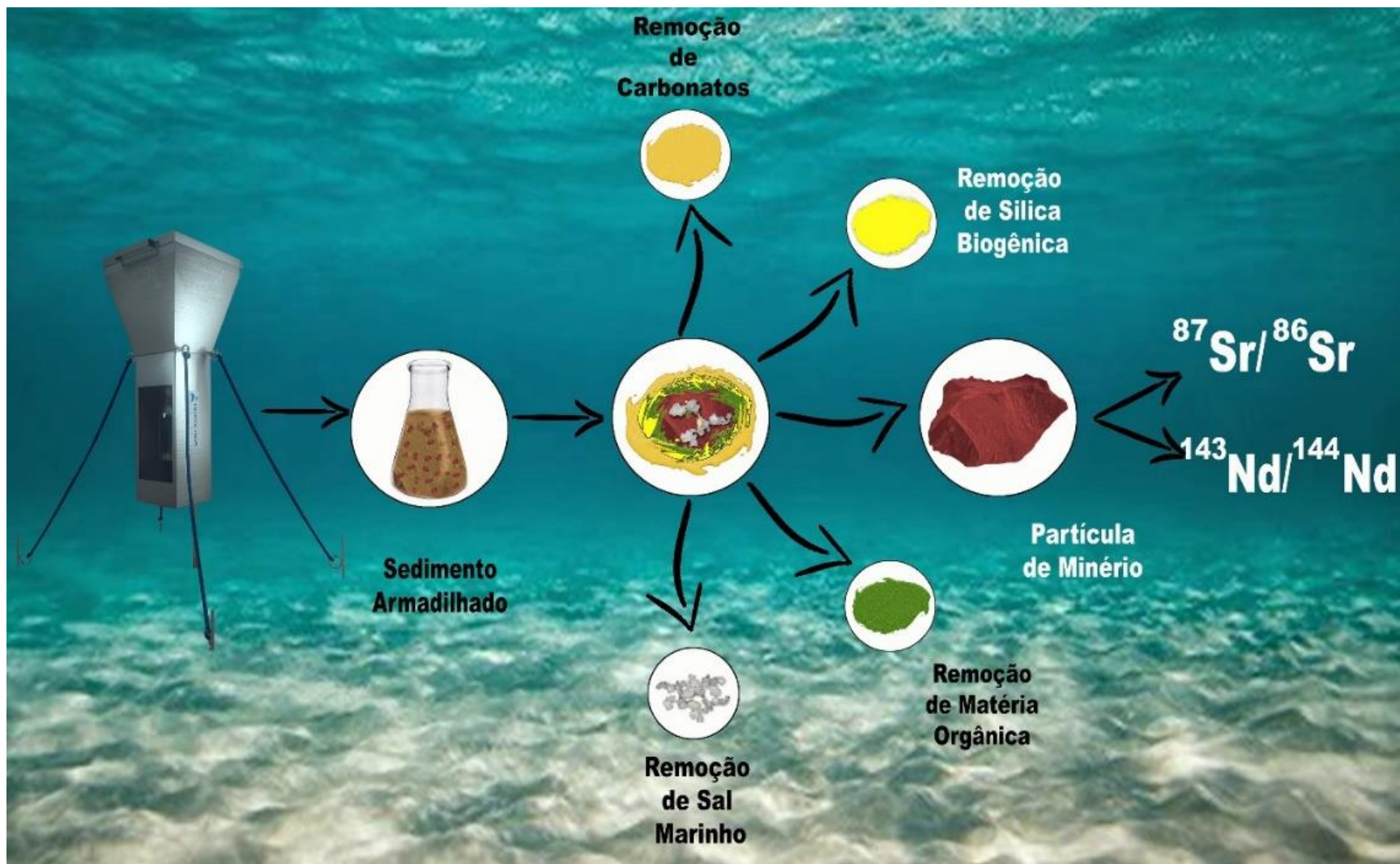
No caso específico de Abrolhos, para efeitos de comparação com os dados das armadilhas instaladas naquela localidade, análises de isótopos radiogênicos foram aplicadas a um testemunho sedimentar coletado em Abrolhos em seções que datam de 3000 anos AP, ou seja, que retratam uma condição pristina do arquipélago dos Abrolhos. O testemunho pertence ao acervo da UFF/Geoquímica (responsável: Profa. Katia Barbosa) e foi datado por ^{14}C . Neste trabalho, os resultados das razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ versus $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ quando apresentados em um plano cartesiano são usados para definir domínios geológicos e localidades com assinaturas radiogênicas já definidas na literatura. A inserção de um determinado resultado isotópico dos sedimentos armadilhados em um domínio no plano definido pelas variáveis $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ sugere a origem do sedimento.

As comparações entre as razões isotópicas $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ e $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ para Abrolhos e qualquer outra fonte potencial é realizada apenas sobre as frações minerais. Desta forma, o sedimento *in natura* coletado em Abrolhos é submetido a remoção de sal marinho, matéria orgânica, sílica biogênica e carbonados para finalmente o resíduo litológico ser levado a espectrometria de massa. Os resultados oriundos dessas etapas do processamento são finalmente comparados com o banco de dados de referência regional e os sedimentos de foz de rios analisadas neste projeto. A Figura 9 e a Figura 10 ilustram o processo ambiental e laboratorial, respectivamente.

Figura 9- Ilustração da aglutinação sequencial em partículas de minério na água do ar entre a foz do Rio Doce e Abrolhos.



Figura 10- Processamento dos sedimentos coletados em Abrolhos visando análises de isótopos radiogênicos na fração litogênica



Para as comparações entre os dados isotópicos obtidos pelos sedimentos armadilhados em Abrolhos e as compilações de dados da literatura e análises de sedimentos fluviais (Rio Doce e outros da costa brasileira) foram levantados os seguintes bancos de dados da literatura:

- Basaltos que compreendem o substrato vulcânico da plataforma de Abrolhos (Fodor et al. 1989);
- Sedimentos lamosos avermelhados e ricos em ferro coletados desde a Barragem de Santarém até Barra Longa, ao longo dos rios Gualaxo do Norte e Carmo, afluentes do Rio Doce que primeiramente receberam os rejeitos de mineração provenientes da barragem de Fundão (Valeriano et al. 2019);
- Substrato rochoso da bacia hidrográfica do Rio Doce;
- Complexos granito-gnáissicos arqueano-paleoproterozoicos do cráton do São Francisco (Teixeira et al., 1996), do Bloco Guanhães (Martins et al., 2004) e da suíte Borrachudos (Dussin, 1994);
- Granitos (pré, sin e pós-colisionais) da Faixa Orogênica Araçuaí (Tedeschi et al., 2016; Gonçalves et al., 2016; Novo et al., 2010; Martins et al., 2004; Nalini et al., 2000; Martins et al., 2004; De Campos et al., 2016).
- Dados gerados pelo projeto:
- Sedimentos de leito e margem coletados na foz do Rio Doce em 2014 e no final de 2015;
- Sedimentos de leito e margem coletados na foz dos principais rios do Espírito Santo e Bahia em 2019: rios São Mateus, Mucuri, Caravelas e Jequitinhonha;
- Sedimentos obtidos a partir de estratificações de um testemunho de sondagem datado do médio Holoceno para Abrolhos (Ab05/1, Almeida 2013);
- Material Particulado em Suspensão (MPS) coletados em Abrolhos (próximos a Coroa Vermelha) antes de 2015;
- Sedimentos em suspensão adquiridos a partir de armadilhas coletadas em missões pretéritas, ou seja, no inverno de 2016, para as localidades Guarita, Sueste e Chapeirão do Pierre no arquipélago dos Abrolhos.
- Sedimentos em suspensão adquiridos a partir de armadilhas coletadas em missões entre março de 2019 e junho de 2021 nas localidades de Porto Seguro, Sebastião Gomes, Popa Verde, Chapeirão do Pierre, Chapeirão do Sueste, Chapeirão das Manchas e Recife de Timbebas.

O sistema isotópico do Sm-Nd é baseado no decaimento do isótopo radioativo ^{147}Sm para o isótopo radiogênico ^{143}Nd a uma taxa constante 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 composição isotópica do Neodímio, mais ou menos radiogênica, refletindo a origem da rocha (manto *versus* crosta terrestre, respectivamente) 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 convencionado apresentar os dados utilizando uma notação (ϵNd) que indica a diferenciação da amostra de um modelo de reservatório mantélico comum a todo planeta Terra, chamado CHUR (meteoritos condríticos; De Paolo & Wasserburg, 1976). A equação para tanto é apresentada a seguir:

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

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 .

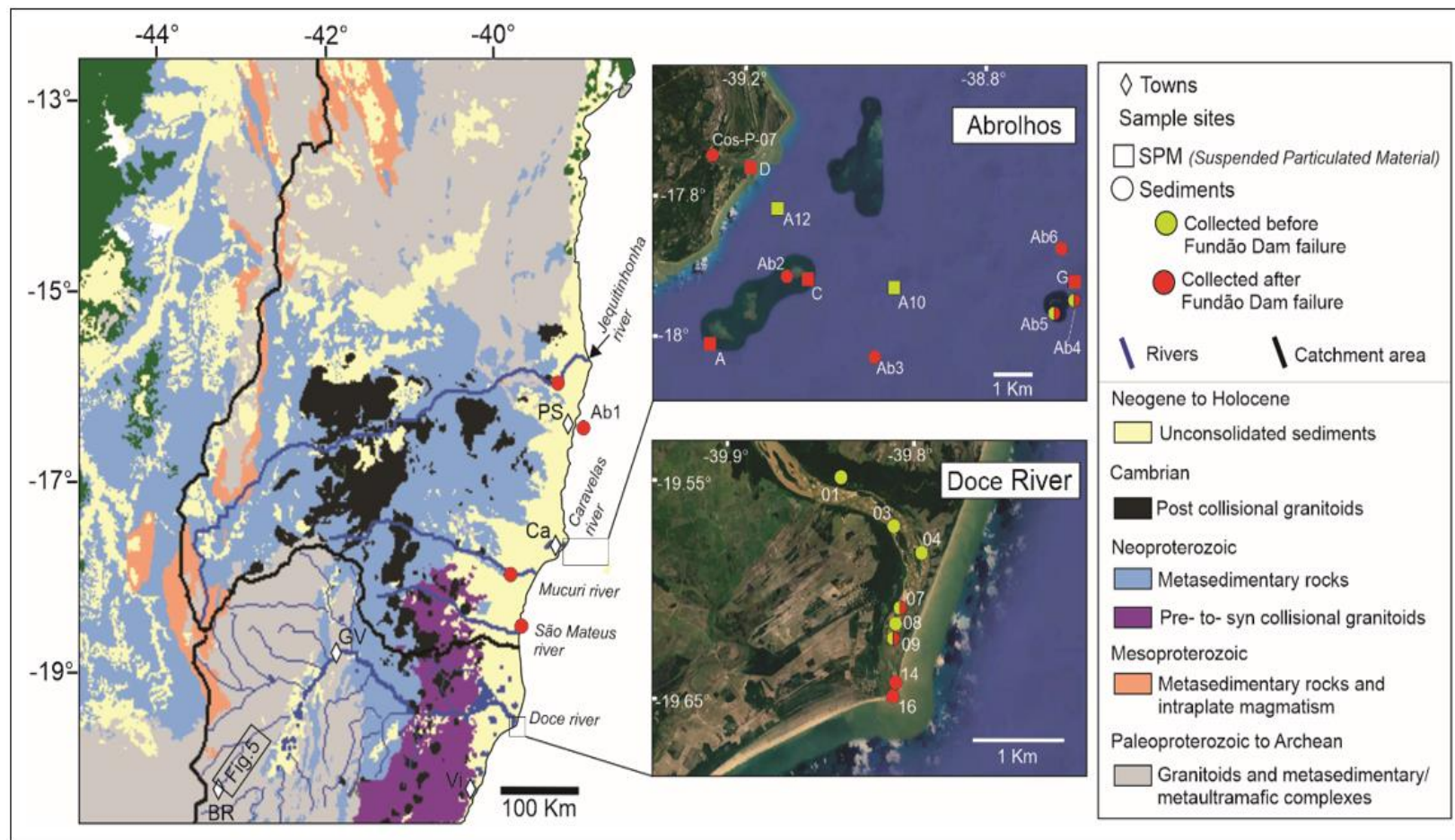
O fracionamento entre os isótopos destes sistemas ocorre primordialmente durante a diferenciação da crosta a partir do manto. As rochas cálcicas e ferro-magnesianas do manto tendem a concentrar o Sm e o Sr durante a diferenciação (fusão parcial), enquanto o Nd e o Rb se concentram nas rochas mais silicosas e potássicas da crosta. 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 dos minerais. Durante o intemperismo, os elementos terras-raras e o rubídio tendem a ser adsorvidos e também ocupam espaços nas estruturas dos argilominerais. 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.

A partir do diagrama ϵNd versus $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, podemos observar diferenciações entre campos dentro da própria crosta continental. Como exemplo, os granitoides de idade neoproterozoica (1000 a 541 Ma) a ordoviciana (até ca. 480 Ma) possuem ϵNd menos negativo e valores de $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ menores do que as rochas de idade Paleoproterozoicas e Arqueanas (> 1600 Ma). Nesse sentido, estes reservatórios crustais caracterizam grupos geoquímicos nos quais os sedimentos podem ser diretamente derivados. Assim, as razões isotópicas de rochas sedimentares se complementam às razões elementares por indicar as origens e contextos geotectônicos das rochas fontes. Tomemos como exemplo dois basaltos de diferentes idades e origens. Embora possam ter razões elementares semelhantes, como exemplo de Th/Sc a 0,2, o primeiro se encontra no grupo de basaltos de Abrolhos com ϵNd positivo a levemente

negativo e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ baixo, em relação a um basalto de idade arqueana, cujo ϵNd é altamente negativo e o $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ tende a ser mais alto. Conseguimos defini-los por suas características isotópicas, logo podemos associá-los aos sedimentos derivados destas rochas (Figura 11).

Figura 11- Mapa geológico da região costeira adjacente a plataforma continental onde se localiza a região de Abrolhos. As imagens de satélite (Google Earth) mostram a posição das amostras coletadas antes e no ano seguinte ao desastre de Fundão-MG (Souza et al., 2003; Pinto & Silva, 2014; Vieira et al., 2018).



As rochas arqueanas a paleoproterozoicas são caracterizadas pela presença de complexos granito-gnáissicos associados a rochas sedimentares e vulcânicas metamorfasadas, rochas graníticas mais jovens (Marshak *et al.* 1992). Estas unidades foram metamorfasadas e deformadas durante o último evento orogênico do território brasileiro durante o Neoproterozoico, chamado de evento Brasileiro (Machado *et al.* 1992), relacionado à aglutinação de antigos continentes formando o supercontinente Gondwana. As áreas representadas pelos complexos Guanhães e Mantiqueira (Noce *et al.* 2007), estão localizadas na porção a montante da confluência que dá origem ao Rio Doce, na altura de Barra Nova, e se estende até o seu alto curso na região de Governador Valadares. Também se encontra em uma extensa porção da costa da Bahia a norte do rio Jequitinhonha, onde afloram as rochas da faixa Itabuna-Salvador-Curaçá (Oliveira *et al.* 2004). Ainda que a litologia seja muito variada, ela tipicamente apresenta épsilon de Nd muito negativo entre -25 e -40 (razão $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ entre 0,5107 e 0,5115) (Noce *et al.* 2000; Martins, 2000). A razão de isótopos de Sr, no entanto, apresenta grande variação (razão $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ entre 0,71 e 0,80), possivelmente pela diversidade litológica e pelos processos de fusão da crosta.

Do início do Neoproterozoico até o período Ordoviciano, os eventos tectônicos do Brasileiro geraram expressivas formações de rochas ígneas. As formações de rochas ígneas ocorrem antes, durante e após o evento colisional. São chamadas, portanto, de rochas pré-, sin- e pós- colisionais. As rochas pré- a sin- colisionais possuem composições básicas, intermediárias e ácidas de acordo com a proporção de sílica, enquanto as rochas sin-colisionais são mais ácidas, e as pós- colisionais tendem a características bimodais com ocorrência de rochas básicas e ácidas. As razões isotópicas medidas em rochas desses diferentes momentos, no entanto, são muito semelhantes. Caracteristicamente, apontam para épsilon de Nd bem menos negativo do que o observado em rochas ígneas mais antigas (entre -5,2 e -20,2) e razões $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ bastante variáveis (entre 0,70597 e 0,744201) (Gonçalves *et al.* 2015; Martins *et al.* 2004; Campos *et al.* 2004; Nalini *et al.* 2000, Tedeschi *et al.* 2015). Dizemos que esta característica isotópica é mais juvenil do que aquela observada nas rochas paleoproterozoicas e arqueanas e, portanto, pode ser usado com um marcador de proveniência.

Rochas metassedimentares (sedimentares metamorfasadas, ou seja, transformadas em xistos e gnaisses) ocorrem no médio curso do rio Doce e são mais extensas na bacia hidrográfica dos rios Mucuri e Jequitinhonha. Rochas metassedimentares são produtos de misturas de antigos processos intempéricos e retrabalhadas por processos metamórficos. Suas características geoquímicas são, portanto, semelhantes às suas rochas de origem. No entanto, na literatura há grande escassez de dados isotópicos que confirmem tais características. As rochas metassedimentares do Mesoproterozoico (1700 a 1000 Ma) são formadas por rochas siliciclásticas (arenitos e conglomerados) do Supergrupo Espinhaço depositadas em um sistema de bacias continentais (Dussin *et al.* 1995). Estas rochas afloram, em especial, na serra homônima que representa o principal divisor na nascente dos rios analisados. Rochas vulcânicas ácidas estão associados a esta antiga sedimentação (Fernandes *et al.* 1994). Ocorrências de rochas metassedimentares durante o Neoproterozoico (Grupos Macaúbas e Jequitinhonha) estão associadas à formação de bacias sedimentares continentais no Toniano (1000 a 720 Ma) que evoluíram para bacias de plataforma continental (margem passiva) até o

período ediacarano (Martins et al. 2008; Castro et al. 2019). Estas rochas são caracterizadas por camadas carbonáticas até evoluírem para deposições predominantemente siliciclásticas argilosas de ambiente marinho. Após a quebra de Pangea, durante a formação do oceano Atlântico, basaltos de ilhas vulcânicas podem ser encontrados na plataforma continental brasileira, como é o caso das ilhas de Abrolhos (Fodor *et al.* 1988). Estas rochas, derivadas de fusões do manto, possuem ϵ_{Nd} fracamente positivas (entre +4 e 0) e razão $^{87}Sr/^{86}Sr$ pouco radiogênicas (entre 0,7037 e 0,7073).

Sedimentos inconsolidados (raramente litificados) depositados durante o período Neógeno (Formação Barreiras) até o Recente são expressivos próximos ao litoral e na foz dos rios estudados. Não há, no entanto, estudos isotópicos nesses depósitos, como por exemplo, se suas áreas fontes tiveram mudanças do período Neógeno ao Recente. Como já explicitado, as rochas fontes de sedimentos para a plataforma de Abrolhos podem ser divididas em três grupos geoquímicos: basaltos de ilha oceânica de Abrolhos (Fodor *et al.* 1988); rochas ígneas Neoproterozoicas a Cambrianas relacionadas à formação do orógeno Araçuai (Gonçalves *et al.* 2015; Martins *et al.* 2004; Campos *et al.* 2004; Nalini *et al.* 2000, Tedeschi *et al.* 2015); e rochas Paleoproterozoicas do Cinturão Mineiro (Noce *et al.* 2000) e do Complexo Guanhães (Martins, 2000).

A análise de proveniência é um conjunto de métodos que busca correlacionar as características (mineralógicas, químicas e isotópicas) dos sedimentos já depositados às características de uma ou mais áreas fonte representadas pela composição de suas rochas aflorantes. Em sedimentos arenosos, os métodos de análise de proveniência tendem a ser baseados na contagem e associação tanto dos minerais formadores de rochas (comuns a vários tipos de rochas) quanto de minerais acessórios (restritos a tipos específicos de rochas). Em sedimentos de granulometria mais fina, como os siltes e as argilas, em que não podemos separar e contar os diversos grãos, é comum se determinar sua mineralogia por meio de técnicas de Difractometria de Raios-X, as associações dos diversos tipos de minerais não são diretamente representativas de uma rocha fonte, uma vez que os argilominerais estão relacionados às condições climáticas nos quais foram formados. Nesse caso, os métodos de proveniência são baseados em geoquímica, tanto na concentração de óxidos de elementos maiores (sílica, ferro e álcalis, por exemplo), como em razões de elementos traços (incluindo as terras-raras), e em isótopos de Sm-Nd e Sr.

Quando lidamos com geoquímica elementar em amostras-totais, devemos estar atentos ao significado de todas as análises elementares e como elas podem ser enviesadas pelos processos naturais da sedimentação. No caso dos óxidos de elementos maiores, existe uma lixiviação preferencial dos álcalis (Sódio e Potássio) durante a formação de argilominerais e o consequente enriquecimento residual em Ferro e Alumínio. Por conta disso, a composição desses elementos na amostra de sedimentos não pode ser utilizada diretamente para proveniência, no entanto, nos dá uma informação muito importante sobre a evolução do intemperismo na área fonte. Nesse sentido, para indicar características de rochas-fonte com maior efetividade, são utilizados elementos cujos íons possuem alta carga e pequeno raio, tais como: zircônio, háfnio, titânio, nióbio, escândio, tório, ítrio e os elementos terras-raras (com exceção do cério e do európio). Esses elementos, em geral muito insolúveis, tendem a não se fracionar entre si

durante o intemperismo, nem em reações com água durante o transporte e deposição, ou seja, as razões entre esses elementos refletem aquelas de suas rochas-fonte. O mesmo pensamento vale para geoquímica isotópica de Sm-Nd, que será desenvolvido no próximo tópico. Alguns elementos traços como vanádio, cobalto, molibdênio e urânio sofrem alterações em sua concentração por conta de condições de oxirredução no local de deposição. Além disso, mamíferos marinhos, como as baleias Jubartes, se movimentam ao longo da costa até Abrolhos e podem se contaminar no trajeto ao passarem próximos as plumas de sedimento. O monitoramento da extensão das plumas de sedimento através do novo algoritmo pode ser uma ferramenta de grande valor para avaliar possíveis impactos e para determinar um plano de manejo costeiro para a região.

2.2.3 Modelo de mistura sedimentar a partir dos isótopos radiogênicos de Sr e Nd

Quando os sedimentos possuem valores isotópicos intermediários entre dois grupos isotópicos, são feitos testes para verificar a possibilidade de eles representarem misturas entre os grupos. A equação utilizada para esta análise é apresentada abaixo (Faure, 1978):

$$R_M^x = \frac{R_A^x X_A f + R_B^x X_B f}{X_A f + X_B (1-f)} \quad \text{Eq.2}$$

Na equação, R é a razões isotópica do elemento x, com concentração X, dos componentes (*endmembers*) 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, $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ e $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$, 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 ρ , razão isotópica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$; 1 e 2, componentes da mistura isotópica (*endmembers*); M, amostra em análise (mistura entre fontes); K, razão entre a concentração 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 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.

Como áreas fontes de sedimentos no contexto estudado em Abrolhos são consideradas as bacias hidrográficas dos rios que deságuam próximos a essa região da plataforma continental. Sendo assim, as bacias do rio Doce e dos rios entre o norte do estado do Espírito Santo e o Sul/sudeste da Bahia (rios São Mateus, Mucuri, Alcobaça, Caravelas, Jucuruçu, Jequitinhonha e Pardo) podem ser considerados como principais contribuintes locais de sedimentos para a área da plataforma. Essas bacias hidrográficas são limitadas a oeste pela Serra do Espinhaço, que se estende de Minas Gerais até a porção central da Bahia e é o principal divisor com a bacia do Rio São Francisco a oeste. Os tipos

de rochas (litologia) que compõem o substrato destas áreas fontes foram agrupados de acordo com a idade de sua formação e suas características isotópicas. Assim, essas fontes podem ser divididas em três grupos geoquímicos: basaltos de ilha oceânica de Abrolhos; rochas ígneas neoproterozoicas (1000 a 1600 Ma) a ordovicianas (541 a 485 Ma) relacionadas à formação do orógeno Araçuaí; e rochas paleoproterozoicas a arqueanas (> 1700 Ma) do Cinturão Mineiro e do Complexo Guanhões.

2.3 METODOLOGIAS LABORATORIAIS

2.3.1 Processamento físico das amostras e dessalinização

Ao chegarem no LARAMG, as amostras *in natura* são novamente identificadas e acondicionadas de maneira apropriada para garantir a integridade do material. A primeira análise consiste na observação visual, onde são avaliadas a coloração dos sedimentos e a textura. Qualquer desvio notável em relação aos padrões conhecidos é notificado imediatamente ao coordenador do projeto.

O procedimento de preparo das amostras inicia-se com a pesagem completa da garrafa, englobando a própria garrafa, os sedimentos e a água. e deve ser pesado todo o conteúdo (garrafa + sedimento + água). Após todo o processo de remoção do conteúdo, a garrafa limpa é submetida a nova pesagem. O valor obtido nesta segunda pesagem é subtraído do peso total anterior, resultando no peso considerado exclusivamente para os sedimentos e a água. As amostras de sedimento passam por um processo de dessalinização para remoção de sais solúveis precipitados junto ao sedimento:

- Transferência das amostras (sedimento + água do mar) da garrafa de coleta para um Cone Imhoff (Figura 12) – para realizar a transferência, é necessário homogeneizar a mistura a mistura sedimento + água do mar na garrafa e despejá-la no cone. Caso a garrafa não esteja cheia de água do mar, é preciso adicionar água destilada/deionizada para auxiliar no procedimento. Neste caso, essa água já será considerada como primeira lavagem e não deve ultrapassar 500 mL. Uma vez no cone, o material deve ser homogeneizado com auxílio de um bastão de vidro previamente higienizado e descontaminado. É necessário aguardar 2 horas para a decantação do material sedimentar e, em seguida, remover o sobrenadante. Antes de realizar a remoção do sobrenadante é essencial aferir o volume total e o volume de sedimento presente no cone.

Figura 12- Imagens referentes as principais etapas da dessalinização das amostras. Na sequência apresenta-se o Cone Imhoff utilizado para separação das amostras por decantação; transferência do sobrenadante possibilitado por uma bomba e, a medição da condutividade através do condutivímetro.

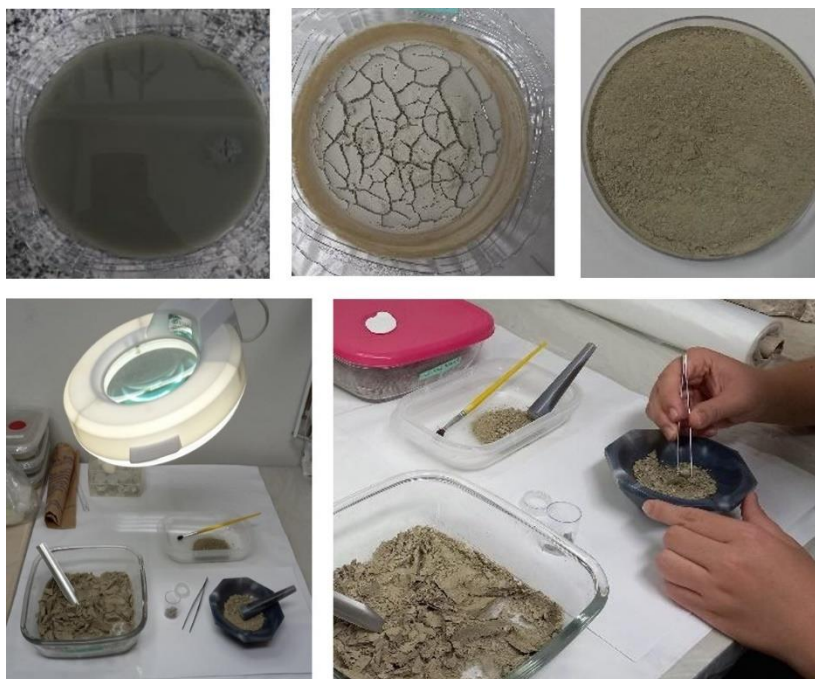


O procedimento de dessalinização é feito por meio de lavagens com água destilada/deionizada; cada lavagem corresponde à adição de 500 mL de água destilada/deionizada; são realizadas lavagens até que a condutividade do sobrenadante seja igual ou maior que $0,20 \text{ mS cm}^{-1}$ (Bainbridge et al., 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 12) e deve estar abaixo de $0,005 \text{ mS}$.

2.3.2 Secagem e pulverização das amostras de sedimento

Após a remoção do sobrenadante a amostra é seca em estufa (Figura 13). Essa metodologia consiste em colocar a amostra em recipiente de vidro previamente higienizado e descontaminado e levada à estufa a $\sim 60^\circ\text{C}$ (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. A desagregação da amostra seca é 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 13).

Figura 13- Principais etapas do processo de secagem da amostra. Na sequência: amostra in natura, amostra seca recém retirada da estufa, amostra pulverizada no gral de ágata e detalhes da bancada de trabalho.



As etapas descritas são utilizadas para as amostras das garrafas coletadas pelo *sediment trap* e o processamento das amostras de foz de rios tem uma peculiaridade diferente que é a adição do processo de peneiramento em tela de 63 mesh com peneiras de teflon.

Após o processamento físico das amostras ser realizados são enviados para os laboratórios parceiros:

- Amostra para Isótopos (~ 2 g), destinada ao LAGIR-Uerj;
- Amostra para ICPOES (~15 g), destinada ao ITOCEANEON-UNISINOS;
- Amostra por FRX (~10 g), destinada ao ITOCEANEON-UNISINOS;
- Amostra para DRX (~10 g), destinada ao laboratório de Difração de Raios- X/UNESP.

2.3.3 Preparo físico-químico das amostras para análise de isótopos

Etapa extração de carbonatos

No processo de preparação das amostras, a primeira etapa consiste em adicionar lentamente 10 mL de HCl 2,5M. A reação ocorre durante 2 horas em temperatura ambiente. Após esse período, realiza-se a centrifugação a 1500 RPM por 15 minutos, seguida da eliminação do sobrenadante. Para completar a etapa, são feitas lavagens com água Milli-Q por centrifugação até atingir pH neutro. O conteúdo resultante é transferido para o Savillex® e seco em chapa quente, mantendo uma temperatura entre 90°C e 95°C.

Na segunda fase, que ocorre em sala limpa, são adicionados 3 mL de Fluoclor (29,5 – 36% de HF + 5 -13,5% de HCl) tridestilado e 0,5 mL de HNO₃ 7,0M. A mistura é aquecida em chapa quente (80-90 °C) por 30 minutos, com a tampa do Savillex® aberta para eliminar água e SiF₄.

Após o tempo de aquecimento, o Savillex® é resfriado, fechado e alocado em chapa quente (120-130 °C) ou bomba em estufa (180-190 °C) por três dias. Em seguida, é permitido esfriar (60 °C), abrir o

frasco e evaporar em chapa quente (80-90 °C) até atingir a secura. Prosseguindo, adiciona-se 1 mL de HNO_3 7 mol/L, evaporando até a secura em chapa quente (80-90 °C) para eliminar o excesso de HF.

Segue-se com a adição de 3 mL de HCl 6 mol/L, aquecendo em chapa quente (120-130 °C) ou bomba em estufa (180-190 °C) por três dias. Após novo resfriamento (60 °C), o frasco é aberto e a amostra é evaporada em chapa quente (80-90 °C) até atingir a secura. Por fim, adiciona-se 1 mL de HCl 2,5 mol/L e reserva-se para a separação dos elementos de interesse geocronológico na coluna primária. A partir desta etapa, as amostras são encaminhadas para a separação química dos elementos de interesse.

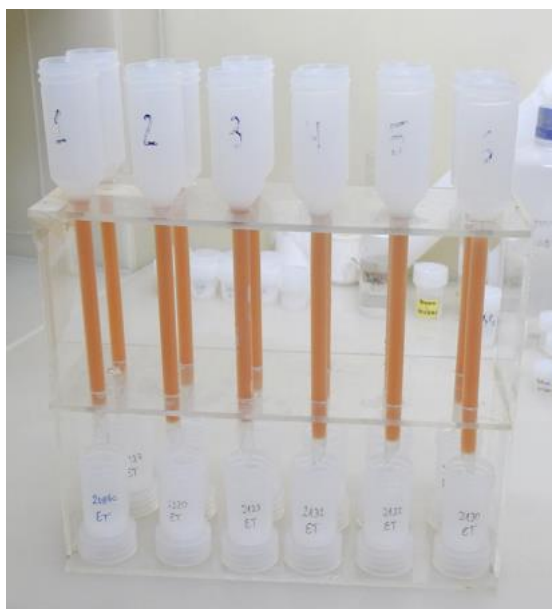
Etapa extração de matéria orgânica

Em seguida a extração de carbonatos no LAGIR as amostras são submetidas a extração de matéria orgânica por aquecimento em mufla. A amostra é colocada na mufla em 550°C, por 6 horas. Após esse período a amostra permanece em 100°C por mais 6 horas e ao finalizar a amostra é colocada em dessecador. A amostra está devidamente preparada para a sequencial análise nas colunas de cromatografia. No LAGIR as amostras são pesadas até formar 2,0 g em *Savillex®* de capacidade de 23 mL. A pesagem é realizada em balança analítica $\pm 0,1$ mg;

2.3.4 Procedimento analítico para análise de isótopos em sedimentos

A partir das amostras já condicionadas em 1,0 mL de HCl 2,5 mol/L. As colunas primárias (Figura 14) passam por sucessivos processos de lavagem- descarte e coleta utilizando HCl 2,5 mol/L e HCl 6,0 mol/L

Figura 14– Colunas primárias coletando frações de ETR em Savillex®.



O procedimento laboratorial para a separação cromatográfica de Neodímio na coluna secundária consiste em sucessivas adições de HCl 0,18 mol/L até a coleta do Neodímio. As amostras são evaporadas em chapa quente (90-95°C) e as frações de Nd e Sm coletadas. A amostra está apta para análise espectrométrica. Em seguida as amostras são depositadas em filamento metálico. A deposição de amostra é realizada em filamentos metálicos de Re (Rênio) e Ta (Tântalo), (H-Cross, EUA)

previamente degaseificados. Para análises de Sr, foram utilizados filamentos de Ta com arranjo simples e a técnica do sanduíche descrita no Triton Hardware Manual (2002). Coloca-se o filamento de Ta arranjo simples no amperímetro (parte traseira). As extremidades são seladas com parafilm® (para evitar perda de amostras pelas laterais). Adiciona-se 1 µl de ativador Ta₂O₅ no centro do filamento com auxílio de uma pipeta até ficar quase seco. Adiciona-se 3 µl de H₃PO₄ 1N, e realiza-se uma varredura de toda amostra no recipiente Savillex® para ser depositado no centro do filamento até secar completamente. Adiciona-se novamente 1 µL de ativador Ta₂O₅ no filamento e elevar a corrente até aproximadamente 2,5 A (levemente rubro) por 5-10 segundos.

Para as análises de Nd, são utilizados filamentos de Re com arranjo duplo. Coloca-se o filamento de Re duplo no amperímetro (parte dianteira). As extremidades são seladas com parafilm® (para evitar perda de amostras pelas laterais). São adicionados 3 µl de H₃PO₄ 1N, e busca-se coletar toda amostra no recipiente Savillex® e deposita-se no centro do filamento até secar completamente. A corrente é elevada cautelosamente até aproximadamente 2,5 A (levemente rubro) por 3 segundos.

As análises espectrométricas são realizadas em um espectrômetro de massa portermo-ionização (TIMS), modelo TRITON multicoletor da ThermoFinnigan® no no Laboratório de Geocronologia e Isótopos Radiogênicos (LAGIR) da Faculdade de Geologia (FGEL) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ) (Figura 15).

Para a análise de Sr submete-se o filamento de evaporação com uma taxa de aquecimento de 380 mA /min. A temperatura é controlada entre 1200 ° C e 1500 ° C). Obtêm-se a média de ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr e o erro padrão absoluto (2s) com 10 blocos (ou 100 ciclos) de medida. Todas as razões isotópicas foram corrigidas para fracionamento de massa assumindo a razão natural ⁸⁸Sr/⁸⁶Sr de 8,375209 (Nier, 1938) e possível interferência isobárica de Rb (⁸⁷Rb/⁸⁵Rb = 0,386, Meija et al. 2015, Bürger et al. 2005).

Para a análise de neodímio submete-se o filamento de ionização e evaporação com uma taxa de aquecimento de 500 e 200 mA /min, respectivamente. O filamento de ionização é aquecido na corrente elétrica fixa de 4500 mA e o filamento de evaporação na corrente inicial 1800 mA (podendo variar de acordo com a amostra até 2300 mA); obtêm-se a média da razão isotópica ¹⁴³Nd/¹⁴⁴Nd e o erro padrão absoluto (2s) com 16 blocos (ou 160 ciclos) de medida. As razões isotópicas são corrigidas para fracionamento de massa usando a razão constante ¹⁴⁶Nd/¹⁴⁴Nd de 0,7219 (Patchett 1989).

A aquisição de dados, as razões ⁸⁵Rb/⁸⁶Sr e ¹⁴⁷Sm/¹⁴⁴Nd são usadas para monitorar a qualidade da separação química e avaliação da interferência isobárica. O branco laboratorial total foram valores abaixo de 200 pg para Nd e 70 pg para Sm e considerados insignificantes para a correção das razões isotópicas. As análises de cada novo lote de amostras, brancos, material de referência (BRP-1, Neto et al 2023) e soluções de referência certificadas (JNdi-1, Tanaka et al. 2000 e NIST SRM 987) são realizadas sob as mesmas condições analíticas para avaliação da reprodutibilidade laboratorial.

Figura 15- Espectrômetro de massas por termo-ionização modelo TRITON multicoletor da ThermoFinnigan®.



2.3.6 Procedimento Analítico para análise de metais por ICP-OES

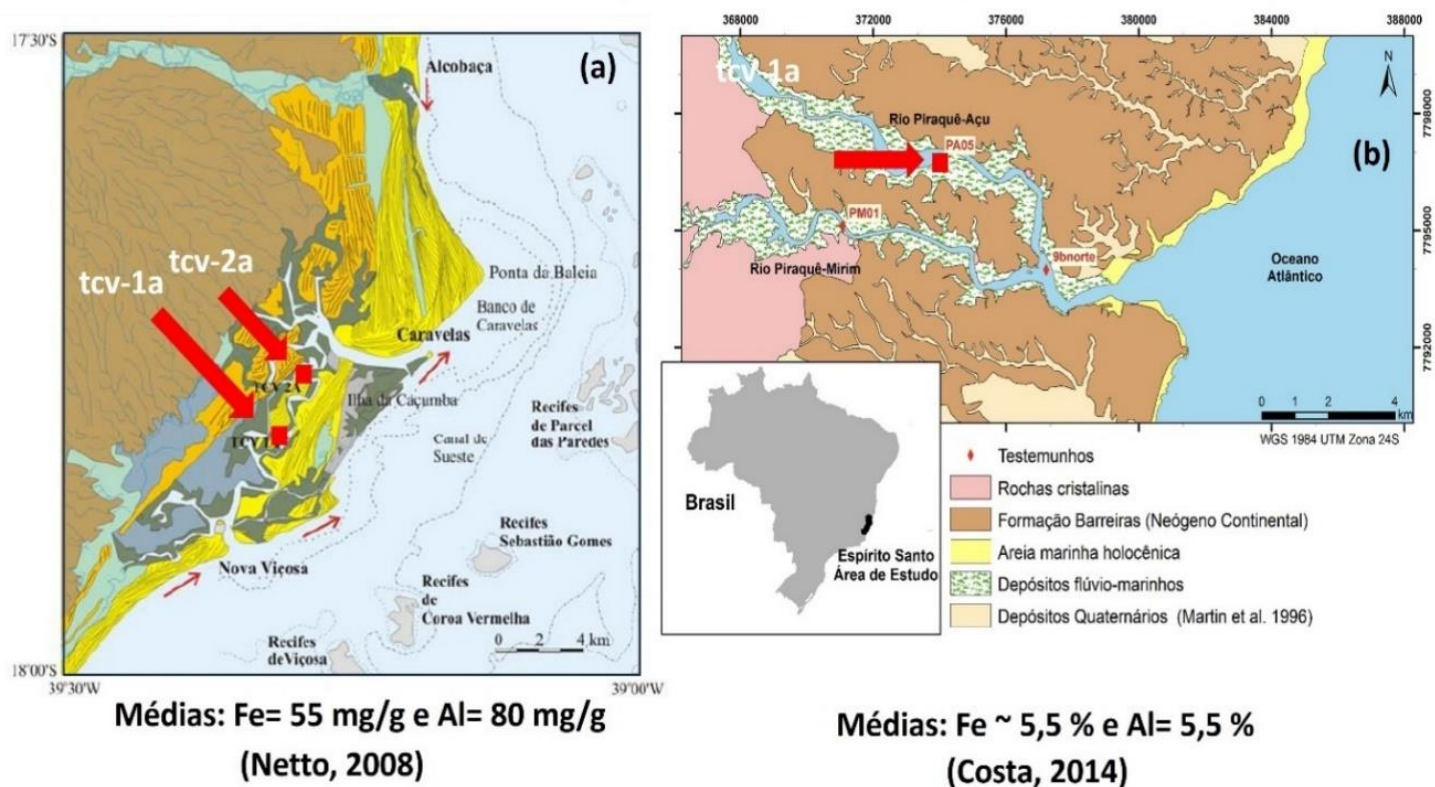
As análises de metais foram realizadas empregando a técnica de ICP-OES. Para esta análise de elementos traços, 250 mg de amostra são digeridas parcialmente com 6 mL de HNO_3 + 1 mL de HCl utilizando-se um forno de micro-ondas Ethos Up da Milestone. O programa de digestão consiste em rampa de 30 minutos e patamar de digestão de 30 minutos a uma temperatura de 230°C . Após a etapa de digestão, as amostras são filtradas e avolumadas com solução de HNO_3 1% até 20mL. As amostras diluídas são analisadas por meio da técnica de Espectrometria de Emissão Óptica com fonte de Plasma Indutivamente Acoplada (ICP-OES, iCAP 7200 da Thermo Fisher Scientific). As interferências isobáricas moleculares e os brancos instrumentais são subtraídos das medidas de intensidades das corridas de branco da solução de HNO_3 %. Os materiais de referência utilizados para o controle de qualidade das amostras são: NIST 1646a. No qual, utilizando-se o mesmo método de preparação realizado nas amostras. Os dados adquiridos em intensidades, foram convertidos para ppm e tratados no *software* Qtegra. O equipamento destinado a análise por ICP-OES é o iCAP 7200 da Thermo Fisher Scientific. Localizado no Instituto Tecnológico de Paleoceanografia e Mudanças Climáticas (itt Oceaneon) da Universidade do Vale do Rio dos Sinos - Unisinos, em São Leopoldo, RS.

Como a questão do impacto do rompimento da barragem de Fundão tem o Fe como o principal elemento alvo do monitoramento, neste trabalho empregamos o parâmetro Enriquecimento em Fe (FE) nas amostras armadilhadas como um “traçador secundário” da presença de sedimentos originários da faz do Rio Doce. Para Abrolhos, empregamos as análises de Fe e Al a partir de em testemunho

sedimentar analisado por Netto, 2008, anterior ao colapso da barragem de Fundão-MG, localizado em Caravelas-BA, Figura 16 a; para o Novo Ciclo, as análises de Fe e Al referem-se a em testemunho sedimentar analisado por Costa, 2014, anterior ao colapso da barragem de Fundão-MG, localizado as margens do Rio Piraque-Açu-ES, Figura 16 b. A razão de Fe/Al de referência para Caravelas foi de 0,69 ao passo que para o Piraque-Açu foi de 1,0.

Figura 16– Localização das amostras de referência para o estudo de Enriquecimento em Fe (ou Fe em excesso). As localidades correspondem a testemunhos sedimentares datados, coletados antes do rompimento de Fundão.

Valores de referência para o cálculo de Fe em excesso



2.3.6.1 Análise da razão da fração solúvel Fe/Mn na água do mar

Este item foi inicialmente testado em 2016 e até 2018 de forma experimental. A equipe técnica de Sedimentação costeira, na ocasião, descartou o uso desta técnica pela grande quantidade de dados não detectáveis para Fe dissolvido e ao fato de vários laboratórios contactados não apresentaram padrões de reprodutibilidade em réplicas para as análises de Fe dissolvido na água do mar. De forma complementar e mais importante, vimos dificuldades em relacionar um dado pontual, temporalmente, com uma análise integradora para sedimentos que opera na escala sazonal. Nosso grupo de trabalho optou então em focar apenas na fração particulada pois permitiria uma comparação direta com os dados provenientes dos sedimentos armadilhados.

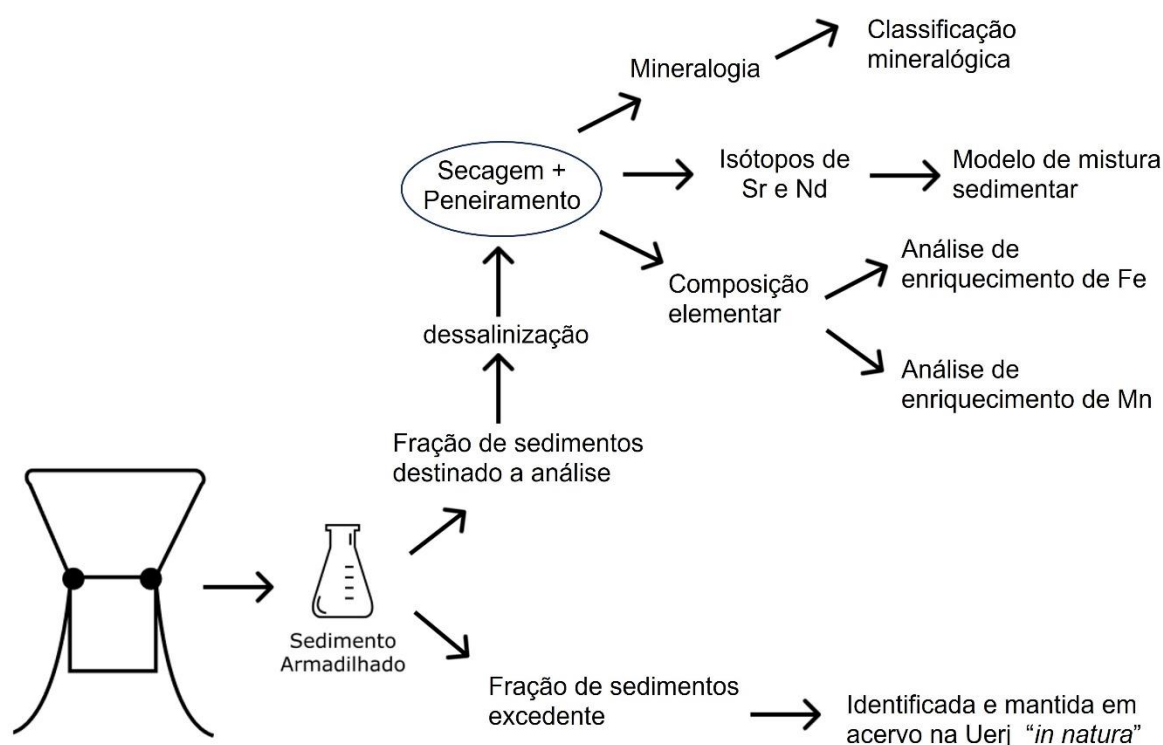
2.3.6.2 Crítica ao método de quantificação de metais

Para o monitoramento, inicialmente os metais foram determinados pela técnica MEV+EDS. Esta técnica avalia a composição elementar em partículas individualmente. Como o monitoramento da sedimentação costeira evoluiu para o monitoramento de metais em sedimentos a partir de amostras integradas no tempo, vimos que esta técnica ficou incompatível com as análises globais dos sedimentos. Assim, para compatibilizar todas as técnicas optamos por ICP-OES e XRF.

2.3.7 Procedimento analítico para análise por difratometria de raios-X (DRX)

Para o DRX, as amostras de sedimentos armadilhadas são pulverizadas em almofariz de ágata até a granulometria passante em malha ASTM 200#, sendo posteriormente conformadas em pastilhas de pó não orientadas. Em seguida, as amostras foram analisadas em difratômetro de raios X da marca PANalytical, modelo Empyrean, com tubo de cobre (W.L. $\text{CuK}\alpha 1 = 1,5405 \text{ \AA}$) sob condições analíticas de 40 kV e 40 mA, entre 3° e 75° de varredura do goniômetro, em modo de leitura contínuo. Os dados obtidos são interpretados com auxílio do software X'Pert Highscore Plus v.3.0, com banco de dados PDF-2 v.2016), com módulo X'Celerator e padrões analíticos Flat e Spinner no Laboratório de Difratometria de Raios-X na UNESP. A análise quantitativa é realizada pelo método de Rietveld, até a obtenção de concordância em 6 ciclos de iteração, com GOF menor que 3 e minimização do resíduo. Em síntese o resumo analítico do projeto Sedimentação Costeira (Figura 17)

Figura 17– Resumo do roteiro analítico entre a chegada das amostras do PMBA/FEST no laboratório da Uerj, o pré-processamento e o envio para as análises.



2.4 CARACTERIZAÇÃO METEOCEANOGRÁFICA

O objetivo das análises meteoceanográficas é determinar as condições meteoceanográficas ocorridas durante o período de campanhas de coleta de sedimentos em Recife dos Esquecidos e APA Costa das Almas (04/09/2022 a 06/10/2023), de forma a contribuir com a compreensão da dinâmica sedimentar no que se refere a condições de tempo meteorológico. Para isso, foram analisadas variáveis meteorológicas (vento, temperatura, pressão média ao nível do mar e precipitação) e variáveis oceanográficas de superfície (temperatura de superfície do mar, tensão de cisalhamento do vento, salinidade de superfície do mar).

2.4.1 Base de dados meteoceanográficos

Para a caracterização meteoceanográfica, foram 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 em média de conjunto (*ensemble*) de 10 membros. Possui resolução espacial de 0,25° para variáveis atmosféricas, e 0,5° 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 (°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 foram utilizados 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° em latitude, e 1,0° 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/>.

Para a análise de precipitação relativa, foram utilizados dados pentadais de precipitação (mm/pêntada) do conjunto de dados *Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations* (CHIRPS), que une dados de estações pluviométricas de superfície com informações satelitais no canal infravermelho. Os dados de precipitação apresentam resolução espacial de 0,05°, sendo ideal para o estudo em escala de bacias. Este conjunto de dados pode ser encontrado gratuitamente em <https://data.chc.ucsb.edu/products/CHIRPS-2.0/>. As análises foram realizadas utilizando os softwares R, *Climate Data Operators* (CDO) e Microsoft Excel.

2.4.2 Identificação de frentes frias

Para identificar a ocorrência de frentes frias, foi 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 das ATVs (04/09/2022 a 06/10/2023). A frente fria é identificada se são registrados, de forma simultânea: 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. 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, nas latitudes 17,5°S (ao se tratar de Abrolhos e Recife Esquecidos) e latitude 20°S (ao se tratar de APA Costa das Algas) e longitude 40°W. Posteriormente, a quantidade total de frentes frias foi contabilizada por ATV. Também foi contabilizada a quantidade de dias com vento de quadrante sul, sem excluir a ocorrência de frentes. Tanto a quantidade de frentes frias quanto de dias com vento de quadrante sul foi comparada ao número total de dias por campanha, de forma a se obter a frequência relativa de ambos os eventos.

3 RESULTADOS

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 – outubro/2023) na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos

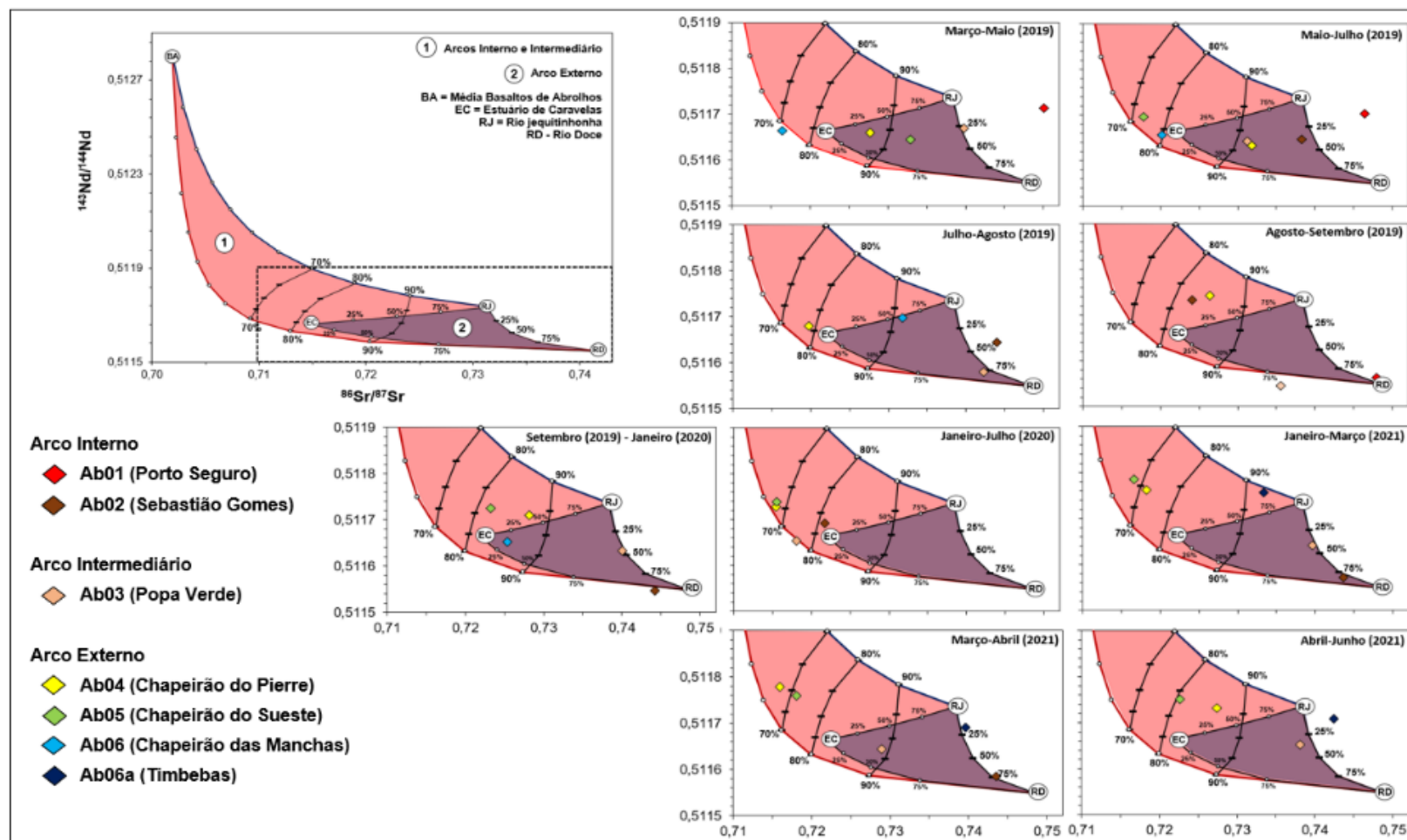
gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest 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 VARIABILIDADE DA RAZÃO ISOTÓPICA SR/ND EM SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA

3.1.1 **FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022**

Figura 18- Modelos de mistura sedimentar ternários, que adotam como áreas fonte os rios Doce e Jequitinhonha. Para as amostras dos arcos Interno e Intermediário de Abrolhos, considerou-se como terceira área fonte os rios que alimentam o Estuário de Caravelas, enquanto para as amostras do Arco externo, utilizou-se os Basaltos de Abrolhos como terceira área fonte potencial de sedimentos.



A fração terrígena dos sedimentos marinhos coletados em Abrolhos corresponde a uma média dos variados terrenos que compõem as áreas continentais adjacentes a plataforma continental e que chegam aos oceanos carregados por sistemas fluviais. A assinatura isotópica dos sedimentos dos principais rios que deságuam próximo a região de Abrolhos ocorre parcialmente em valores intermediários em relação a grupos geoquímicos considerados como áreas fontes continentais. Faz-se necessária então elaborar uma hipótese de mistura que contemple a assinatura isotópica dos sedimentos de Abrolhos, cuja tendência de alinhamento observada indica uma mistura relacionada, principalmente, com a chegada de plumas de sedimentos do rio Doce. Sedimentos dos rios Jequitinhonha e Mucuri, com razões maiores de $^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$, também podem ser responsáveis. Deve-se considerar, então, que a assinatura isotópica dos sedimentos de Abrolhos representará uma mistura entre as assinaturas de diversas plumas fluviais que chegam na região com fontes locais, caracterizadas pelos basaltos de Abrolhos.

Amostras coletadas em Abrolhos foram setorizadas em amostras do Arco Interno, amostras do Arco Intermediário e amostras do Arco Externo. Amostras do Arco Interno correspondem aquelas coletadas nas localidades de Porto Seguro (Ab01) e Sebastião Gomes (Ab02). Amostras do Arco Intermediário foram coletadas na localidade de Popa Verde (Ab03) e, amostras do Arco Externo foram coletadas nas localidades dos chapeirões do Pierre (Ab04), Sueste (Ab05) e Manchas (Ab06), bem como na região de Timbebas (Ab06a) (Tabela 6). Para a modelagem isotópica, consideram-se como fontes principais para as amostras dos arcos Interno e Intermediário os rios Doce e Jequitinhonha, bem como os rios que compõem o Estuário de Caravelas (rios Caravelas e Mucuri). Para as amostras do Arco Externo, além dos rios Doce e Jequitinhonha, ainda se deve considerar os basaltos de Abrolhos, que representam uma fonte local subordinada. Dessa forma, foram feitas curvas de mistura considerando três componentes.

Tabela 6- Componentes isotópicos usados para o cálculo das equações de mistura. EC, RD e RJ foram usados para a modelagem das amostras dos arcos Interno e Intermediário, enquanto BA, ED e RJ foram usados para modelagem das amostras do Arco Externo.

Acrônimo	Área fonte	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (2□)	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (2□)	Nd (ppm)	Sr (ppm)
EC	Estuário de Caravelas (rios Caravelas e Mucuri)	0,511664(4)	0,716890(8)	123,6	142
BA	Basaltos de Abrolhos	0,512808(16)	0,703878(3)	36,29	394
RD	Rio Doce	0,511548(7)	0,743657(7)	87,9	38,1
RJ	Rio Jequitinhonha	0,511736(4)	0,733328(7)	128	136

Diagramas de mistura entre os componentes EC, BA, RD e RJ da Tabela 6 foram plotados por período de coleta e linhas de mistura foram traçadas para identificar a componente do rio Doce em contraponto às demais fontes de plumas fluviais.

Com os novos modelos de mistura, que consideram quatro componentes, os resultados apontam para a chegada de sedimentos de todos os rios da região nordeste (Doce, Jequitinhonha, Caravelas e Mucuri) nas amostras coletadas. Ao longo do tempo, de 2019 a 2021, 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 (Figura 18). 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 (Figura 18). 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 (Figura 18). A contribuição dos basaltos de Abrolhos seria inferior a 35 % nas amostras do Arco Externo (Figura 18). Entre o período 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 se concentraram, 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 abril de 2021, quando a componente NE 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.

Figura 19- Contribuição do aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura sedimentar) baseada nos isótopos de Sr e Nd. Dados de ventos foram obtidos a partir de uma AWS instalada em Abrolhos. Dados são complementados pela frequência de frentes frias e de vento sul em Abrolhos.

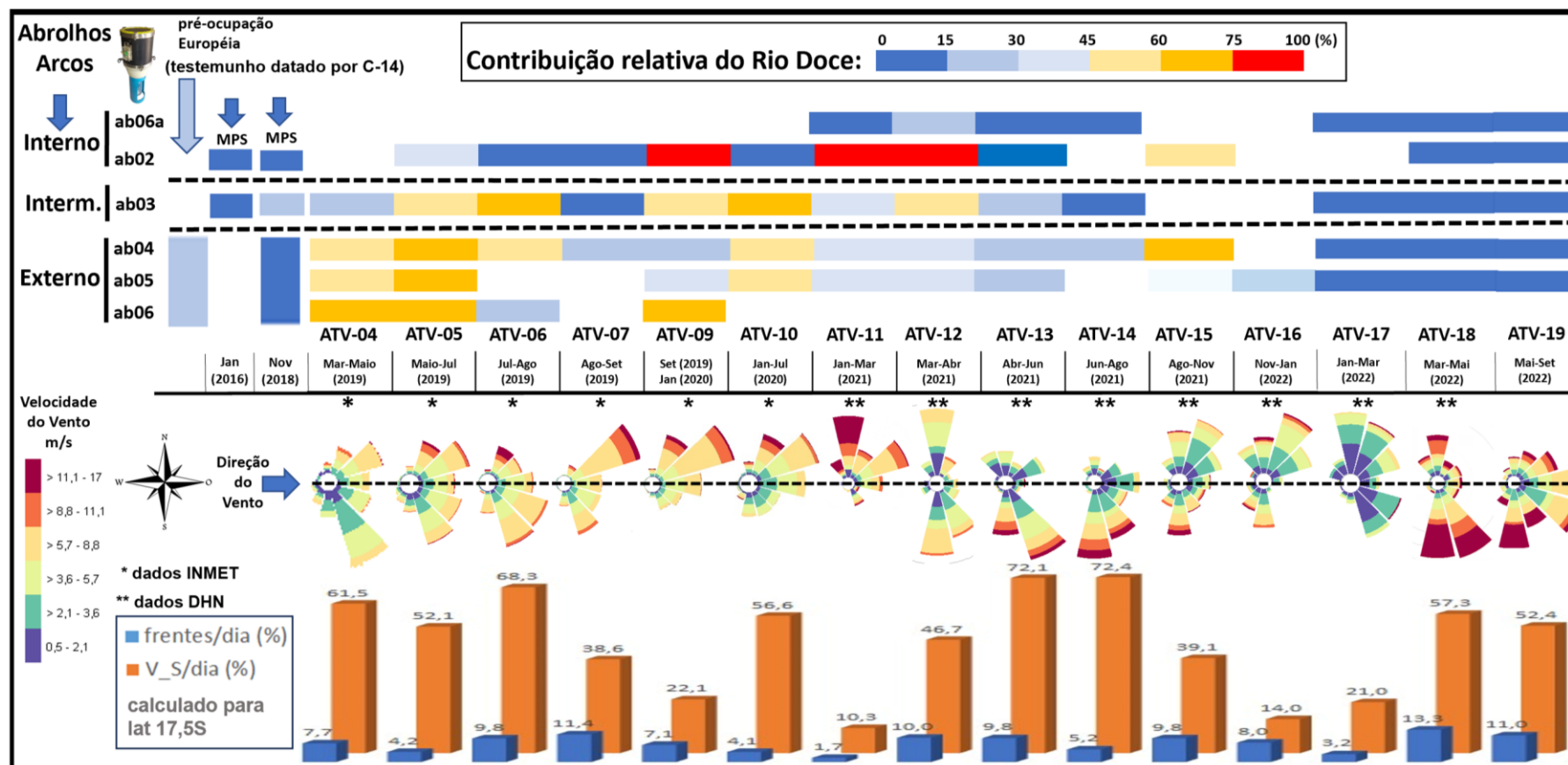


Figura 20- Variabilidade da vazão do Rio Doce (inferida em na Cidade de Linhares-ES) e contribuição relativa dos sedimentos do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura sedimentar, baseada nos isótopos de Sr e Nd).

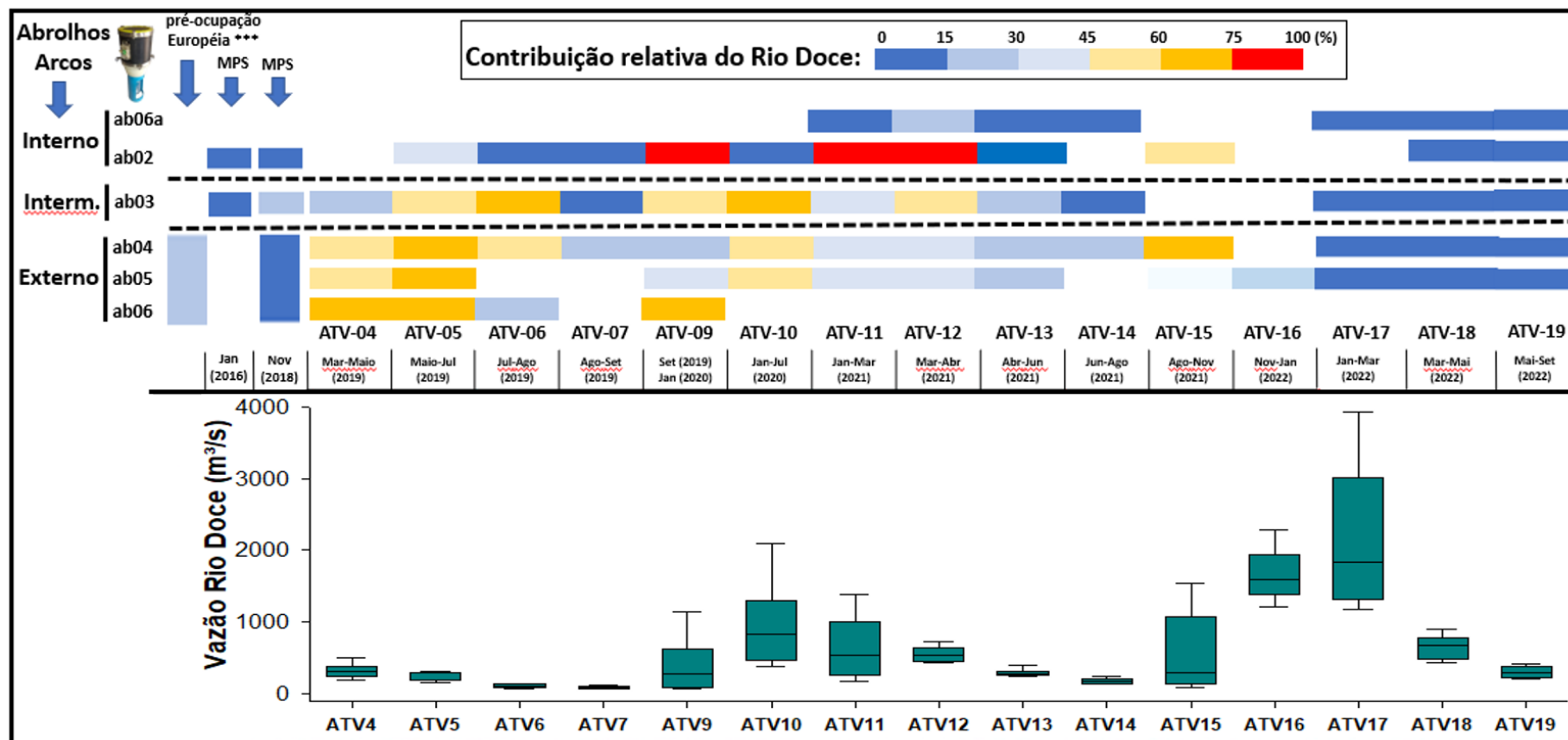
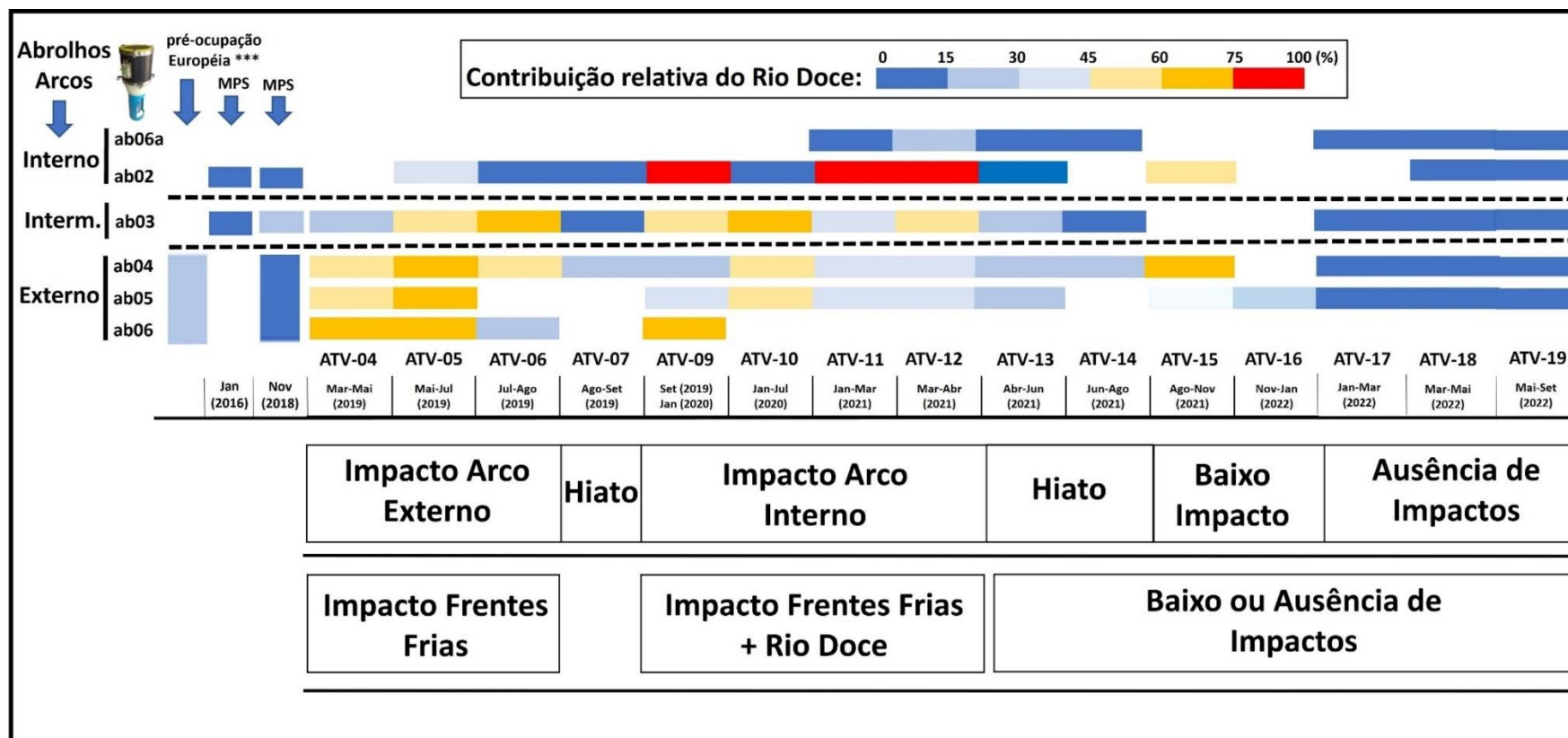


Figura 21- Contribuição do aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura sedimentar, baseada nos isótopos de Sr e Nd) e análise dos impactos a partir de uma comparação entre o resultado isotópico, a dinâmica de frentes frias e a vazão do Rio Doce.



Os diagramas apresentados na Figura 19, Figura 20, Figura 21 são o resultado da aplicação do modelo de mistura sedimentar que considera as razões isotópicas para o estrôncio e o 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 19 permite avaliar quantitativamente a contribuição relativa do material da Foz do Rio Doce em Abrolhos. Está incluído na série temporal os dados pretéritos obtidos através de testemunho sedimentar holocênico e de campanhas realizadas no verão de 2016. 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 o quadrante SE o mais expressivo. Por outro lado, na região de Sebastião Gomes (Arco Interno), 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.

Neste trabalho, foram postulados 2 (dois) mecanismos físicos como agentes responsáveis pelo transporte sedimentar do material particulado da Foz do Rio Doce para a região de Abrolhos: o primeiro através da ação das frentes frias quando os ventos superficiais atuam do setor Sul para o setor Norte, que são responsáveis por intensos processos de ressuspensão dos sedimentos em águas mais rasas. Este processo é predominante durante a estação seca; o segundo, através do aumento da vazão do Rio Doce, durante a estação chuvosa, o que disponibiliza maior volume de material terrígeno para a

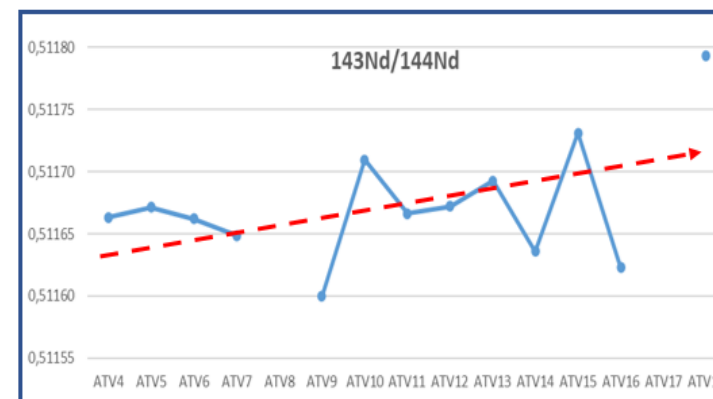
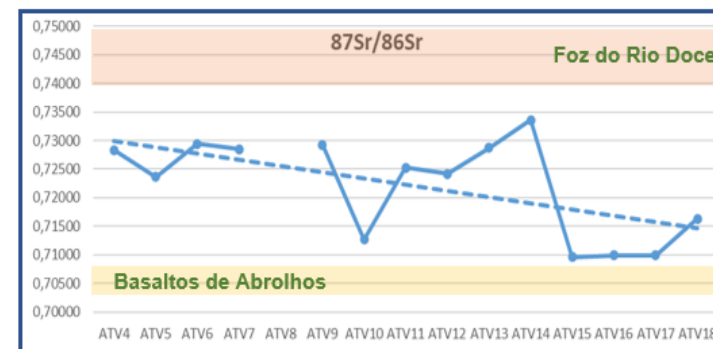
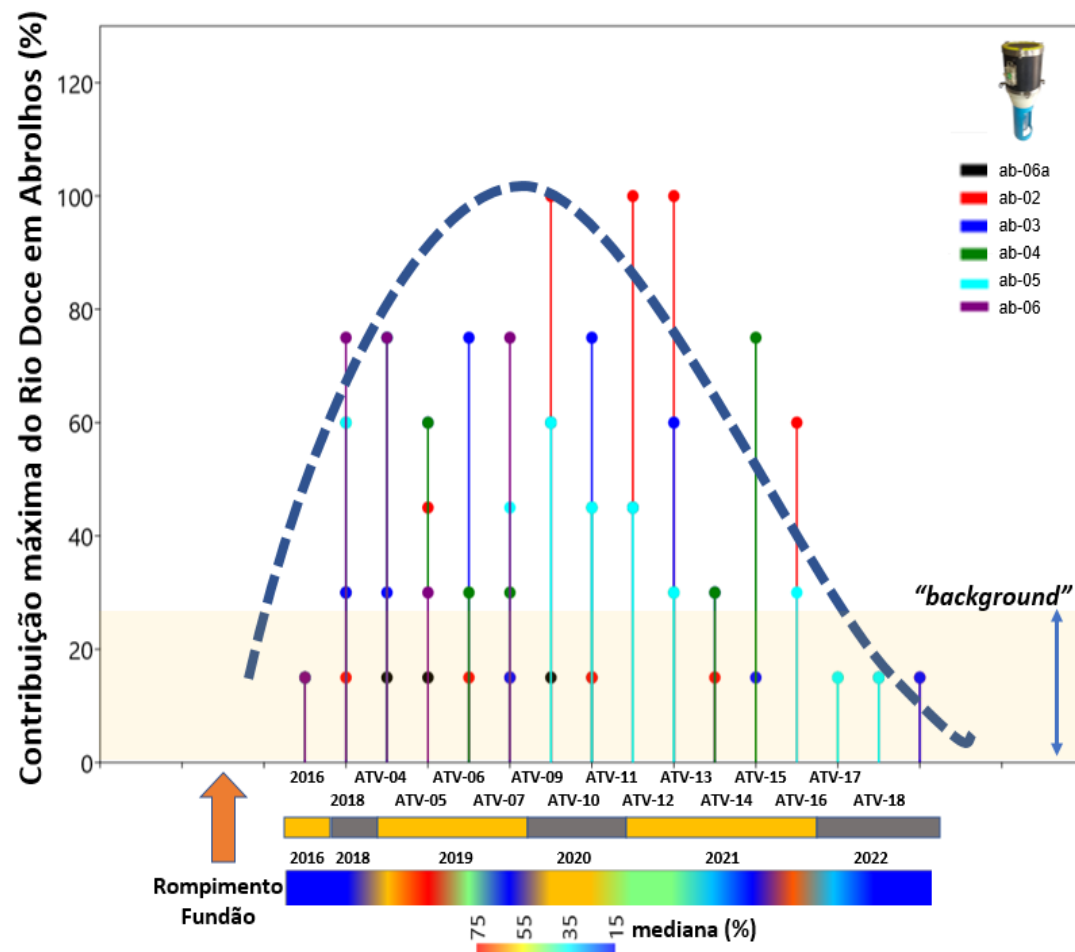
região oceânica. Ao se comparar os dados meteoceanográficos com as contribuições relativas do Rio Doce sobre Abrolhos, pode-se verificar que, de um modo geral, ambos os agentes postulados foram, potencialmente, fontes para o transporte sedimentar entre o Rio Doce e Abrolhos entre 2019 e 2022. Isto porque não observamos uma sazonalidade bem definida na qual pudéssemos atribuir as contribuições do Rio Doce a apenas um dos mecanismos especificamente. Pode-se dizer que durante as ATVs 4 a 10 houve o predomínio da ação das frentes frias no transporte sedimentar; durante as ATVs 9 a 12 o predomínio da vazão do Rio Doce no aporte sedimentar, durante as ATVs 12 a 15 novamente o predomínio da ação das frentes frias, durante as ATVs 15 a 18 volta o predomínio da vazão do Rio Doce no aporte sedimentar, e finalmente durante as ATVs 18 a 19 há o predomínio da ação das frentes frias. Dentre as ATVs, aquela que mais apresentou, efetivamente, ambos os processos foi a ATV 10. 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 a vazão do Rio Doce decresceu de $\sim 1200 \text{ m}^3/\text{s}$ para $\sim 200 \text{ m}^3/\text{s}$, houve um aumento do sinal do Rio Doce de 15-30 % para 60-75 %. Este caso evidencia claramente que somente a vazão do Rio Doce não explica as contribuições sedimentares em Abrolhos. Neste caso, o decréscimo na vazão ocorre durante a das frentes frias que geraram ressuspensão do material sedimentar e atual de Sul para Norte na zona costeira. 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 %.

Para as amostras coletadas no Arco Externo, o sinal isotópico do Rio Doce foi menor do que o observado nos arcos Interno e Intermediário. Isto implica em menor aporte de material sedimentar do Rio Doce para o PARNA de Abrolhos. Este dado sugere que o transporte sedimentar ao Norte da Foz do Rio Doce deve ser mais intenso nas proximidades da linha costa. E tal como ocorre o material particulado em suspensão e a transparência da água do mar, medidos neste projeto, há um decréscimo da carga sedimentar no sentido “*offshore*”. É provável que o conjunto de ilhas e feições geomorfológicas de fundo, possam 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 carreados de SW para NE.

Quando comparamos a variabilidade do aporte sedimentar em Abrolhos com os dados de vazão do Rio Doce e a incidência de frentes frias, simultaneamente, observamos a seguinte evolução dos dados: Entre as ATVs 4 e 6 o sinal da foz do Rio Doce aumentou concomitante a uma forte componente dos ventos superficiais oriundos no setor Sudeste de acordo com os dados locais de direção do vento. Este período também se caracterizou pela alta frequência de frentes frias e baixa vazão do Rio Doce. Isto sugere que o primeiro aporte sedimentar detectado em Abrolhos se deu pela ação das frentes frias sobre o material lançado na região oceânica adjacente à foz do Rio Doce desde final de 2015. Os dados também mostraram que o arco externo foi a primeira área a ser atingida durante a ATV 4, seguido do arco intermediário durante a ATV 5 e ausência de material exógeno até então no arco interno de Abrolhos. Durante a ATV 7 houve um hiato no aporte sedimentar. Durante esta ATV a vazão do Rio Doce continuava em seus níveis mais baixos, entretanto com presença ativa das frentes frias. O que mudou radicalmente durante esta ATV foi a direção do vento que passou a atuar a partir do Setor Nordeste. Acreditamos que tal mudança tenha impedido um transporte efetivo dos sedimentos pelos Setores Sul e Sudeste. Entre as ATVs 9 e 12 foram verificadas forte presença do Material do Rio Doce, coincidindo com a fase úmida na região e consequentemente aumento da vazão do Rio Doce. Apesar da ATV 10 representar o período com maior vazão do Rio Doce desde o início do monitoramento, este também se caracterizou pelo acaso de sistemas frontais com frequência superior a 40%. Neste período, tanto o arco intermediário como o arco externo apresentaram impactos do Rio Doce, fato que não foi observado para o arco interno. É provável que a presença destes sistemas frontais tenha promovido elevado padrão de ressuspensão e diluído a presença do material exógeno do Rio Doce para porcentagens inferiores a 15%. A partir da ATV 13 até a ATV 19, observamos uma progressiva redução no sinal do Rio Doce em Abrolhos. Um caso no qual não foi possível atribuir uma associação direta com os agentes de sedimentação ocorreu durante a ATV 15, quando tanto a frequência de frentes frias quanto a vazão do Rio Doce estavam em suas fases máximas simultaneamente e contribuições do Rio Doce acima de 60% nos arcos interno e externo da região de Abrolhos. Durante as ATVs 17, 18 e 19 pelo menos um dos processos potenciais de transporte sedimentar estiveram ativos. Entretanto, os aportes estimados estavam dentro do padrão histórico indeferido antes do programa de monitoramento, o que mostra uma tendência de redução no processo de transporte ao longo do tempo. A Figura 22 mostra uma sinopse dos processos de impacto a partir de uma caracterização das condições pré-rompimentos de fundão.

Figura 22- (Esquerda) Evolução da contribuição máxima do sinal isotópico referente ao aporte sedimentar do Rio Doce (calculada a partir do modelo de mistura isotópica/sedimentar) em Abrolhos; direita (evolução temporal dos isótopos de Sr e Nd).



3.1.2 NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e outubro de 2023

Figura 23— Resultado para ACA-01/Valores para isótopos radiogênicos de Sr e Nd. Comparação do valor de ACA-01 com (1) valores característicos da geologia regional acrescido do banco de dados isotópicos levantados por este projeto com o uso das armadilhas de sedimentos e (2) valores da geologia regional acrescida de dados isotópicos da foz do Rio Doce.

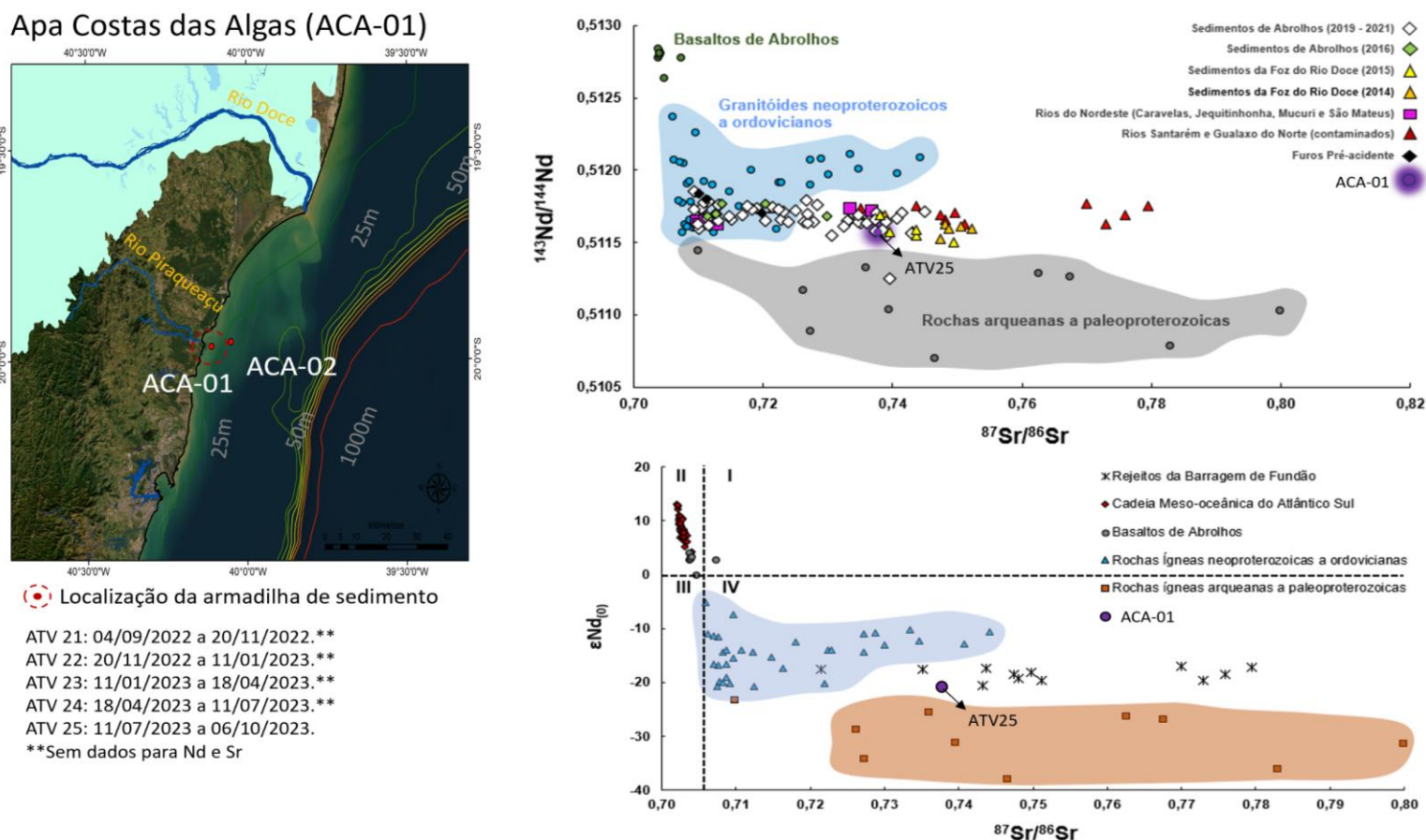
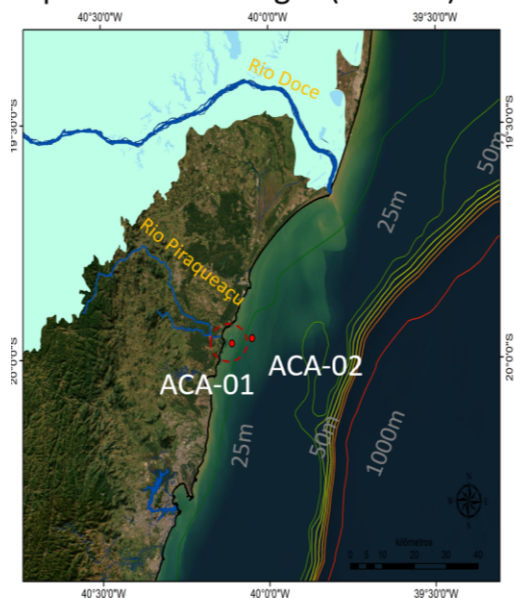


Figura 24- Modelo de mistura sedimentar baseado nas razões de isótopos radiogênicos de Sr e Nd para ACA-01 (a partir de dados da armadilha de sedimentos Abrolhos-3) e contribuição relativa do aporte de sedimentos da foz do Rio Doce.

Apa Costas das Algas (ACA-01)



Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022.**

ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.**

ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.**

ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.**

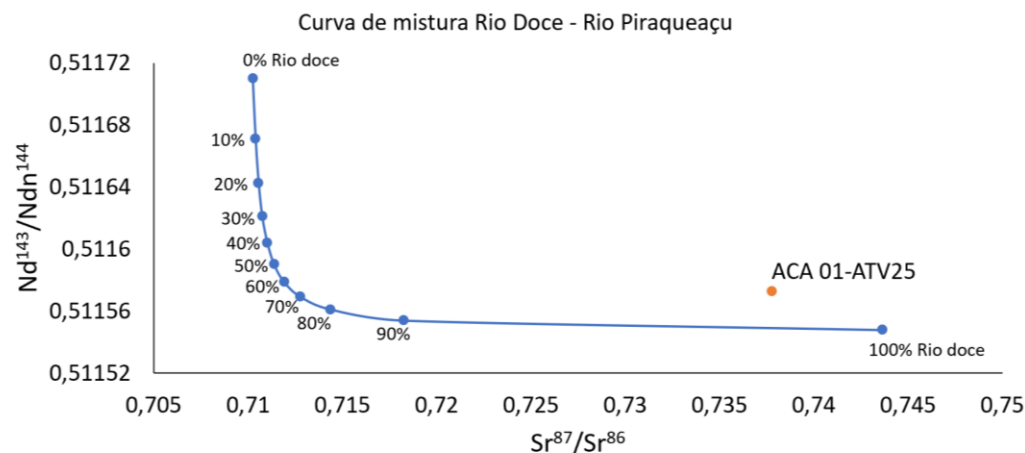
ATV 25: 11/07/2023 a 06/10/2023.

**Sem dados para Nd e Sr

ALD = isótopos abaixo do limite de detecção

ANE = Armadilha não encontrada

MAR = Sinal isotópico próximo ao da água do mar



Contribuição das áreas fontes de sedimento (%) - ACA 01

■ contribuição - Rio doce (%) ■ contribuição - Piraqueçu (%)

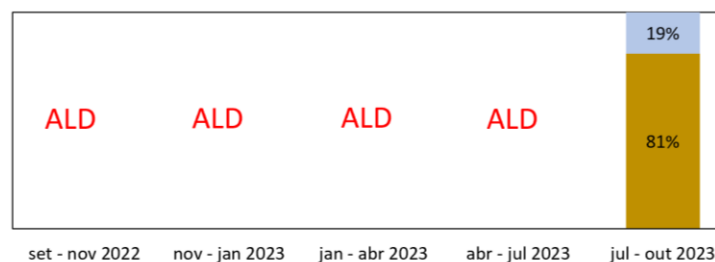
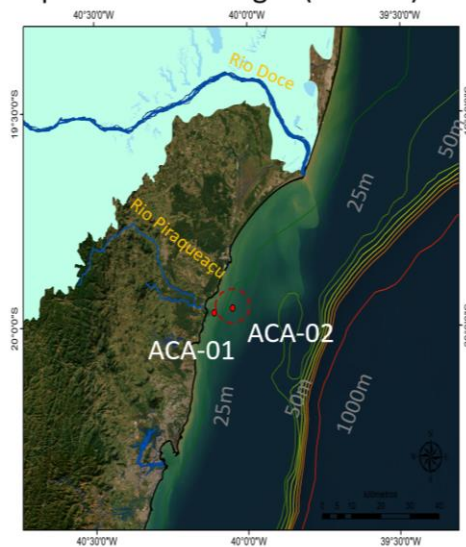


Figura 25- Resultado para ACA-02/Valores para isótopos radiogênicos de Sr e Nd. Comparação do valor de ACA-02 com (1) valores característicos da geologia regional acrescido do banco de dados isotópicos levantados por este projeto com o uso das armadilhas de sedimentos e (2) valores da geologia regional acrescida de dados isotópicos da foz do Rio Doce.

Apa Costas das Algas (ACA-02)



Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022.*
ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.
ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.
ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.*
ATV 25: 11/07/2023 a 06/10/2023.
*Armadilha não encontrada.

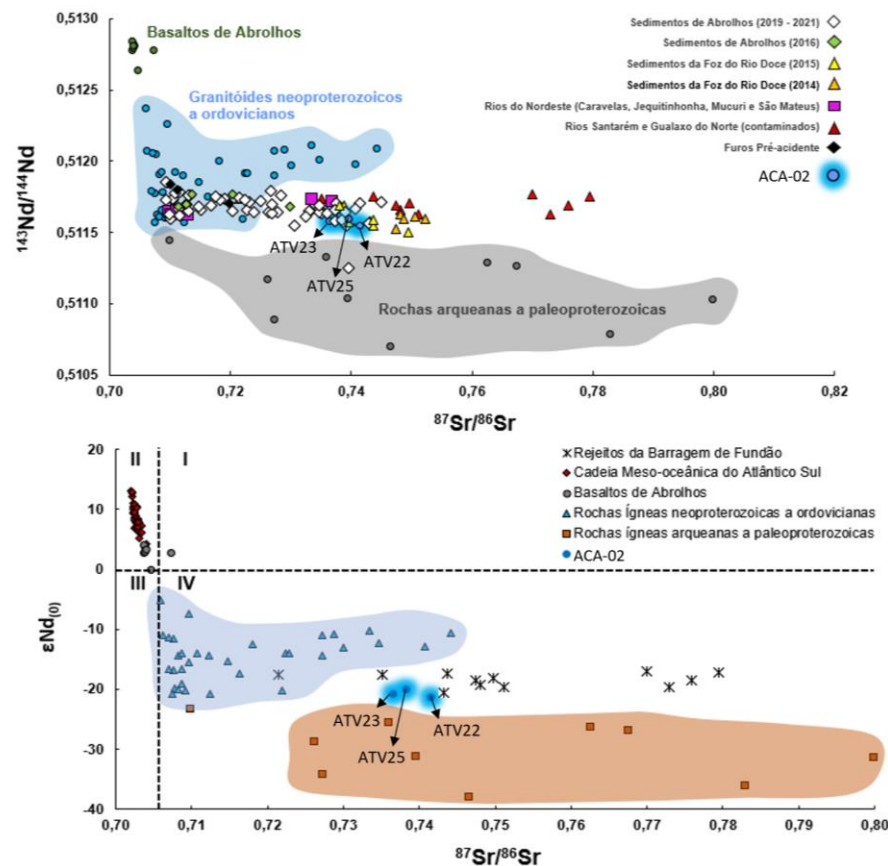
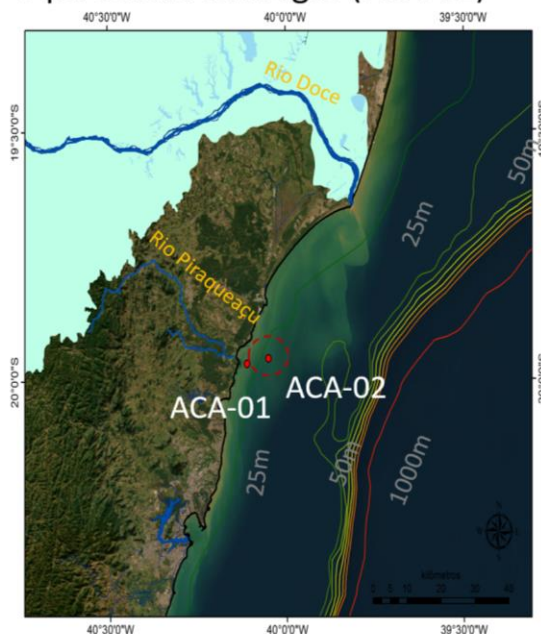


Figura 26- Modelo de mistura sedimentar baseado nas razões de isótopos radiogênicos de Sr e Nd para ACA-02 (a partir de dados da armadilha de sedimentos Abrolhos-3) e contribuição relativa do aporte de sedimentos da foz do Rio Doce.

Apa Costas das Algas (ACA-02)



Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022.*

ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.

ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.

ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.*

ATV 25: 11/07/2023 a 06/10/2023.

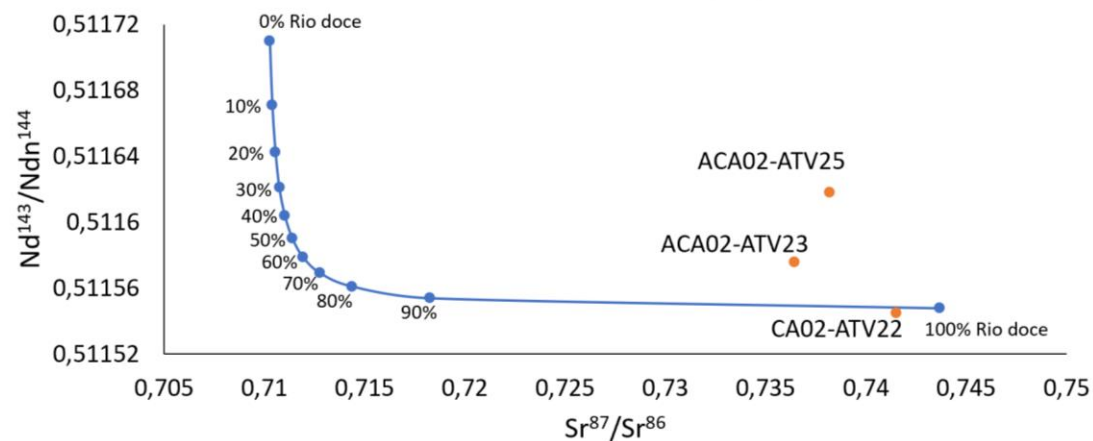
*Armadilha não encontrada.

ALD = isótopos abaixo do limite de detecção

ANE = Armadilha não encontrada

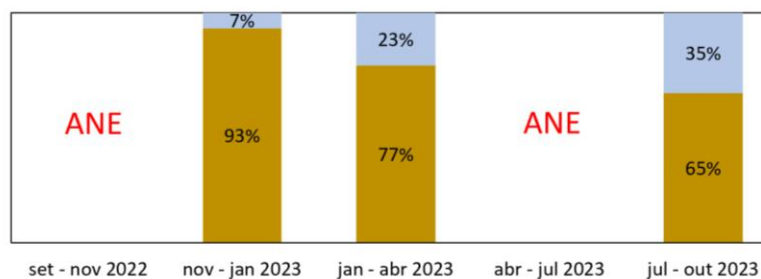
MAR = Sinal isotópico próximo ao da água do mar

Curva de mistura Rio Doce - Rio Piraqueçu



Contribuição das áreas fontes de sedimento (%) - ACA 02

■ contribuição - Rio doce (%) ■ contribuição - Piraqueçu (%)



As atividades relativas ao Novo Ciclo, visaram o monitoramento oceânico e estudo de proveniência mineral sobre os “sedimentos armadilhados” em duas novas regiões de interesse do PMBA/Fest 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 nesta nova etapa, o monitoramento concentra suas atividades em áreas mais próximas a foz do Rio Doce, devido aos sinais isotópicos em Abrolhos estarem, neste momento, próximos da condição de pré-rompimento de Fundão-MG, de acordo com a técnica de geologia isotópica apresentada neste relatório.

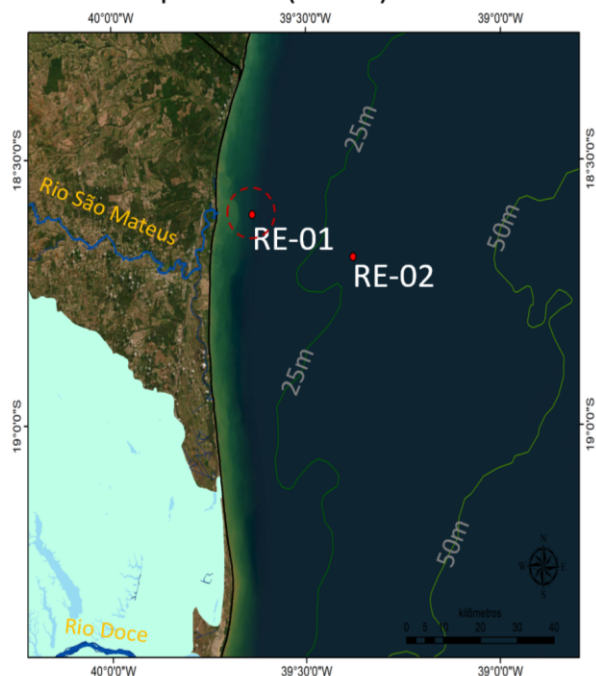
Para a etapa do Novo Ciclo, as curvas de mistura foram baseadas em *end-members* diferentes daqueles empregados em Abrolhos, visto que suas fontes sedimentares são distintas. Para Recife Esquecidos, foi utilizado um modelo ternário constituído por Rio Doce, Rio São Matheus e Estuário de Caravelas. Para APA Costa das Algas foi utilizado um modelo formado pelo Rio Doce e o Rio Piraqueçu.

Para a região da APA Costa das Algas (Figura 23, Figura 24 , Figura 25, Figura 26), diversas dificuldades foram encontradas nesta Novo Ciclo, principalmente relacionadas ao desaparecimento de armadilhas e a presença de rede de arrasto emaranhadas sobre as armadilhas. O grupo de trabalho, reinstalou várias novas armadilhas ao longo do monitoramento e alterou várias vezes sua localização para evitar o problema. Entretanto, tivemos perdas repetidamente. A ATV 21 não foi realizada para APA Costa das Algas pois na oportunidade não tínhamos ainda a autorização do IBAMA para atuar dentro dos limites da APA. Os presentes resultados, apesar de temporalmente restritos, pois em ACA-01 obtivemos sucesso apenas durante a ATV-25, mostraram forte componente do Rio Doce sobre aquela região, com os dados isotópicos para Sr e Nd dentro dos valores que correspondem ao domínio isotópico da foz do Rio Doce. Tal contaminação correspondeu ao período entre Julho e Outubro de 2023, ou seja, entre o final da fase de maior ação de frentes frias e o início do período chuvoso. Nosso modelo de mistura estimou durante este evento uma contribuição relativa do Rio Doce em 81%.

Para a ACA-02, em posição mais *offshore* em relação a linha de costa, conseguimos recuperação das garrafas amostradoras para as ATV 22, ATV 23 e ATV 25. Todas as campanhas mostraram forte sinal isotópico de sedimentos da foz do Rio Doce. Para as ATV 22 e ATV 23, que ocorreram durante o período chuvoso, tal contribuição variou entre 77% e 93%. Já durante o período entre Julho e Agosto de 2023, quando a componente SSE dos ventos superficiais se intensificam, esta contribuição cai para 65% (Figura 27). Estes resultados colocam a APA Costa das Algas como fortemente impactada pelos rejeitos que fluem da foz do Rio Doce.

Figura 27- Resultado para RE-01/Valores para isótopos radiogênicos de Sr e Nd. Comparação do valor de RE-01 com (1) valores característicos da geologia regional acrescido do banco de dados isotópicos levantados por este projeto com o uso para das armadilhas de sedimentos e (2) valores da geologia regional acrescida de dados isotópicos da foz do Rio Doce.

Recife Esquecidos (RE-01)



Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022
ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.
ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.
ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.
ATV 25: 11/07/2023 a 06/10/2023.

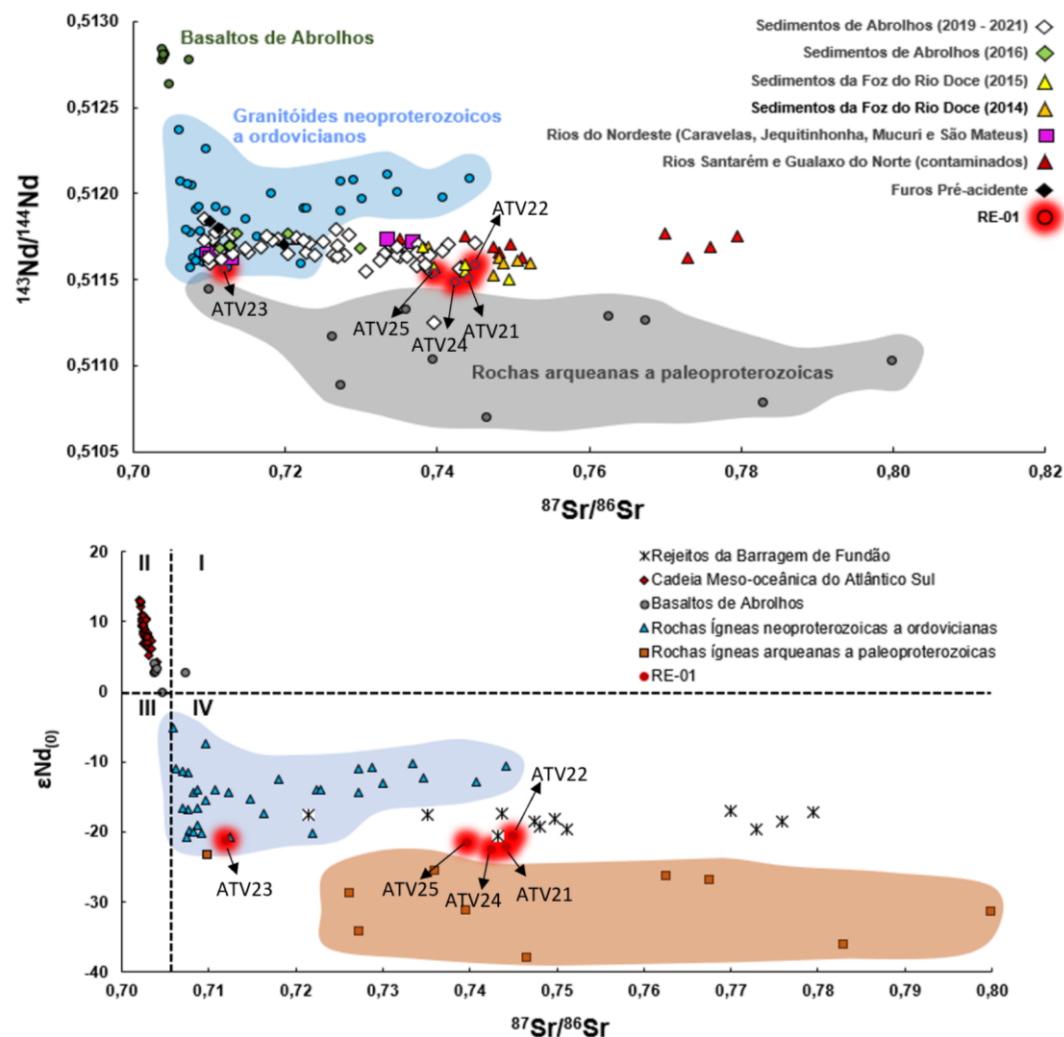
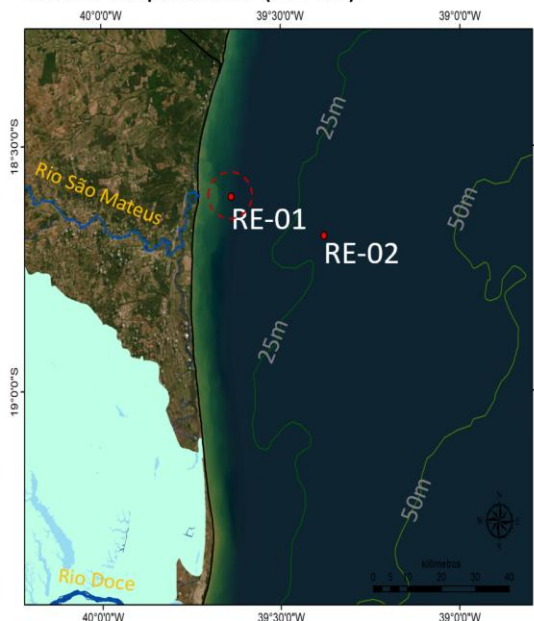


Figura 28- Modelo de mistura sedimentar baseado nas razões de isótopos radiogênicos de Sr e Nd para RE-01 (a partir de dados da armadilha de sedimentos Abrolhos-3) e contribuição relativa do aporte de sedimentos da foz do Rio Doce.

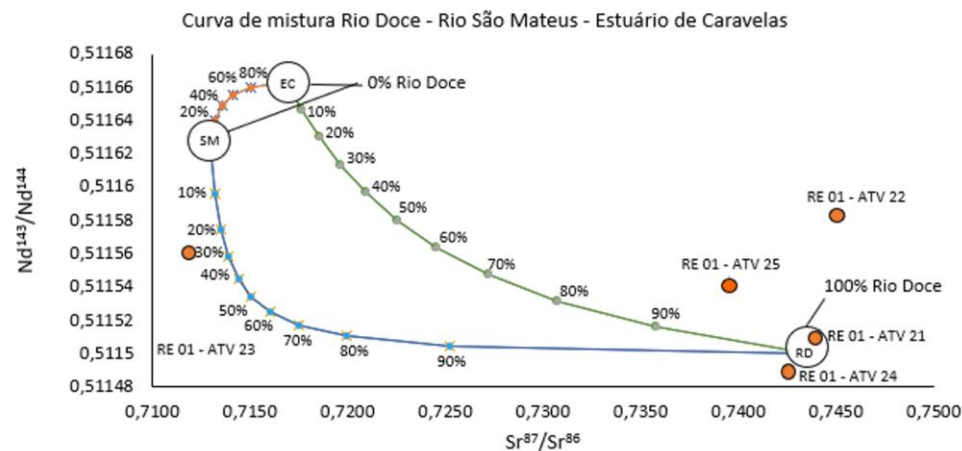
Recife Esquecidos (RE-01)



Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022
ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.
ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.
ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.
ATV 25: 11/07/2023 a 06/10/2023.

ALD = isótopos abaixo do limite de detecção
ANE = Armadilha não encontrada
MAR = Sinal isotópico próximo ao da água do mar



Contribuição das áreas fontes de sedimento (%) - RE 01

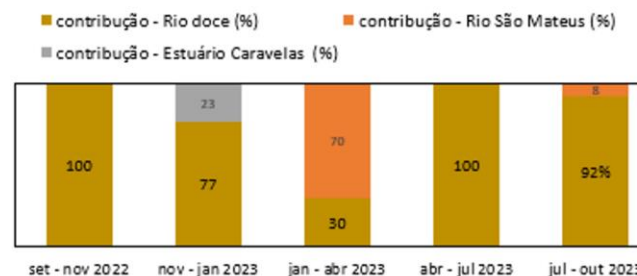
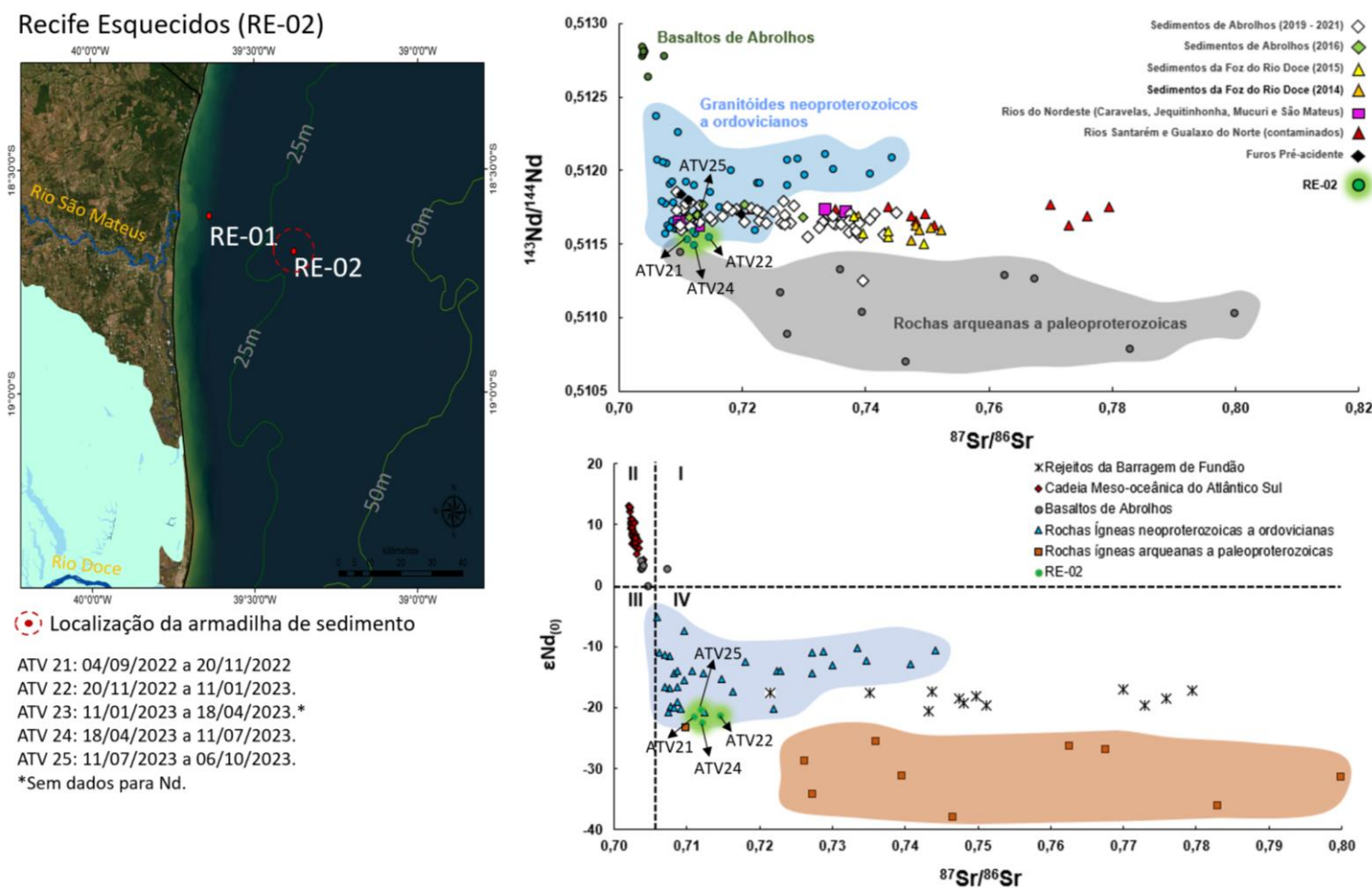


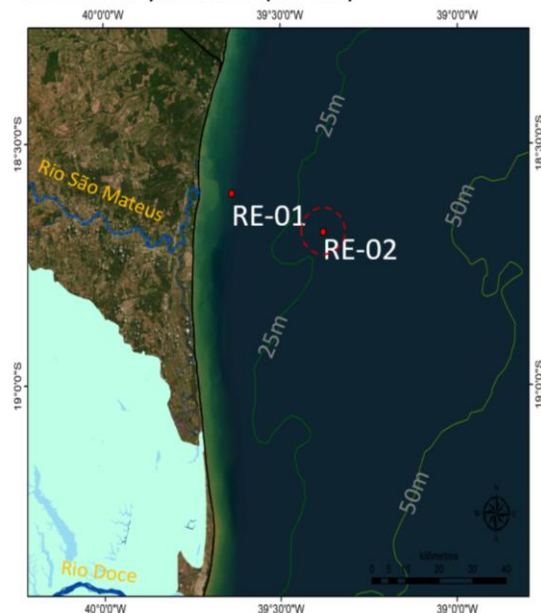
Figura 29- Resultado para RE-02/Valores para isótopos radiogênicos de Sr e Nd. Comparação do valor de RE-02 com (1) valores característicos da geologia regional acrescido do banco de dados isotópicos levantados por este projeto com o uso das armadilhas de sedimentos e (2) valores da geologia regional acrescida de dados isotópicos da foz do Rio Doce.



No caso da estação RE-02 (baseado na integração trimestral do amostrador Abrolhos 3), *offshore*, todas as assinaturas isotópicas das amostras coletadas nas ATVs 21, 22, 24 e 25 apresentaram frações de mistura, em média, proporcionalmente iguais entre o sinal da foz do Rio Doce e do Rio São Mateus. Uma exceção ocorreu durante a ATV 23 quando o sinal do Rio São Mateus foi predominante (Figura 29).

Figura 30- Modelo de mistura sedimentar baseado nas razões de isótopos radiogênicos de Sr e Nd para RE-02 (a partir de dados da armadilha de sedimentos Abrolhos-3) e contribuição relativa do aporte de sedimentos da foz do Rio Doce.

Recife Esquecidos (RE-02)

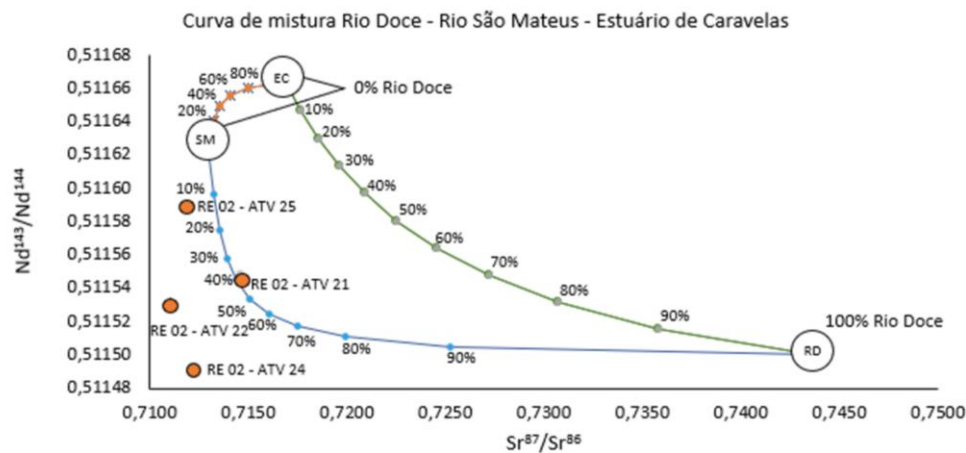


Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022
ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.
ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.*
ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.
ATV 25: 11/07/2023 a 06/10/2023.

*Sem dados para Nd.

ALD = isótopos abaixo do limite de detecção
ANE = Armadilha não encontrada
MAR = Sinal isotópico próximo ao da água do mar



Contribuição das áreas fontes de sedimento (%) - RE 01

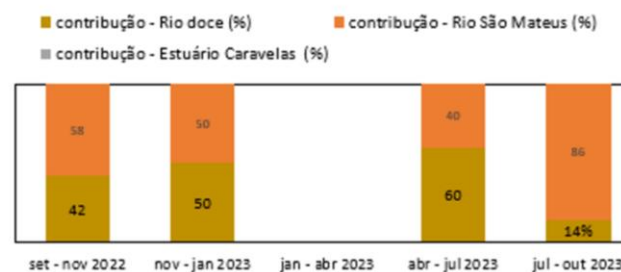
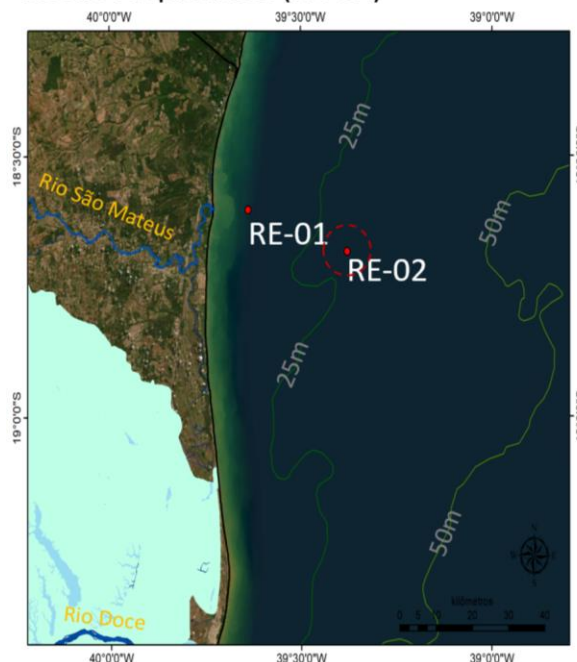


Figura 31- Valores para isótopos radiogênicos de Sr e Nd em RE-02 (a partir de dados do sistema automático MacLane) e comparação com a geologia regional e o banco de dados isotópicos levantados por este projeto para armadilhas de sedimentos, foz do Rio Doce principais rios da região

Recife Esquecidos (RE-02)



Localização da armadilha de sedimento

ATV 21: 04/09/2022 a 20/11/2022
ATV 22: 20/11/2022 a 11/01/2023.
ATV 23: 11/01/2023 a 18/04/2023.*
ATV 24: 18/04/2023 a 11/07/2023.
ATV 25: 11/07/2023 a 06/10/2023.
*Sem dados para Nd.

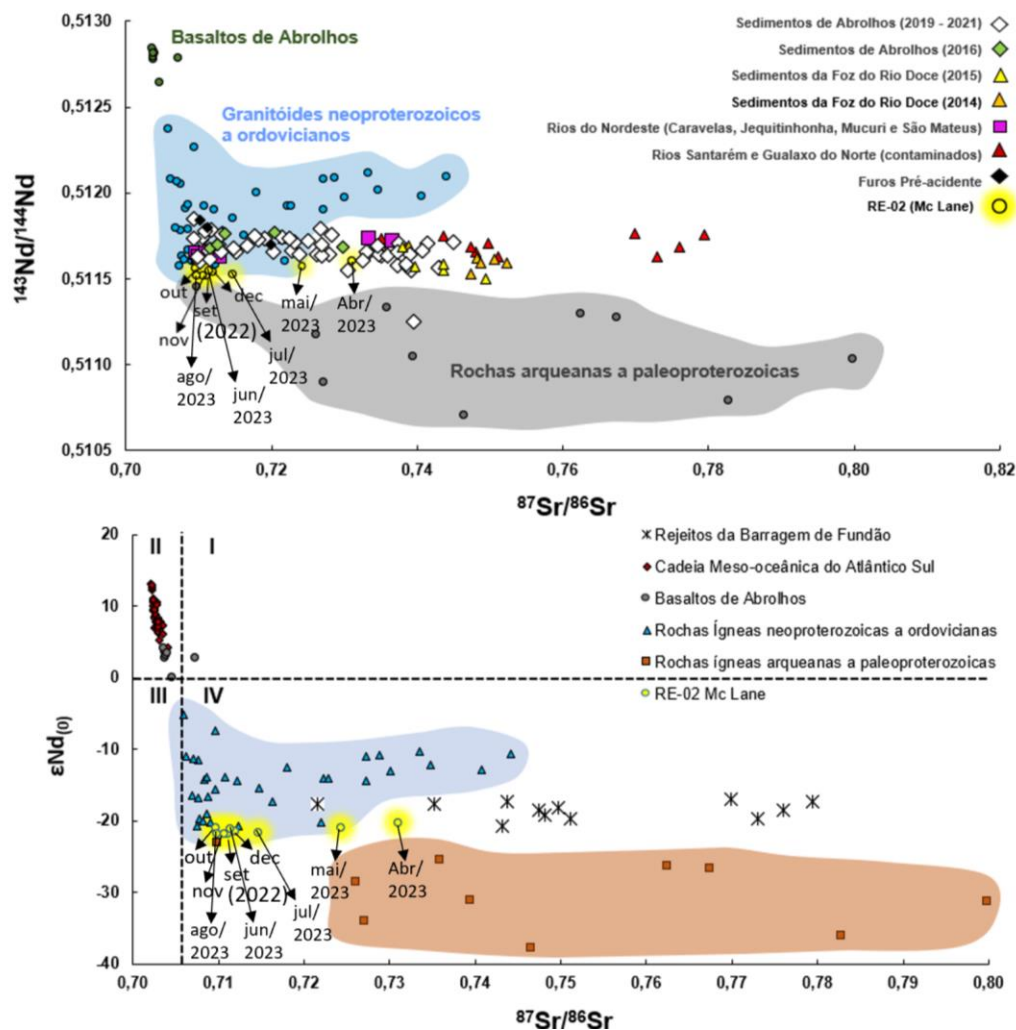
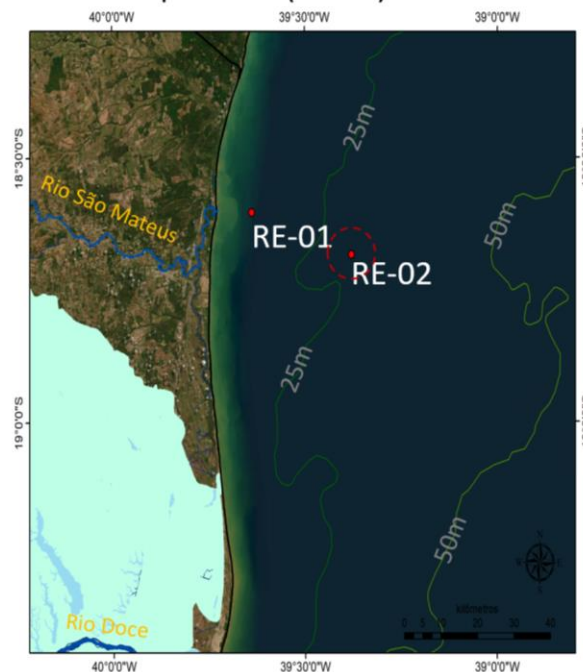


Figura 32- Modelo de mistura sedimentar baseado nas razões de isótopos radiogênicos de Sr e Nd para RE-02 (a partir de dados do sistema automático MacLane) e contribuição relativa do aporte de sedimentos da foz do Rio Doce.

Recife Esquecidos (RE-02)



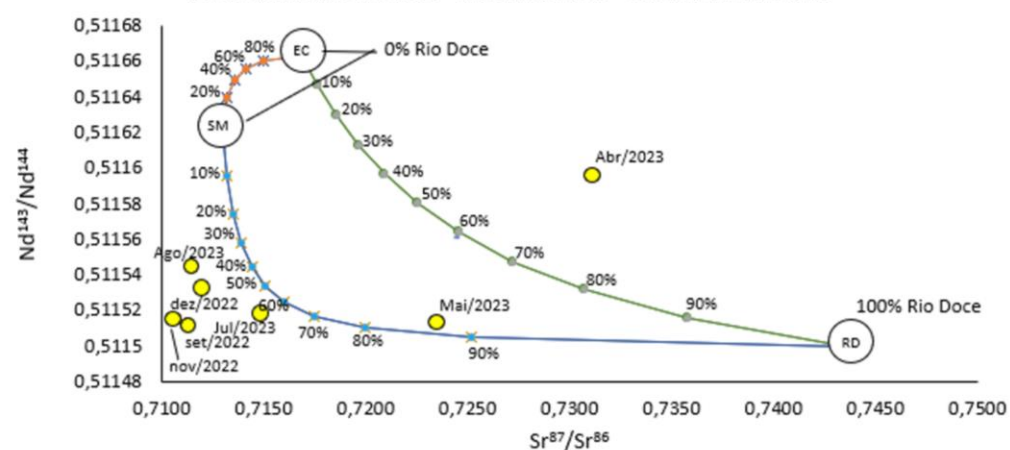
Localização da armadilha de sedimento

ALD = isótopos abaixo do limite de detecção

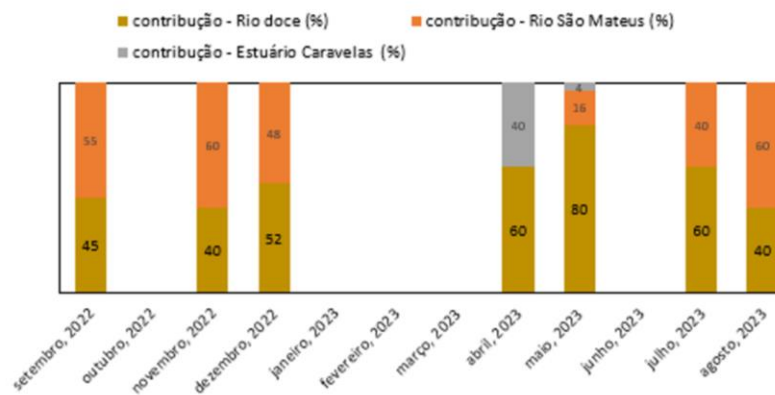
ANE = Armadilha não encontrada

MAR = Sinal isotópico próximo ao da água do mar

Curva de mistura Rio Doce - Rio São Mateus - Estuário de Caravelas

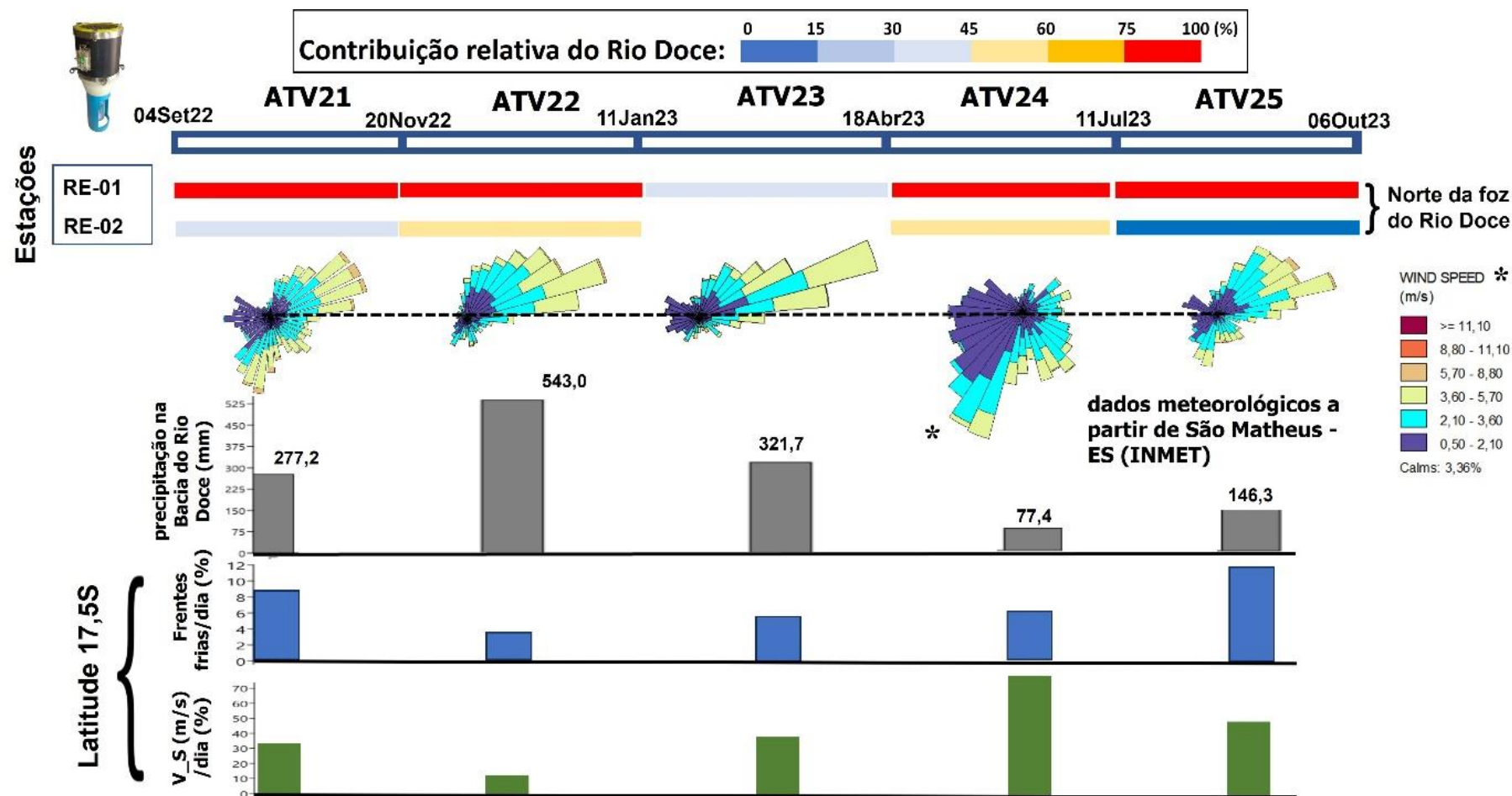


Contribuição das áreas fontes de sedimento (%) - RE 01



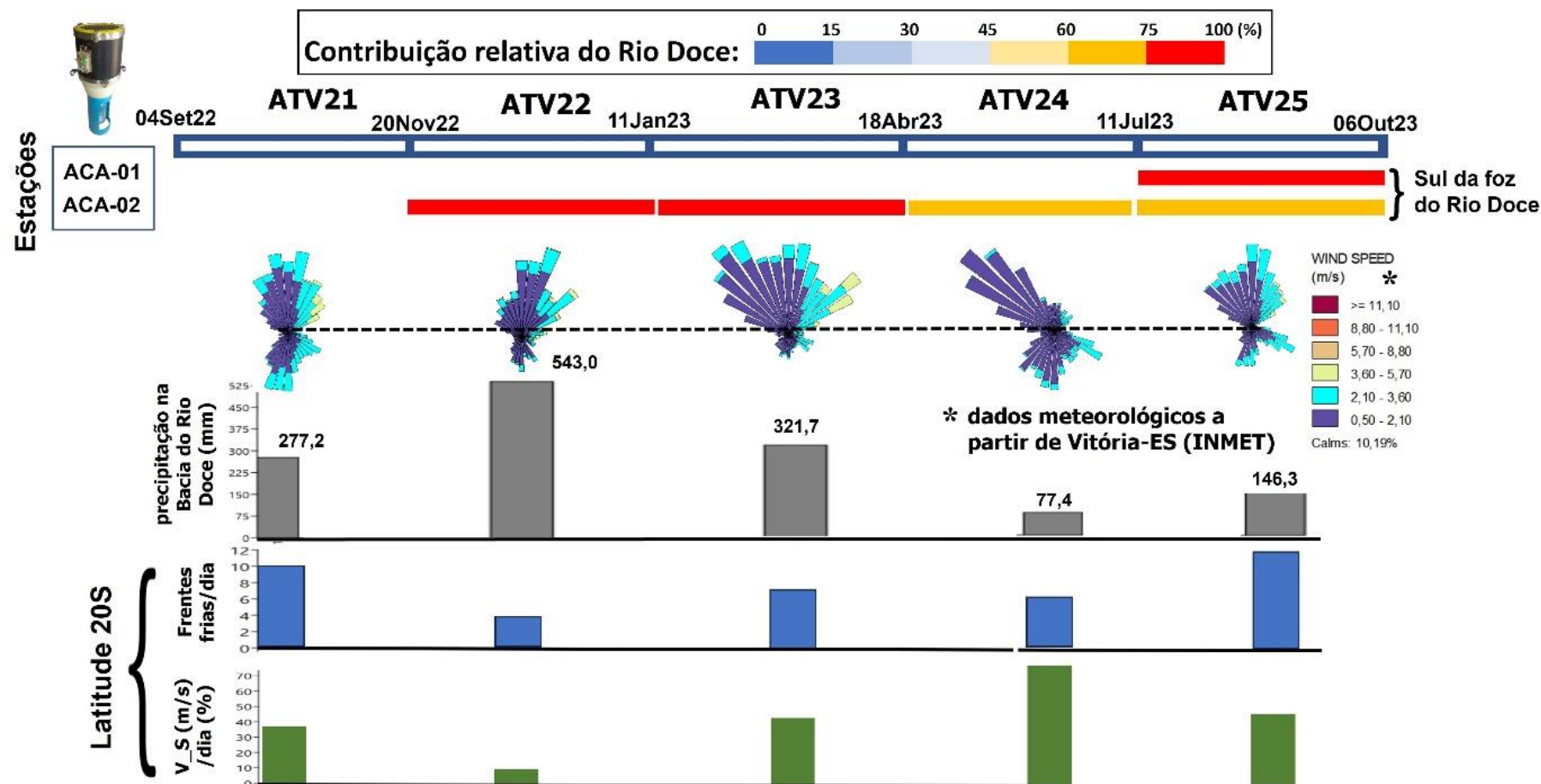
Para o amostrador automático, MacLane (Figura 31, Figura 32), programado para amostragem com resolução mensal, instalado próximo a RE-02, *offshore*, foi possível observar maior nível de detalhes quanto a variabilidade inter-anual das assinaturas isotópicas. Por exemplo, no período seco em Abril e em Maio de 2023 as amostras mensais evidenciaram uma maior contribuição da foz do Rio Doce.

Figura 33– Contribuições relativas das plumas sedimentares do Rio Doce em Recifes Esquecidos como produto do modelo de mistura e dinâmica de ventos correspondentes.



Para a região de Recifes Esquecidos (Norte da Foz do Rio Doce), e baseado no modelo de mistura sedimentar a partir dos isótopos de Sr e Nd, as contribuições do Rio Doce foram significativas entre setembro de 2022 e outubro de 2023 para a estação RE-01 localizada na área costeira próxima a linha de praia. Este fato foi observado tanto durante a fase de precipitação máxima, fase úmida, como na fase de frequência de frentes frias. A única exceção ocorreu quando a direção dos ventos locais esteve amplificada nos quadrantes NE e E. A estação RE-02 localizada em área relativamente mais “offshore” apresentou contribuição significativamente menor para os sedimentos da foz do Rio Doce e tendência de redução, acompanhando o padrão observado em Abrolhos-BA.

Figura 34– Contribuições relativas das plumas sedimentares do Rio Doce em APA Costa das Algas como produto do modelo de mistura e dinâmica de ventos correspondentes



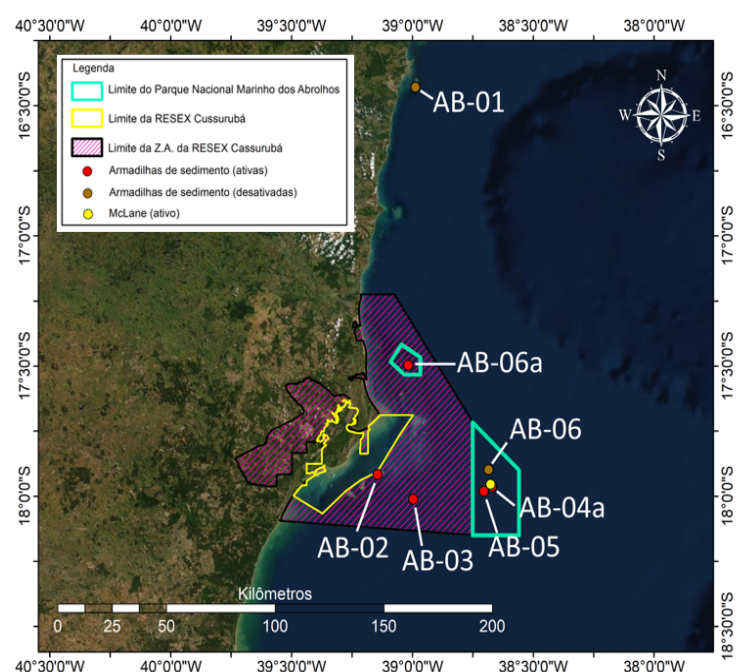
Para a região de APA Costa das Algas (Sul da Foz do Rio Doce) e baseado no modelo de mistura sedimentar a partir dos isótopos de Sr e Nd, as contribuições do Rio Doce foram significativas entre novembro de 2022 e outubro de 2023. Este fato foi observado principalmente durante a fase de precipitação máxima, fase úmida. Aumento importante também foi observado durante o período com maior frequência de frentes frias entre julho e outubro de 2023. O período de menor impacto relativo ocorreu quando a direção do vento mudou seu padrão típico no período resultante do setor NW.

Um sumário de todas as contribuições relativas para cada ATV do Novo Ciclo e dinâmica de ventos na região é apresentado na Figura 33 e Figura 34. Os dados evidenciam um decréscimo da contribuição do Rio Doce na Estação Recife Esquecidos offshore, acompanhando os resultados de Abrolhos-BA, e um sistemático impacto nas demais estações, todas com características mais costeiras. Durante o período de amostragem, os dados mostraram forte contribuição do Rio Doce durante a estação chuvosa que coincidiu com ventos do Setor N atingindo a APA Costa das Algas. Na estação seca, quando as frentes frias predominaram e são responsáveis por processos de remobilização do fundo, contribuições acima de 60% foram observadas.

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

3.2.1 FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022

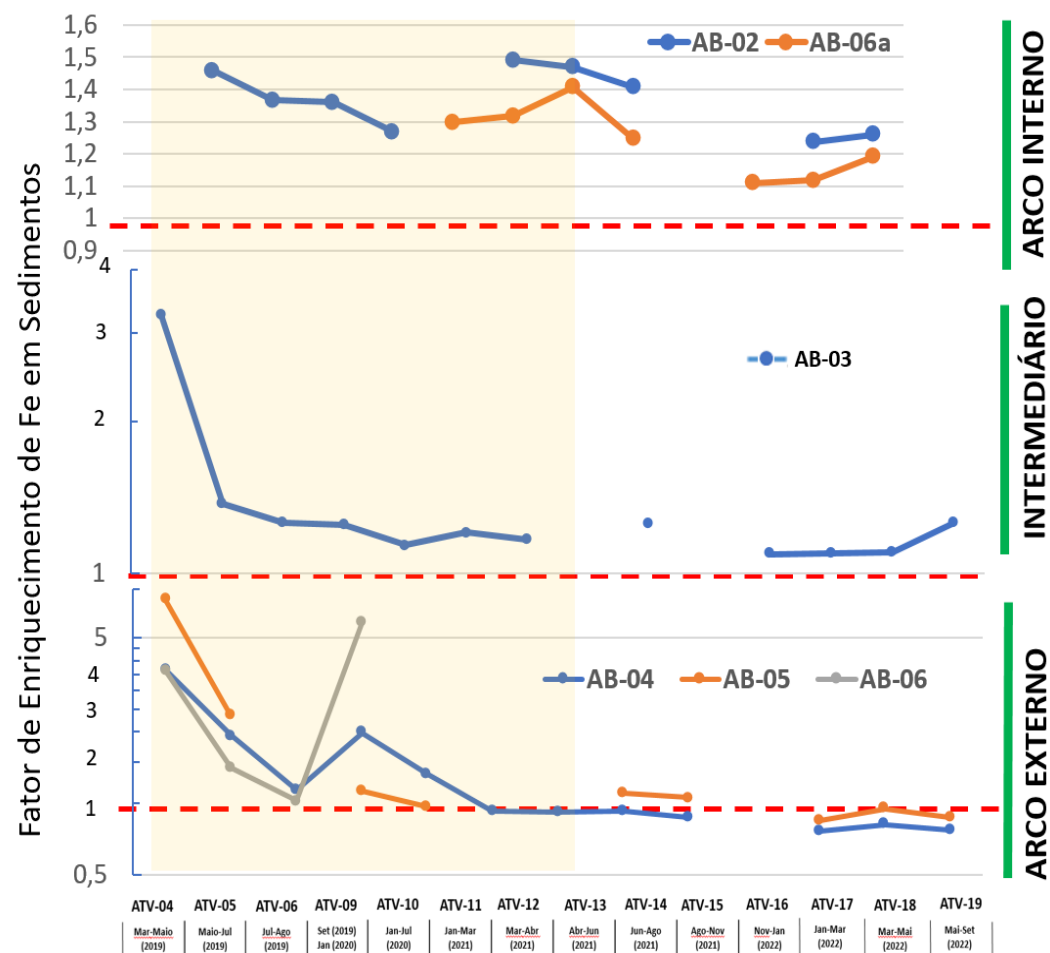
Figura 35- Mapa de localização das estações de coleta de sedimentos armadilhados e cálculo do enriquecimento de Fe ao longo das ATVs. A linha tracejada delimita o limite de corte para aportes sedimentares externos quando os valores excedem esta referência (valores maiores ou iguais a 1,0) ou quando ocorrem diluições (valores menores do que 1,0). O modelo para o cálculo do enriquecimento de Fe é baseado em dados de referência para Fe e Al em Netto, 2008, onde foram analisados 2 testemunhos sedimentares curtos cuja cronologia deposicional é anterior a chegada dos rejeitos de minério a foz do Rio Doce.



Ref: Netto, 2008

Médias: Fe= 55 mg/g
e Al= 80 mg/g

$$FE_{Fe} = \frac{\left\{ \frac{Fe}{Al} \right\}_{armadilha}}{\left\{ \frac{Fe}{Al} \right\}_{referência}}$$



Neste trabalho, além do uso de um traçador isotópico de proveniência mineral, empregamos paralelamente um segundo traçador com características completamente independente. Neste caso, empregamos o ferro em excesso cujos resultados ao longo do monitoramento estão apresentados na Figura 35.

Enriquecimentos em 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. 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 do componente exógeno e tendência dos valores aos padrões esperados para a região, ou seja, com 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 término da etapa de monitoramento em Abrolhos, sob influência de sedimentos de fontes externas contendo Fe.

Figura 36- Composição de dados de detecção de Fe em bandas de crescimento anuais em esqueleto de coral (*Mussismilia Hartii* em Evangelista et al. 2023) de Abrolhos e enriquecimento de Fe para as amostras das armadilhas de sedimentos.

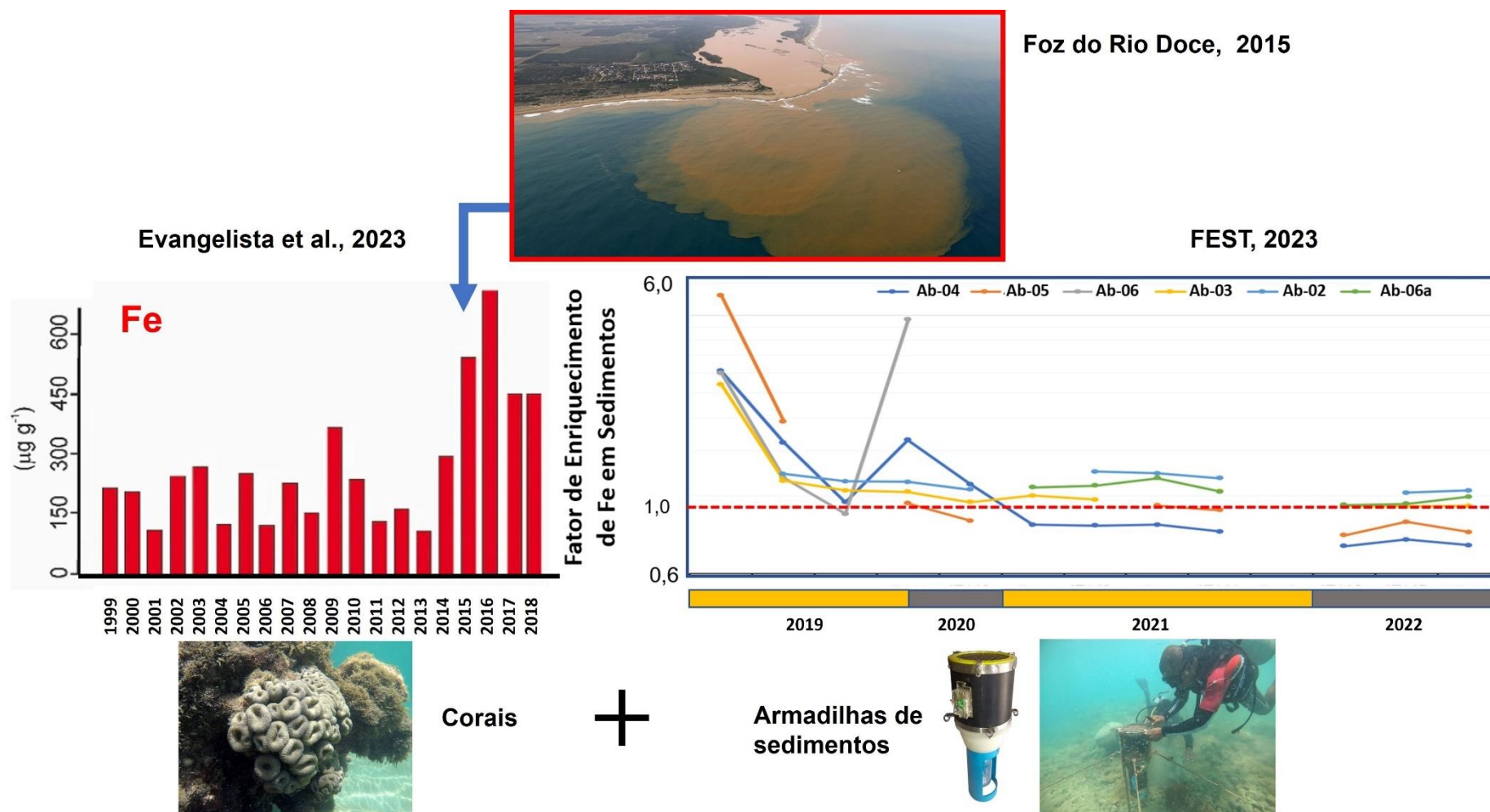
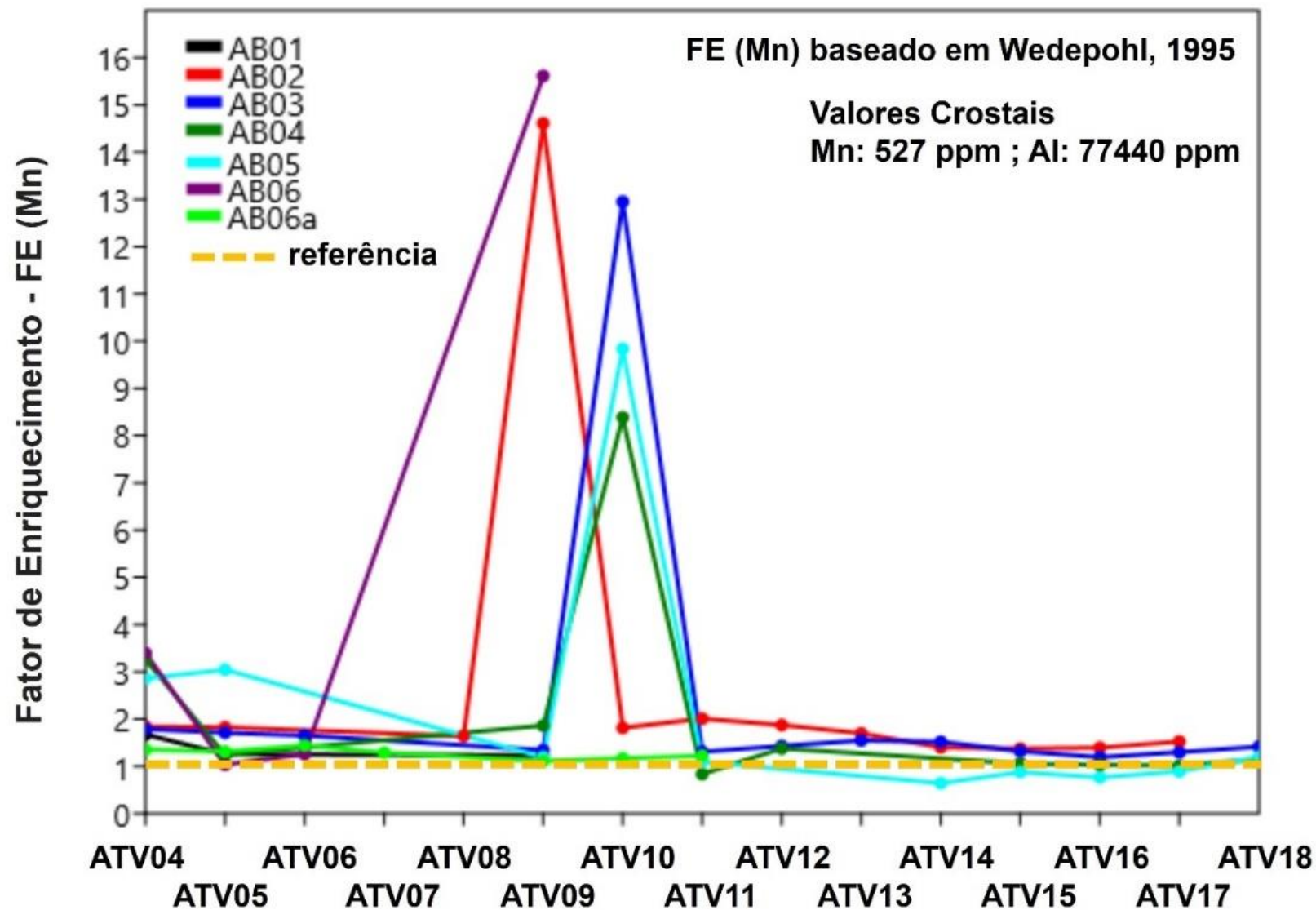


Figura 37– Fatores de Enriquecimento para Mn em sedimentos armadilhados para a Região de Abrolhos entre 2019 e 2022.



Neste trabalho, combinamos dados de excesso de Fe das armadilhas de sedimentos com os dados de incorporação de Fe em bandas de crescimento de carbonato de cálcio (Evangelista et al., 2023). Os dados de Fe em corais são retrospectivos de 1999 até 2018 quando a colônia foi coletada ainda viva no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (Figura 36). Já os dados dos sedimentos armadilhados cobrem o período de 2019 a 2022. O alinhamento destas bases de dados evidencia a ocorrência de um “pulso sedimentar” caracterizado por um aumento após 2015, atingindo um máximo em 2019, seguido por decréscimo a partir de 2020 até o final de 2022. Este comportamento corrobora o padrão observado pelos isótopos radiogênicos de Sr e Nd apresentados acima.

Apesar de observarmos uma redução importante do sinal sedimentológico da foz do Rio Doce em Abrolhos a partir do final de 2021, quando foram atingidos os níveis pré-rompimento de Fundão, dois aspectos devem ser considerados: (1) dados sedimentológicos obtidos pelo Fest mostraram que há um aumento crescente no potencial de mobilidade do sedimento de fundo depositado nas adjacências da Foz do Rio Doce; (2) todos os modelos climáticos aplicados para o Atlântico tropical Sul projetam aumento na energia dos ciclones extratropicais que atuam nesta região. Tais sistemas frontais são responsáveis pelo transporte Sul-Norte de sedimentos ao longo da plataforma continental. Ao combinarmos estes dois fatores pode-se perceber que as projeções futuras para a sedimentação em Abrolhos requerem atenção e monitoramento permanente visto que, temos um cenário futuro favorável para novos “pulsos sedimentares” naquela região.

Para o caso dos Fatores de Enriquecimento para o Mn, não foram encontrados valores de referência para Mn e Al em testemunhos sedimentares regionais, datados para o período pré-rompimento de Fundão. Alguns testemunhos apresentaram apenas Al ou apenas Mn, mas não identificamos nenhuma análise paleoambiental que apresentasse análises para ambos os elementos para as mesmas subamostras. Diante desta circunstância, utilizamos, como é classicamente feito na literatura, os valores para Mn e Al da crosta terrestre como valores de referência. Tais valores foram obtidos de Wedepohl (1995) em “Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(7): 1217-1232”. Os valores para Mn e Al são 527 ppm e 77440 ppm, respectivamente. Para Abrolhos, ao se calcular os Fatores de Enriquecimento para o Mn obteve-se dois marcantes períodos de enriquecimento em Mn, sendo o primeiro em ATV04 e ATV05, ou seja, entre Março e Julho de 2019, seguido de um hiato de contribuição e um segundo episódio caracterizando forte aporte de Mn na região. Este segundo “pulso” ocorreu entre a ATV09 e a ATV10, ou seja, entre Setembro de 2019 e Julho de 2020 (Figura 37). De um modo geral, o sinal do Mn seguiu as contribuições relativas do Rio Doce em Abrolhos inferidas pelos isótopos de Sr e Nd. Após este período, entre a ATV12 e ATV18, o Fator de Enriquecimento esteve próximo a unidade indicando ausência de “contribuições externas”.

3.2.2. NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e outubro de 2023

Para as novas localidades do “Novo Ciclo”, Tabela 7, analisamos diretamente os resultados no contexto geológico regional e em seguida aplicamos o modelo de mistura isotópica para avaliar as contribuições relativas do Rio Doce sobre as áreas monitoradas (APA Costa das Algas e Recifes Esquecidos).

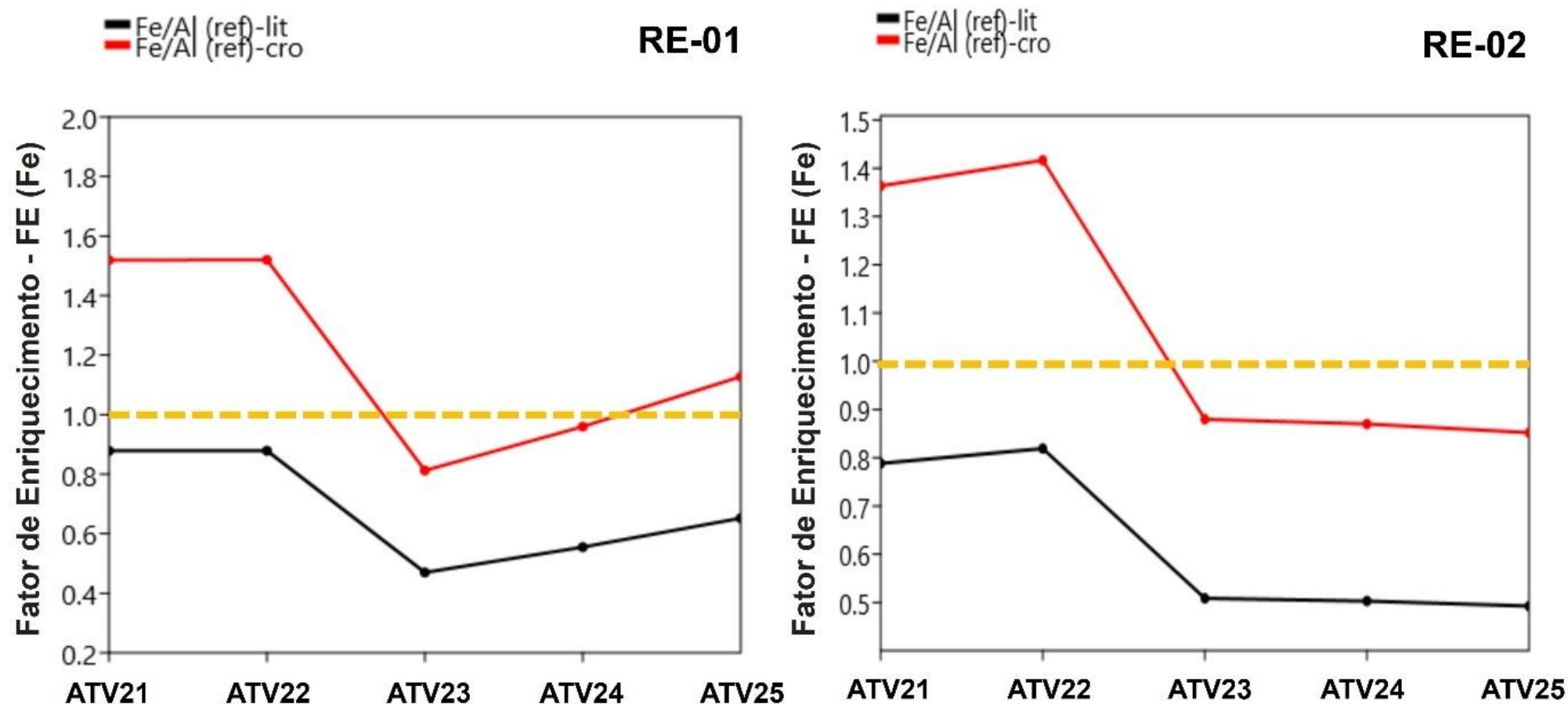
Tabela 7- Resultados isotópicos das amostras de sedimentos coletados nas áreas definidas para o “Novo Ciclo”.

Estação / ATV	Período de amostragem	Toponímia	Localização	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (2 σ)	$\epsilon\text{Nd}_{(0)}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (2 σ)
RE-01- ATV20	04/09/2022			Instalação de armadilha		Instalação de armadilha
RE-01- ATV21	04/09/2022 a 20/11/2022			0,511512(11)	-22.0	0,744043(31)
RE-01- ATV22	20/11/2022 a 12/01/2023			0,5115841(3)	-20.6	0,744909(26)
RE-01- ATV23	12/01/2023 a 19/04/2023			0,51156193(33)	-21.0	0,711944(6)
RE-01- ATV24	19/04/2023 a 11/07/2023			0.511489(54)	-22.4	0.742386(49)
RE-01- ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023			0.511544(18)	-21,3	0.739584(40)
RE-02- ATV19	Não se aplica	Recife Esquecidos	-18.388888 -39.374444			
RE-02- ATV20	04/09/2022			Instalação de armadilha		Instalação de armadilha
RE-02- ATV21	04/09/2022 a 20/11/2022			0,5115312 (4)	-21,6	0,7110389 (11)
RE-02- ATV22	20/11/2022 a 12/01/2023			0,5115475 (4)	-21,3	0,741509(11)
RE-02- ATV23	12/01/2023 a 19/04/2023			-		0,742022(47)
RE-02- ATV24	19/04/2023 a 11/07/2023					
RE-02- ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023			0.511589(23)	-20,5	0.711950(13)
ACA-01- ATV19	Não se aplica	APA Costa das Algas				
ACA-01- ATV20	Não se aplica					
ACA-01- ATV21	04/09/2022			Instalação de armadilha		Instalação de armadilha
ACA-01- ATV22	20/11/2022 a 12/01/2023			(Armadilha não Encontrada)		
ACA-01- ATV23	12/01/2023 a 19/04/2023			(Armadilha não Encontrada)		
ACA-01- ATV24	19/04/2023 a 11/07/2023			(Armadilha não Encontrada)		

Estação / ATV	Período de amostragem	Toponímia	Localização	$^{143}\text{Nd}/^{144}\text{Nd}$ (2 σ)	$\epsilon\text{Nd}_{(0)}$	$^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ (2 σ)
ACA-01- ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023		-20.2 -40.108055	0,511573(4)		0,737798(91)
ACA-02- ATV21	04/09/2022 a 20/11/2022		-20.15 -40.108055	Instalação de armadilha		Instalação de armadilha
ACA-02- ATV22	20/11/2022 a 12/01/2023			0,511545(2)	-18,6	0,741509(11)
ACA-02- ATV23	12/01/2023 a 19/04/2023			0,51157587(37)	-20,7	0,73644245(24)
ACA-02- ATV24	19/04/2023 a 11/07/2023			Amostra de intercomparação entre laboratórios		
ACA-02- ATV25	11/07/2023 a 06/10/2023			0.511618(11)	-21,3	0.738192(35)

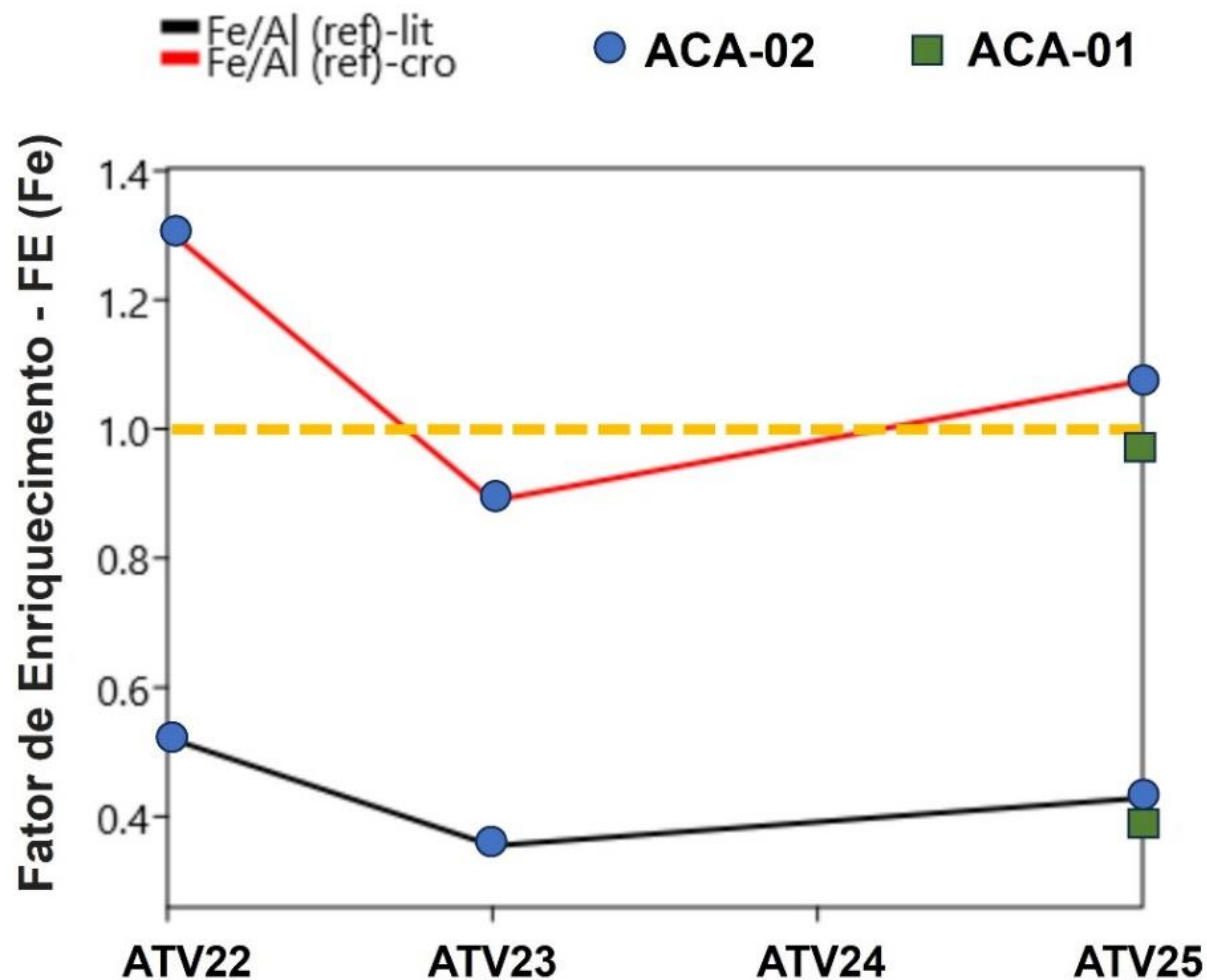
Para o novo ciclo foram utilizados dois valores de referência para os cálculos de Enriquecimento (FE) em Fe nas amostras armadilhadas. O primeiro, já empregado para Abrolhos, refere-se as análises de Fe e Al a partir de em testemunho sedimentar analisado por Netto, 2008, anterior ao rompimento da barragem de Fundão-MG, localizado em Caravelas-BA, o segundo também refere-se as análises de Fe e Al e foi determinado a partir de em testemunho sedimentar analisado por Costa, 2014, anterior ao rompimento da barragem de Fundão-MG, localizado as margens do Rio Piraque-Açu-ES, Figura 38. A razão Fe/Al de referência para Caravelas, a ser empregada para as estações RE-01 e RE-02, foi de 0,69 ao passo que para o Piraque-Açu foi de 1,0, a ser empregada para as estações ACA-01 e ACA-02. Além dessas referencias também foi utilizado valores para Fe e Al da crosta terrestre como valores de referência. Tais valores foram obtidos de Wedepohl (1995) em “Geochimica et Cosmochimica Acta, 59(7): 1217-1232”. Os valores para Fe e Al são 30890 ppm e 77440 ppm, respectivamente.

Figura 38– Fatores de Enriquecimento para Fe em sedimentos armadilhados para a Região de Recife Esquecidos durante o Novo Ciclo.



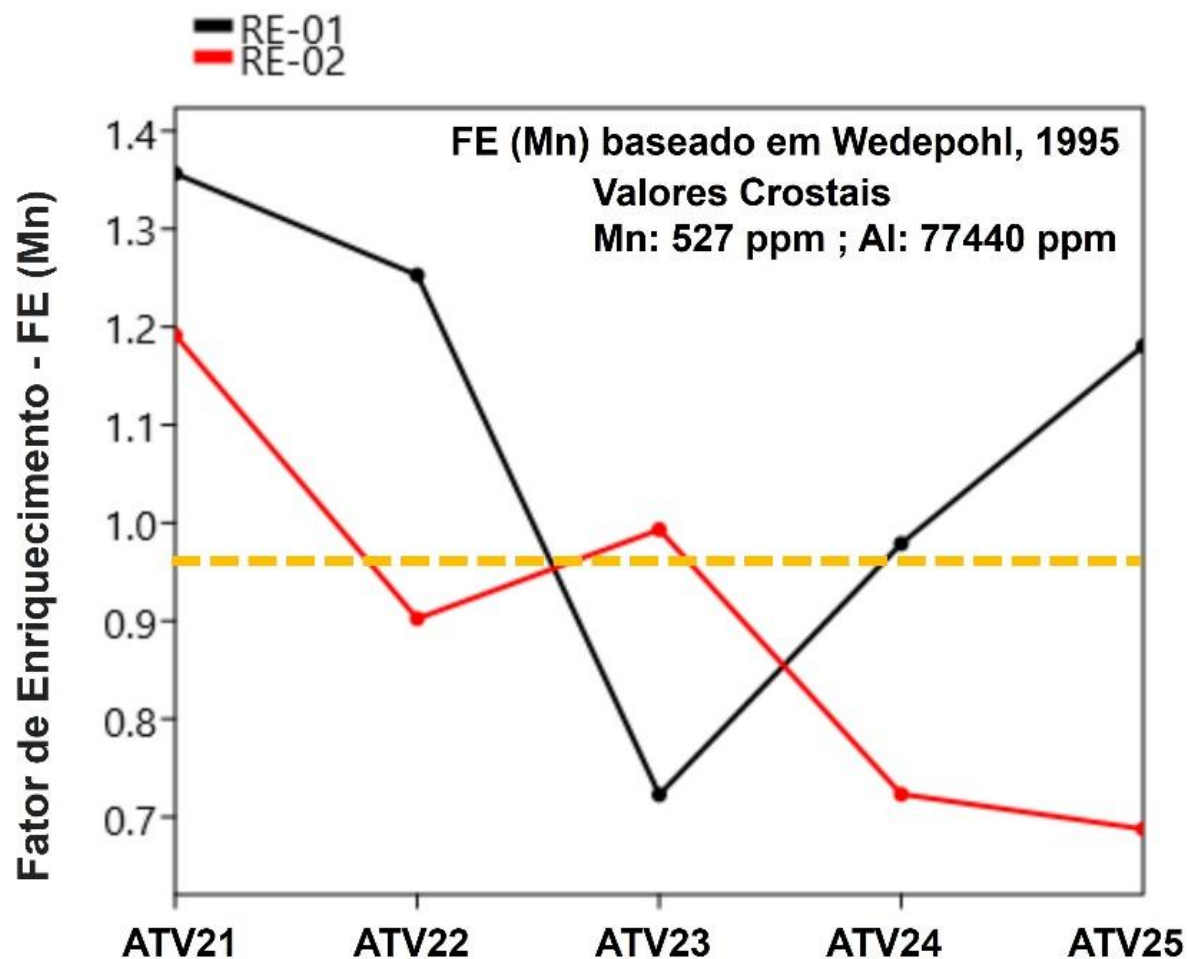
Os resultados para o Novo Ciclo mostraram, em Recife Esquecidos, Fatores de Enriquecimento de Fe importante durante as ATV21 e ATV22, com redução para valores em torno da unidade entre a ATV23 e ATV24, seguindo o mesmo padrão dos resultados de Abrolhos (Figura 38).

Figura 39– Fatores de Enriquecimento para Fe em sedimentos armadilhados para a Região de APA Costa das Algas durante o Novo Ciclo.



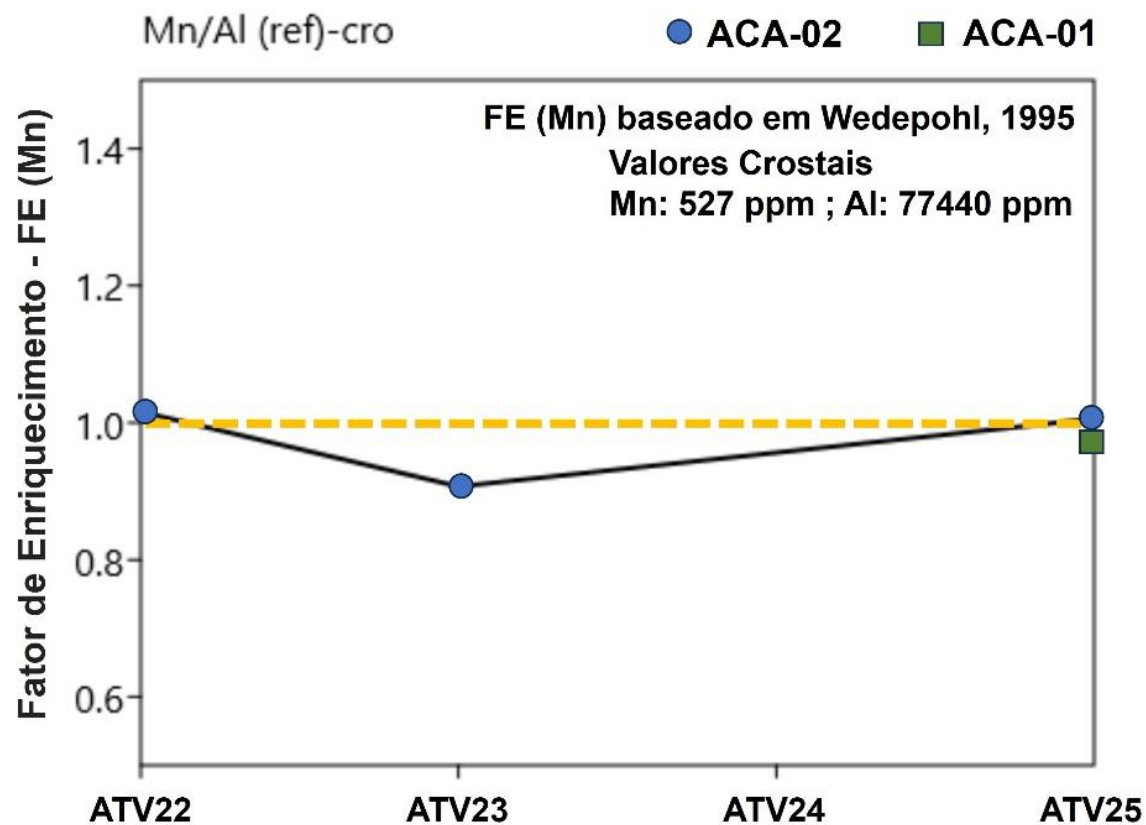
Os resultados para o Novo Ciclo mostraram, em APA Costa das Algas, Fatores de Enriquecimento de Fe importantes durante as ATV22, com redução para valores em torno da unidade entre a ATV23 e ATV24 (Figura 39).

Figura 40– Fatores de Enriquecimento para Mn em sedimentos armadilhados para a Região de Recife Esquecidos durante o Novo Ciclo.



Os resultados para o Novo Ciclo mostraram, em Recife Esquecidos, Fatores de Enriquecimento de Mn importante durante a ATV01 e ATV22, com redução para valores em torno da unidade entre a ATV23 e ATV24. A estação RE-01 apresentou aumento durante a ATV25 (Figura 40).

Figura 41– Fatores de Enriquecimento para Mn em sedimentos armadilhados para a Região de APA Costa das Algas durante o Novo Ciclo.



Os resultados para o Novo Ciclo mostraram, em APA Costa das Algas, Fatores de Enriquecimento de Mn para valores em torno da unidade entre a ATV22 e ATV25 (Figura 41)

3.3 MINERALOGIA DOS SEDIMENTOS NA COLUNA D'ÁGUA

3.3.1 FASE INICIAL: amostragens entre setembro de 2018 e setembro de 2022

Para a mineralogia, os minerais investigados foram Halita, calcita magnesiana, calcita ss, aragonita, quartzo, caulinita (BISH), illita, gibbsita, moscovita 2M1, bassanita, gesso, carbonatofluorapatita 9010506, lepidocrocita, calcita (Mg), talco, albita, Hornblenda ferro magnesiano, nitratina, anortita, fengita 3T, Apatita-(CaF) (contendo Sr), Magnetita, Gibbsita, Siderofilita 3T, Litiana, Moscovita 3T (rica em Si), Apatita-(CaOH), Aragonita (branqueada), Aragonita, Microclina (máximo), Hedenbergita, Doyleita, Cronstedtita 2H2, Chamosita, Calcita de Magnésio, Muscovita 2M1, feldspato (sanidina), Nordstrandita, Dickita (formamida saturada), Caulinita 2M e Marokita. Minerais que foram detectados em pelo menos uma ATV foram os seguintes: Halita, calcita magnesiana, calcita ss, aragonita, quartzo, caulinita (BISH), illita, gibbsita, moscovita 2M1, bassanita, gesso, carbonatofluorapatita 9010506, lepidocrocita, Mg calcita, talco e albita. A análise mineralógica foi tomada neste trabalho como um dos indicadores de impacto em Abrolhos. Entretanto, sua interpretação é de cunho auxiliar em relação àqueles “indicadores primários”, ou seja, os isótopos radiogênicos de Sr e Nd e os enriquecimentos de Fe e Mn”. Uma vez que a zonal recifal se caracteriza por sedimentos contendo elevado teor carbonático, a identificação de uma mineralogia característica de processos erosivos costeiros/continentais pode auxiliar na identificação de aportes de material terrígeno em Abrolhos. Em suma, a análise mineralógica apresentada aqui busca um entendimento sobre a presença/ausência de aporte continental como um todo, sobre a região de Abrolhos, e não, especificamente, sobre uma proveniência da foz do Rio Doce.

Nossos resultados mostraram que a componente principal da mineralogia em AB02, Figura 42, isto é, a estação representativa do arco interno de Abrolho, foi a Calcita magnesiana, a aragonita e pelo argilomineral caulinita (BISH), sendo este último um mineral que deriva dos silicatos de alumínio (principalmente feldspato) e consequentemente tendo ampla distribuição na superfície da terra e nos depósitos sedimentares de granulometria fina, podendo chegar a zona recifal através dos aportes fluviais e erosões costeira. Incursões importantes de caulinita, acompanhada de muscovita ocorreram entre as ATVs 5 a 10 e na ATV15. A ATV14 foi caracterizada pelo alto aporte de quartzo, acompanhado de illita e muscovita, como substitutos dos típicos minerais carbonáticos encontrados na região, evidenciando assim forte presença terrígena.

Figura 42 - Composição mineralógica dos sedimentos armadilhados na Estação AB02, localizada no Arco Interno de Abrolhos.

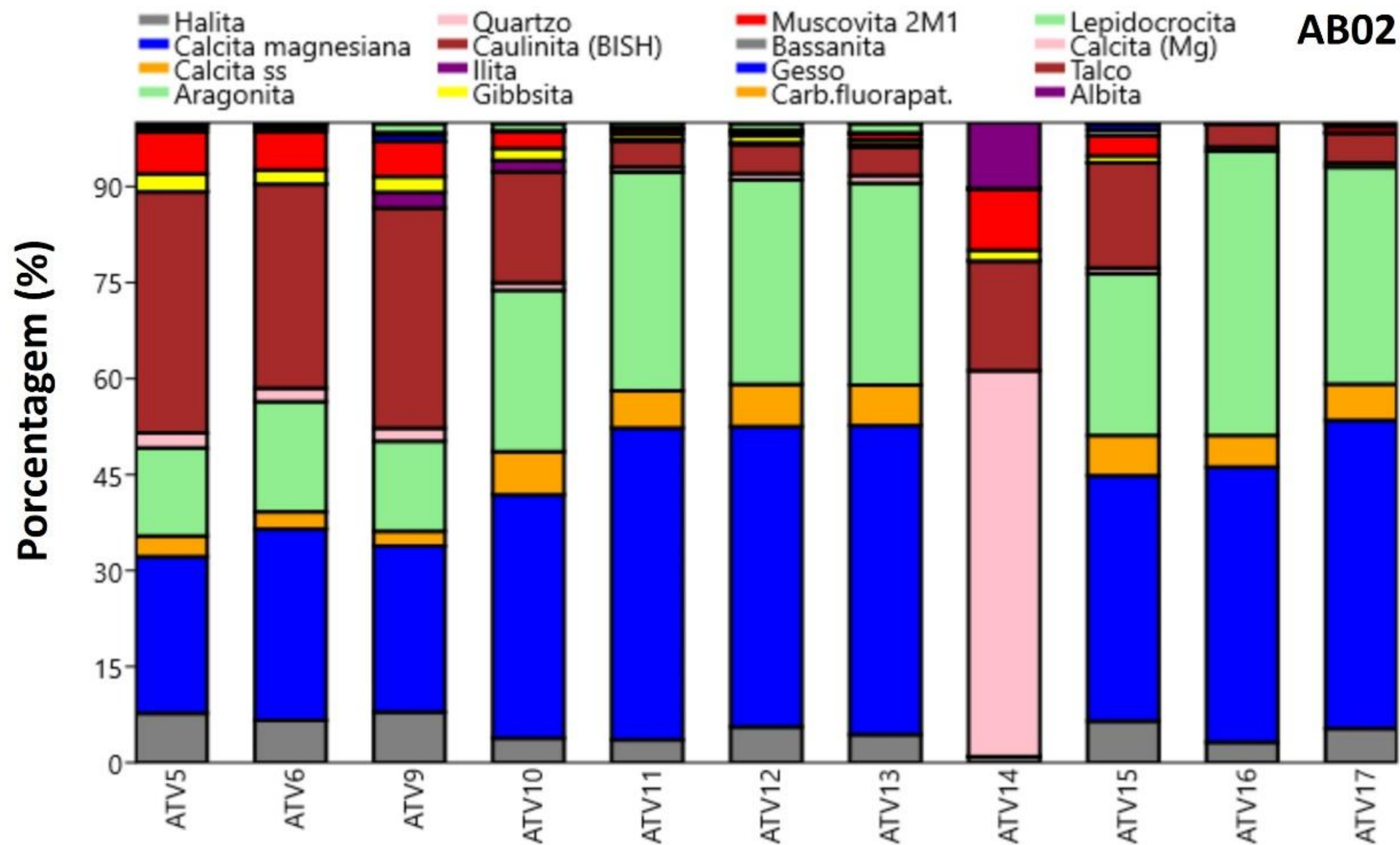
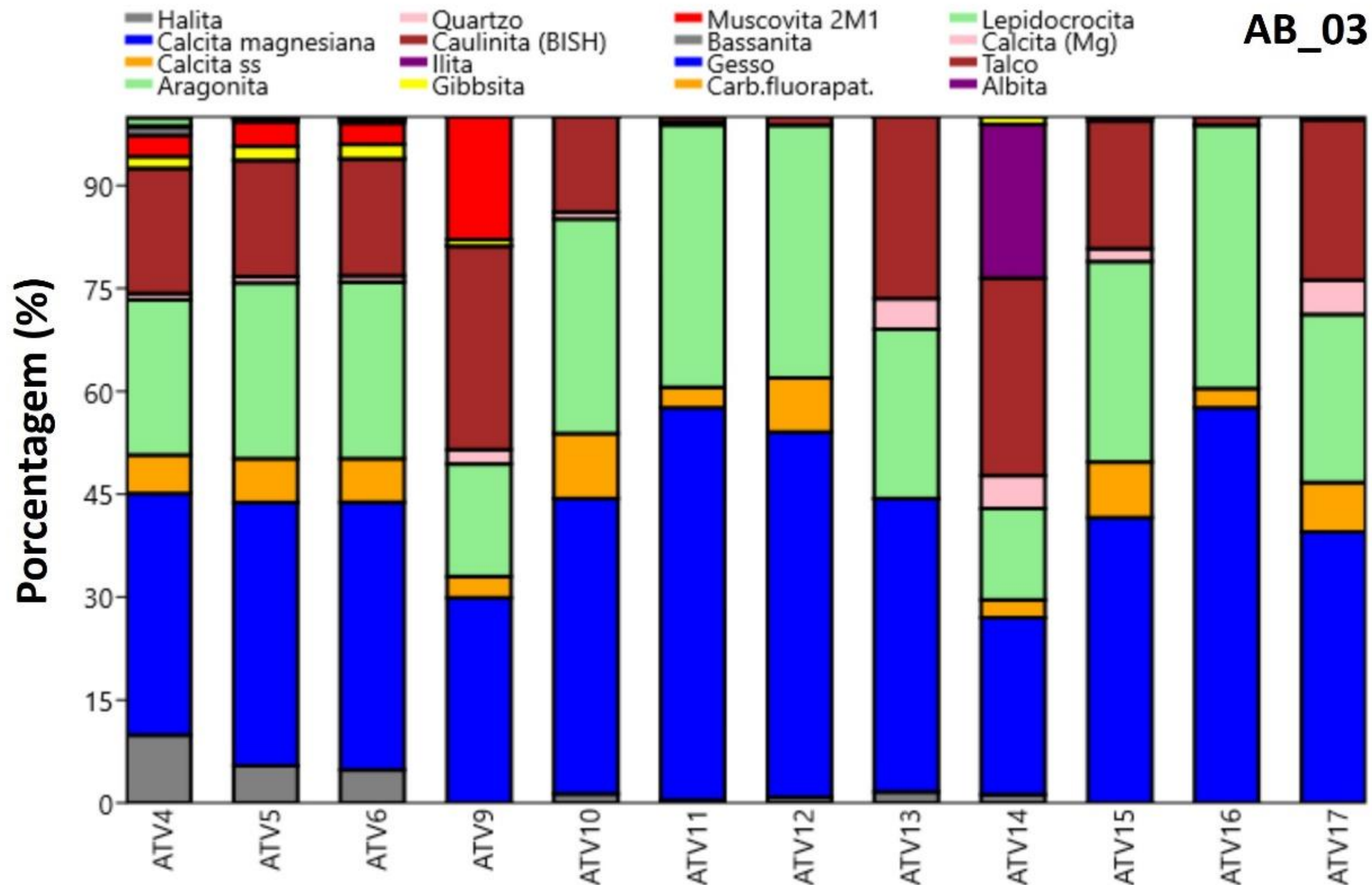
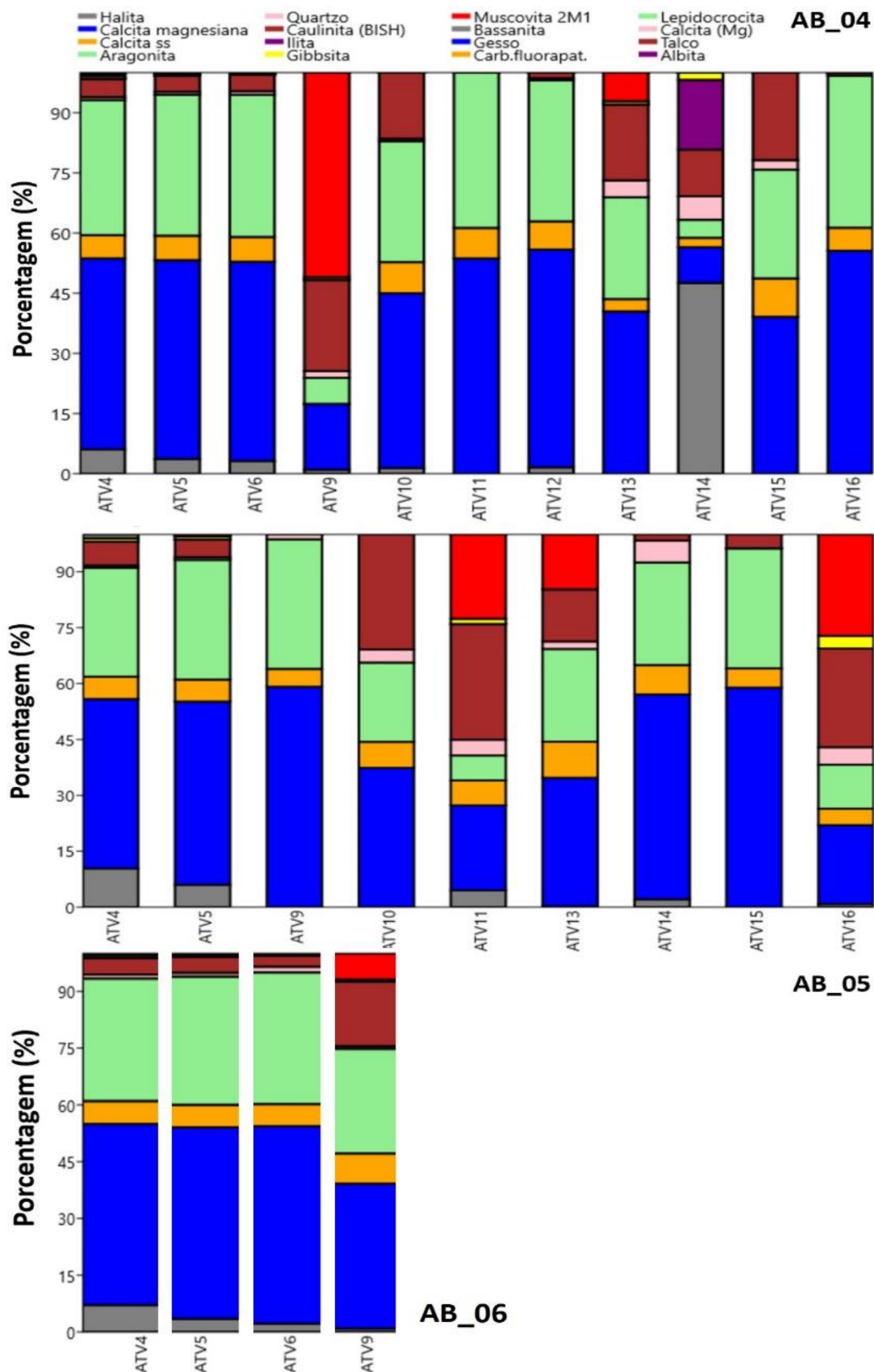


Figura 43 - Composição mineralógica dos sedimentos armadilhados na Estação AB03, localizada entre os Arcos Interno e Externo de Abrolhos.



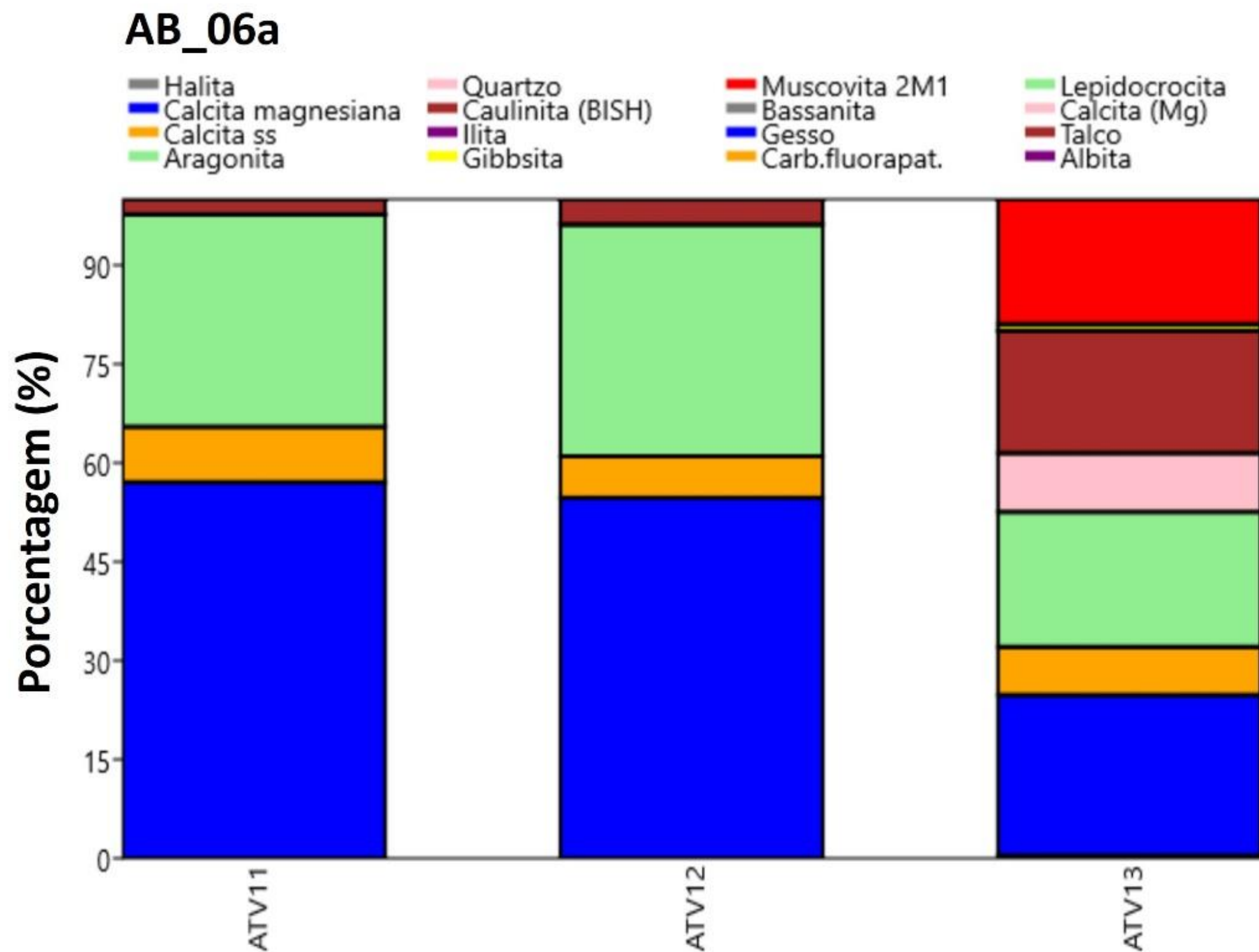
Para a estação AB03, Figura 43, que é o ponto representante da região entre arcos em Abrolho, destaca-se as incursões de caulinita e muscovita na ATV09 e a forte presença de illita na ATV14. A illita é um produto da alteração ou meteorização da muscovita e dos feldspatos. Ocorre com elevada frequência em sedimentos, solos, rochas argilosas sedimentares e em algumas rochas metamórficas e desta forma é bastante empregada como marcador terrígeno.

Figura 44- Composição mineralógica dos sedimentos armadilhados nas Estações AB04, AB05 e AB06, localizadas no Arco Externo de Abrolhos.



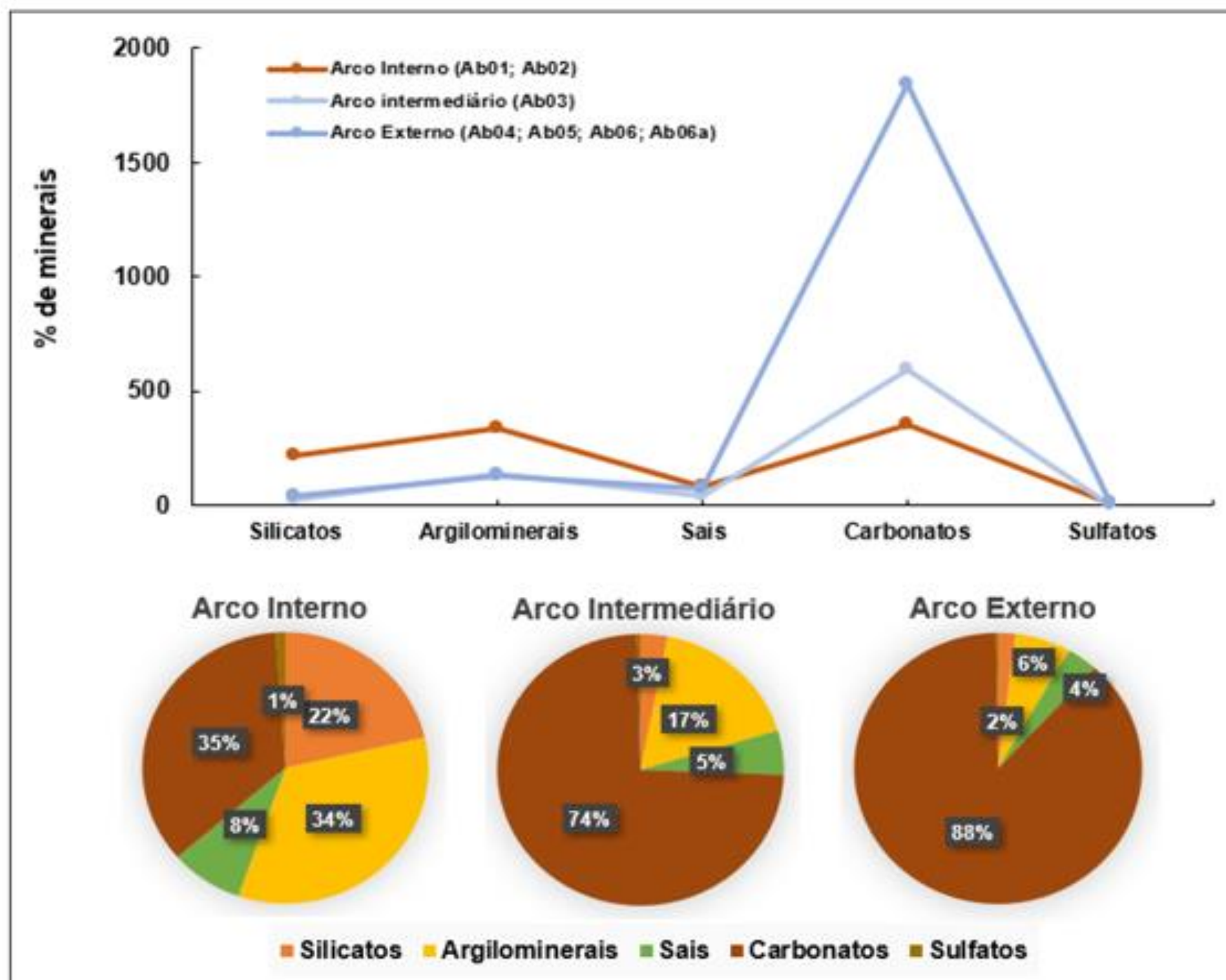
Para o Arco Externo de Abrolhos, são mostrados abaixo os resultados das estações AB04, AB05 e AB06 (Figura 44). Devido suas localizações no PARNA de Abrolhos, os resultados refletem maiores teores de minerais carbonáticos devido a presença de recifes, corais formadores de recifes entre outras fontes biogênicas de carbonatos. Na estação AB04, destaca-se alterações do padrão mineralógico esperado durante a ATV09 com fortes presenças de muscovita e caulinita, o mesmo ocorrendo, porém em menor escala, na ATV13. A ATV14 exibiu o padrão mais anômalo com elevados teores de halita e illita. Na estação AB05, tais anomalias foram observadas nas ATVs 10,11, 13 e 16 e na AB06 apenas na ATV09.

Figura 45 Composição mineralógica dos sedimentos armadilhados na Estação AB06a, tomada como referência neste estudo.



A Estação AB06a apresentou elevados valores de muscovita e caulinita na ATV13, acompanhando o padrão da Estação AB04, apesar de sua localização mais ao norte na região de Abrolhos (Figura 45).

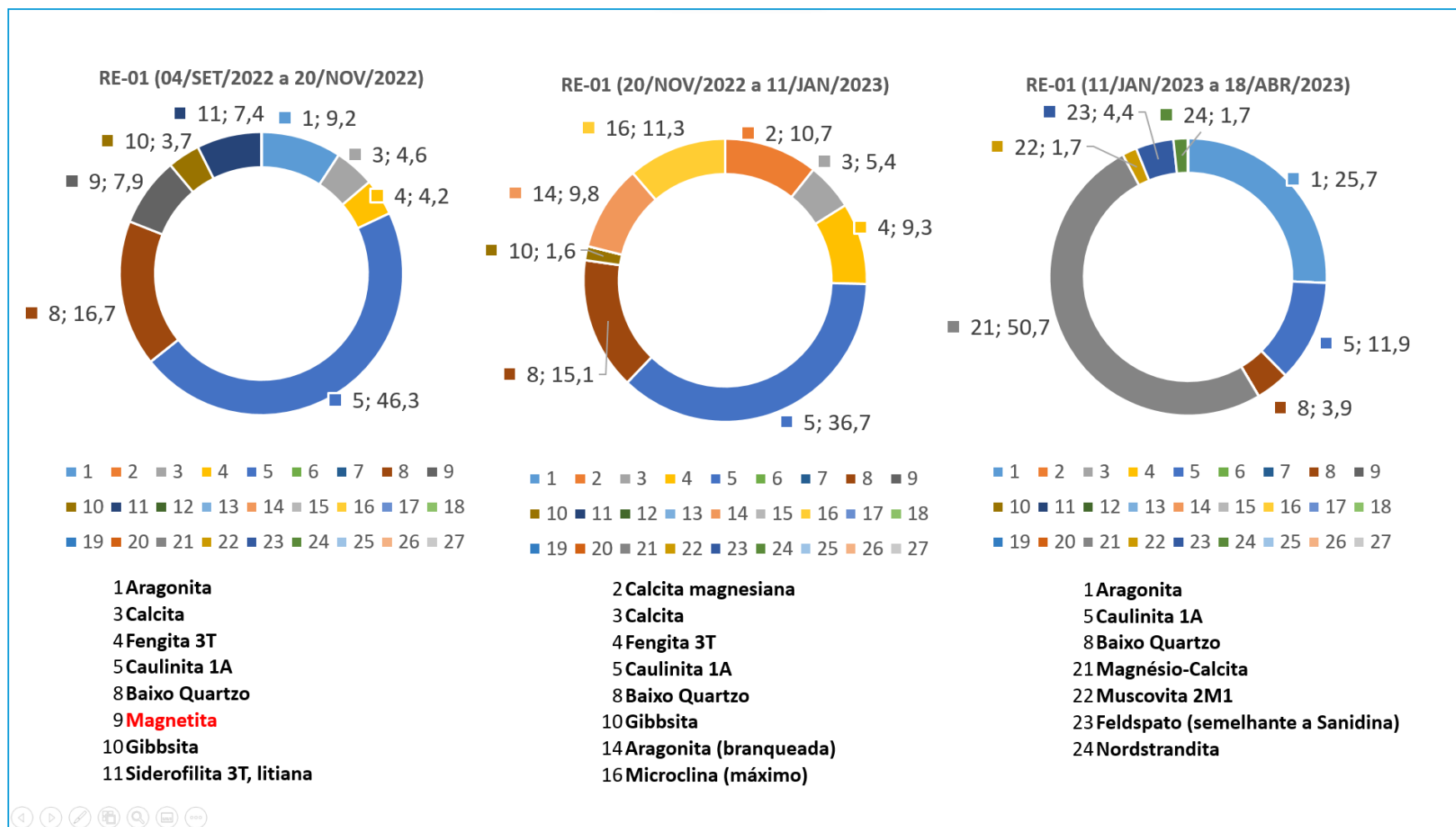
Figura 46- Proporção de minerais nas amostras de Abrolhos distribuídas entre Arco Interno, Arco Intermediário e Arco Externo.



De um modo geral, os resultados de mineralogia evidenciaram 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, podem atuar como indicadores de proveniência continental. 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 resistato, 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 %, Figura 46.

3.3.2 NOVO CICLO DO PMBA: amostragens entre setembro de 2022 e abril de 2023

Figura 47- Proporção de minerais nas amostras de diferentes campanhas para a estação RE-01 (valores em %). A sequência numérica identifica a especiação mineralógica encontrada em cada campanha (ver texto).



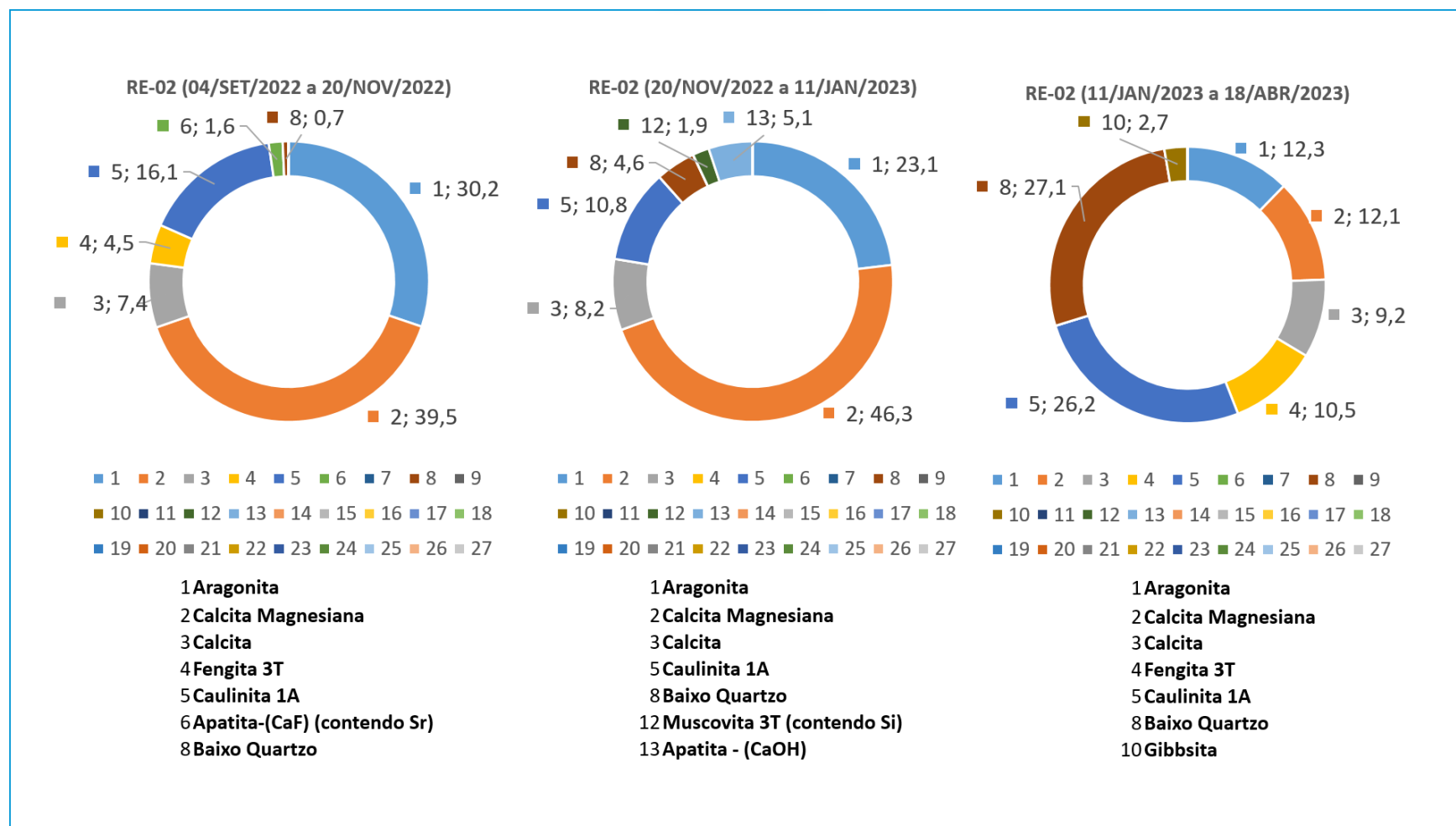
As amostras apresentam, em geral, fases minerais semelhantes, com variações nas intensidades dos picos e na proporção em relação ao total. As fases que surgem com maior frequência são: caulinita, gibbsita, dickita, muscovita (muito frequentemente a variedade fengítica), quartzo, calcita e magnésio-calcita. Outras fases que ocorrem esporadicamente são apatita, magnetita, feldspatos alcalinos, doyleita, norstrandita, chamosita, cronstedtita e hedenberguita.

A análise por difratometria de raios X se vale da combinação entre intensidades e posicionamento de picos principais e secundários, independentemente da quantificação pelo método de Rietveld. A escolha das fases foi feita utilizando-se este critério, associado às pequenas variações de abertura e de posicionamento, da ordem de 0.2 Å a 1 Å, que indicam variações composicionais de acordo com as substituições e vacâncias possíveis nas estruturas cristalinas (Figura 47).

Alguns pontos a considerar:

- Caulinita, dickita, halloysita e nacrita são polimorfos de $\text{Al}_2(\text{Si}_2\text{O}_5)(\text{OH})_4$, e frequentemente ocorrem juntos ou em camadas intercaladas, embora a definição dos picos presentes nos difratogramas permita inferir que a cristalinidade dos argilominerais é relativamente alta. Sendo assim, a presença de halloysita pode ser descartada, mesmo sendo uma das possibilidades em sedimentos marinhos e fluviais, e a estrutura da nacrita preferencialmente se forma em ambientes hidrotermais, o que justificaria sua ausência nas análises.
- Gibbsita, bayerite, doyleite e nordstrandite são polimorfos de $\text{Al}(\text{OH})_3$ e podem ocorrer juntos da mesma forma, a depender do ambiente de formação e das condições de transporte e de deposição. Todos podem ser componentes, junto com outros minerais, de bauxitas e solos altamente intemperizados, e comumente resultam da lixiviação de polimorfos de caulinita.
- As micas comuns possuem estruturas muito próximas entre si, devido à constituição aproximadamente fixa das folhas siloxama e dioctaédricas/trioctaédricas. Filossilicatos do grupo da muscovita também apresentam picos iguais aos do grupo das illitas, contudo, a cristalinidade alta nas amostras analisadas permite inferir tratar-se predominantemente de muscovita, em geral na variedade fengita (contém ferro). São minerais exclusivamente de origem litogênica, assim como os feldspatos potássicos, e, portanto, podem ser utilizados para tomar inferências sobre a rocha-fonte dos sedimentos. Plagioclásios, principalmente cálcicos, são instáveis em ambiente aquoso. Albita, no entanto, pode se formar em sedimentos.
- A amostra de RE-02 da ATV-22 possui uma proporção entre os picos e o ruído de fundo ("background"), presença visível de $K\beta$ e *scattering* que dificultam a interpretação da amostra. Estas características costumam estar associadas a minerais com alto conteúdo em ferro, que não possui uma boa resposta quando incidido por radiação $\text{CuK}\alpha$. No caso, a presença de chamosita, cronstedtita e hedenberguita é condizente com essa condição, mas é possível que esta seja relacionada a outras espécies minerais que possuam alto teor de ferro, mas sem variar seu polimorfo, como é o caso da cronstedtita/bertierina (serpentinhas) e da hedenberguita/diopside (clinopiroxênios).
- Na combinação entre os diagramas, sem o tratamento matemático da identificação das fases, é possível verificar as mudanças entre as localidades e as campanhas de coleta.

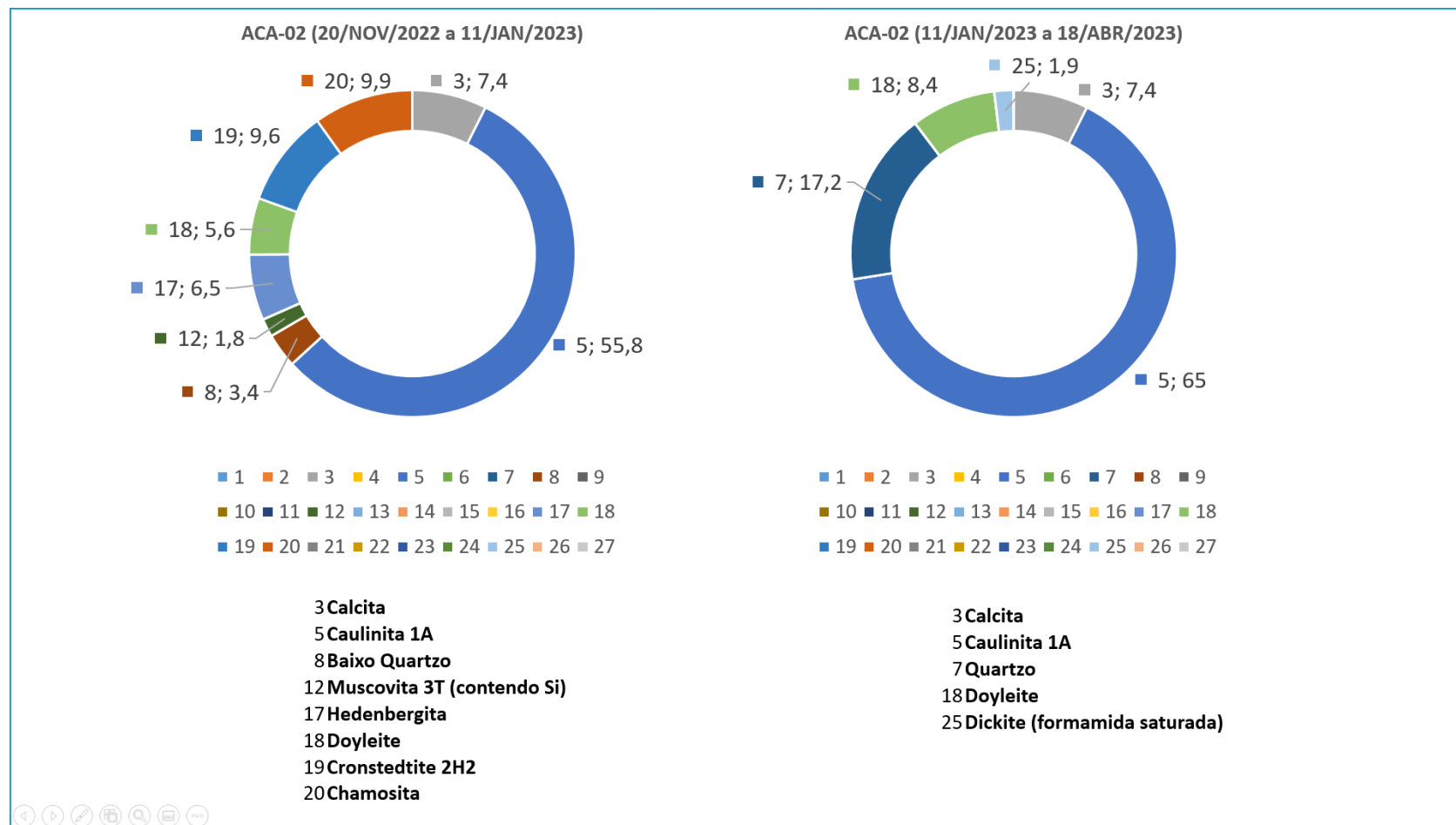
Figura 48- Proporção de minerais nas amostras de diferentes campanhas para a estação RE-02 (valores em %). A sequência numérica identifica a especiação mineralógica encontrada em cada campanha (ver texto).



Para a estação RE-01, localizada próximo a linha de costa, observamos uma importante mudança no padrão mineralógico entre as etapas de amostragens, ATVs. Entre os períodos de inverno e início da fase chuvosa de 2022 (Figura 47), houve o predomínio da caulinita ($\text{Al}_2\text{Si}_2\text{O}_5(\text{OH})_4$) e baixo quartzo nas amostras armadilhadas, normalmente associada a fração argila dos solos e portanto indicando aporte predominantemente terrígeno ou ressuspensão de depósitos acumulados na região. Já no auge da estação chuvosa no verão, quando há forte predomínio dos ventos nos Setores N-NE, houve o predomínio da aragonita e Magnésio-Calcita, refletindo provavelmente os processos erosivos da zona recifal da região de Abrolhos localizada ao Norte e, provavelmente, do próprio Recife Esquecidos. Vale ressaltar que durante o período Setembro-Novembro, quando os sistemas frontais atuam na região trazendo ventos de Sul observamos 7,9% de magnetita (Fe_3O_4) nas amostras armadilhadas. Este dado é corroborado pela assinatura dos isótopos de Sr e Nd, durante a ATV-01, que apresentou a mesma assinatura dos sedimentos que fluem na foz do Rio Doce.

Para a estação RE-02, localizada “*off shore*”, em relação a estação RE-01, praticamente na área central dos Recifes Esquecidos, observamos um comportamento inversão em relação a RE-01 (Figura 48). Durante os períodos de inverno e início da fase chuvosa houve o predomínio da aragonita e calcita magnesiana, caracterizando a influência local do próprio recife, enquanto no auge da estação chuvosa no verão, houve o predomínio da caulinita e baixo quartzo, caracterizando uma influência exógena adicional sobre os sedimentos coletados. Parte desses “sedimentos exógenos” podem ter como origem a foz do Rio Doce pois a assinatura isotópica do material da garrafa de Abril 2023 do sistema automático MacLane instalado em Recife Esquecidos apresentou assinatura isotópica para Sr e Nd semelhante a Foz do Rio Doce.

Figura 49- Proporção de minerais nas amostras de diferentes campanhas para a estação ACA-02 (valores em %). A sequência numérica identifica a especiação mineralógica encontrada em cada campanha (ver texto).



Para a estação ACA-02, localizada a sul da foz do Rio Doce há o predomínio da caulinita durante toda a fase chuvosa. No período Novembro 2022 e Janeiro 2023, observamos quase aproximadamente 10% de chamosita ($(\text{Fe}^{2+}, \text{Mg}, \text{Fe}^{3+})_5 \text{Al}(\text{Si}_3\text{Al})\text{O}_{10}(\text{OH}, \text{Cl})_8$) na amostra armadilhas, Figura 49. Esse mineral de origem metamórfica ocorre em vários tipos de sedimentos ricos em ferro, tipicamente associado a siderita e magnetita (em menor escala a caulinita, quartzo, piroxênios, plagioclásio, olivina, calcita), mas também autígeno formado sob condições redutoras na presença de matéria orgânica decomposta.

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

Implementou-se neste projeto um modelo de mistura isotópica que considera separadamente as principais fontes sedimentares e se baseia nas razões isotópicas de Sr e Nd da fração litológica dos grãos minerais que compõem o sedimento marinho. Para o monitoramento de Abrolhos, os modelos foram empregados na forma ternária tendo como “*end-members*” o Rio Doce-Jequitinhonha-Basaltos de Abrolhos (para o arco externo de Abrolhos) e Rio Doce-Jequitinhonha e Estuário do Caravelas (para o arco interno de Abrolhos). Desta forma, e a partir da amostragem contínua de material particulado sedimentável da coluna d’água, foi possível estimar a contribuição relativa do Rio Doce sobre a região de Abrolhos entre 2019 e 2022 o que evidenciou a presença de traços de rejeito de minério com assinaturas semelhantes as referências coletadas na foz do Rio Doce (nos períodos pré e pós rompimento da barragem de Fundão-MG);

Dentro do período monitorado, os dados isotópicos em sedimentos em Abrolhos mostraram uma sistemática mudança no sentido dos níveis de referência pré-rompimento da barragem de Fundão-MG, sugerindo uma sistemática redução no sinal do Rio Doce para a região de Abrolhos, especialmente para o arco externo;

Uma comparação entre o sinal isotópico em Abrolhos (arco externo), decorrente da foz do Rio Doce, e os ventos de superfície mostra uma clara associação. Os maiores percentuais estiveram associados aos ventos no quadrante SSE e os menores no quadrante NNE;

Quanto aos termos fonte, os sedimentos coletados na região de Santarém e Gualaxo norte, representantes diretos dos rejeitos da barragem (Valeriano et al., 2019), isoladamente não demonstraram ser fontes dos sedimentos de Abrolhos. Isso ocorre porque sua composição é diluída por outras fontes sedimentares ao longo do curso do rio Doce. Sendo assim, mesmo que esteja presente, não é detectada. Isto reafirma os sedimentos da foz do Rio Doce como resultante de todas as misturas de montante, como representativos das fontes a serem consideradas em Abrolhos;

Neste trabalho, combinamos dados de enriquecimento (ou excesso) de Fe nas amostras das armadilhas de sedimentos com os dados de incorporação de Fe em bandas de crescimento de carbonato de cálcio (Evangelista et al., 2023). Os dados de Fe em corais são retrospectivos de 1999 até 2018 quando a colônia foi coletada ainda viva no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. Já os

dados dos sedimentos armadilhados cobrem o período de 2019 a 2022. O alinhamento destas bases de dados evidencia a ocorrência de um “pulso sedimentar” caracterizado por um aumento após 2015, atingindo um máximo em 2019, com posterior decréscimo após 2020 até final de 2022. Este comportamento corrobora o padrão observado pelos isótopos radiogênicos de Sr e Nd;

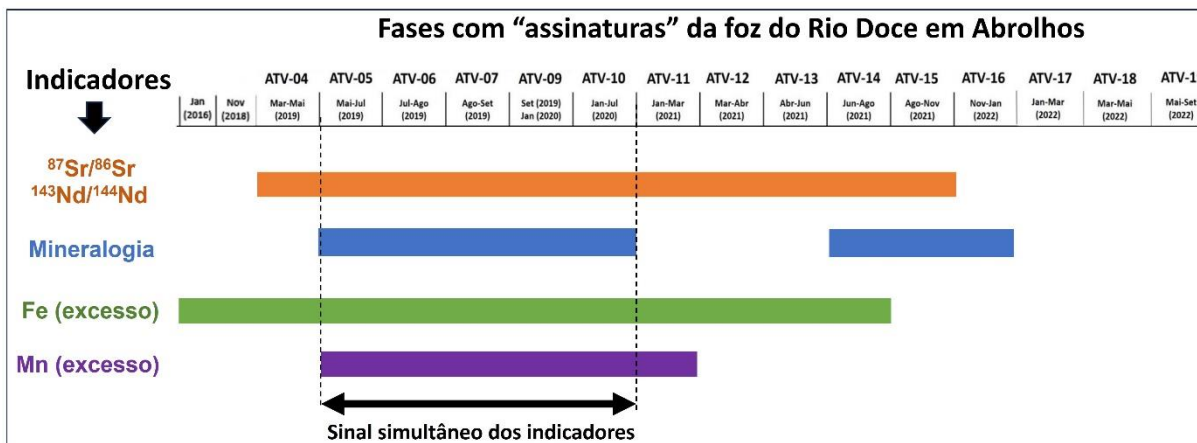
Apesar de observarmos uma redução importante do sinal sedimentológico da foz do Rio Doce em Abrolhos a partir do final de 2021, quando foram atingidos os níveis pré-rompimento de Fundão, dois aspectos devem ser considerados: (1) dados sedimentológicos obtidos no contexto do PMBA/Fest mostraram que há um aumento crescente no potencial de mobilidade do sedimento de fundo depositados nas adjacências da Foz do Rio Doce; (2) na publicação “*Future climate trends of subtropical cyclones in the South Atlantic basin in an ensemble of global and regional projections*”, em *Climate Dynamics*, 2022 (doi:10.1007/s00382-021-05958-8) de Jesus e colaboradores avaliaram pela primeira vez a tendência de longo prazo na climatologia dos Ciclones Subtropicais sobre a bacia do Atlântico Sul sob o cenário RCP8.5. Neste trabalho foram empregadas duas projeções de conjunto compostas por três membros do RegCM4 e seus três GCMs orientados (HadGEM2-ES, MPI-ESM-MR e GFDL-ESM2M) com foco na validação do período histórico (1979-2005) além das projeções futuras para 2050–2080. Esta rodada de modelo empregou a reanálise ERA-Interim. Ambos os conjuntos projetam uma tendência negativa e estatisticamente significativa (ao nível de 90%) na frequência de Ciclones Subtropicais no clima futuro (2050–2080). Uma interpretação para este resultado seria devido, principalmente uma redução de Ciclones Subtropicais durante as estações de transição (outono e primavera), já que no verão austral não há tendências e o inverno apresenta tendência positiva. De Jesus *et al.* (2022) acrescentam que em termos de tempo de vida dos Ciclones Subtropicais, há projeções de uma tendência negativa (não ultrapassando – 20%) para sistemas com duração inferior a 6 dias, enquanto a frequência de Ciclones Subtropicais de longa duração (vida útil de 7 e 9 dias) vai aumentar. Por fim, e mais importante em relação aos estudos de sedimentação costeira no Brasil, os autores demonstraram que em relação à intensidade, esta aumentará em mais de 40% nos cenários avaliados acima. Tais sistemas frontais são responsáveis pelo transporte Sul-Norte de sedimentos da plataforma continental. Ao combinarmos estes dois fatores pode-se perceber que as projeções futuras para a sedimentação em Abrolhos requerem atenção e monitoramento permanente visto que temos um cenário futuro favorável para novos “pulsos sedimentares” naquela região.

Em relação as novas áreas monitoradas no Novo Ciclo, observamos que há forte sinal do Rio Doce tanto em ACA-01, ACA-02 e RE-01 o que evidencia o transporte de plumas de sedimentos em proximidade a zona próximas a linha de costa. Já a localidade RE-02, sobre o Recife esquecidos, mostra que há uma contribuição híbrida do Rio Doce e o Rio São Matheus-ES em proporções próximas a 50%.

Considerando os indicadores empregados neste estudo, sintetizados na Figura 50, ou seja, isótopos radiogênicos de Sr e Nd, enriquecimentos (excessos) de Fe e Mn e mineralogia, pelo menos 1 destes apresentou assinatura do Rio Doce entre janeiro de 2016 e janeiro de 2022. O período entre maio de 2019 e julho de 2020 foi caracterizado pelo sinal simultâneo de todos os indicadores empregados,

indicando que este período foi provavelmente aquele onde o sinal do Rio Doce sobre Abrolhos foi o mais persistente.

Figura 50 - Sumário dos indicadores empregados para a assinatura de origem dos sedimentos armadilhados em Abrolhos.



5 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

- 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 por Microscopia Eletrônica de Varredura (MEV) e EDS 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, a qual 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;

- 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 na fração dissolvida da água do mar em Abrolhos. Em 2019, a equipe técnica de Sedimentação costeira optou em concentrar seus esforços nas análises de sedimentos armadilhados, seja através dos isótopos de Sr e Nd, na análise elementar e na mineralogia, além da calibração de imagens de satélite para MPS (Material Particulado em Suspensão).

- Instalação de boia oceanográfica em Abrolhos

O objetivo da instalação da boia oceanográfica em Abrolhos visava o monitoramento da turbidez, com transmissão de dados em tempo real. Apesar deste item ter sido amplamente 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;

- Utilização do sensor Hobo nas Armadilhas em Abrolhos

O objetivo de utilizar o sensor HOB0 para a obtenção de dados de temperatura era voltado para calibrar imagens de satélite para SST (Sea Surface Temperature). Uma vez que foram obtidos dados estatisticamente suficientes para tais calibrações, não havia mais a necessidade de continuidade de tal monitoramento. Além disso, vários problemas foram encontrados com a instalação de um sensor fixo subaquático nas armadilhas em Abrolhos pois, dependendo da época do ano ou da localidade, há grande acúmulo de limo no visor do sensor o que compromete uma leitura correta no longo prazo. Portanto foram descontinuadas as medições por sensor nas armadilhas AB-01, AB-02, AB-03, AB-04, AB-05 e Ab-06.

- Coleta de testemunhos nas regiões APA Costa das Algas e Recife Esquecidos

No Plano de Trabalho de 2022 está prevista na META 1 - “Consolidar o uso da assinatura de origem dos sedimentos a partir de isótopos radiogênicos” a coleta de testemunho sedimentar de cada região amostral, sendo suas camadas sedimentares datadas por Pb-210”. Em Recife Esquecidos, o substrato consiste em um banco de rodolitos ou fundo arenoso, e, portanto, não caracterizaram zona deposicional de sedimentos e, portanto, apesar de 2 tentativas, tivemos insucesso na perfilagem do sedimento. Como alternativa utilizamos dados da literatura a partir de trabalhos que realizaram testemunhos em regiões próximas e onde foram caracterizados os metais em condições anteriores ao rompimento de Fundão e dessa forma foram utilizados como dados de referência.

6 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,

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.

Costa, E.S. 2014. Geoquímica Depositional de Metais e Hidrocarbonetos no Estuário do Canal da Passagem (VITÓRIA-ES) e no Sistema Estuarino dos Rios Piraque-Açú e Piraque-Mirim (Aracruz ES). Tese de doutorado, Programa de Pós graduação em Oceanografia Ambiental da Universidade Federal do Espírito Santo. Aracruz, p.138;

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 Méridional (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., Raquel L.M. de Paula, Newton Magalhães, Jefferson S. de Gois, Aderval S. Luna, Renata C. Cagnin, Valeria S. Quaresma, Flavia F. Bezerra, Jonathan P. Dia, Roberto V. Santos, Andre Pullen, Stefano Crivellari, Cristiano M. Chiessi, Diego B. Batista, Sergio J. Gonçalves Jr., Bruno V.X. de Oliveira, Pedro A.R. Bizelli, Eduardo D. Sodre, Mariana Angonese, Anna B.J. Oaquist. 2023. Intake of trace contaminants by corals in Abrolhos reef bank (western South Atlantic) during two decades of coastal impacts. Continental Shelf Research 255–10494.

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>.

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>.

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>.

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>.

Pampuch, L. A., & Ambrizzi, T. (2015). Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte I: Climatologia e intervalo de passagem em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. In *Anais do IX Workshop Brasileiro de Micrometeorologia, Santa Maria–RS*.

Pampuch, L. A., & Ambrizzi, T. (2016). Sistemas Frontais sobre a América do Sul Parte II: Monitoramento Mensal em dados da Reanálise I do NCEP/NCAR. *Ciência e Natura*, 38, 105-110.

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>.