

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

RELATÓRIO ANUAL:

Integração da Biodiversidade Marinha

RT-30 RRDM/NOV19

Coordenação Geral

Adalto Bianchini

Alex Cardoso Bastos

Edmilson Costa Teixeira

Eustáquio Vinícius de Castro

Jorge Abdala Dergam dos Santos

Vitória,

Novembro de 2019

COORDENAÇÕES

Anexo 1

Adalto Bianchini (FURG)

Anexo 3

Edmilson Costa Teixeira (UFES)

Fabian Sá (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Alessandra Delazari Barroso (FAESA)

Alex Cardoso Bastos (UFES)

Ana Cristina Teixeira Bonecker (UFRJ)

Anderson Geyson Alves de Araújo (UFES)

Björn Gücker (UFSJ)

Camilo Dias Júnior (UFES)

Daniel Rigo (UFES)

Eneida Maria Eskinazi Sant'Anna (UFOP)

Gilberto Amado Filho (IPJB) *in memoriam*

Gilberto Fonseca Barroso (UFES)

Iola Gonçalves Boechat (UFSJ)

Leila Lourdes Longo (UFRB)

Leonardo Tavares Salgado (IPJB)

Luís Fernando Loureiro (UFES)

Marco Aurélio Caiado (UFES)

Renato David Ghisolfi (UFES)

Renato Rodrigues Neto (UFES)

Rodrigo Leão de Moura (UFRJ)

Valéria da Silva Quaresma (UFES)

Valéria de Oliveira Fernandes (UFES)

Vanya Marcia Duarte Pasa (UFMG)

Anexo 4

Jacqueline Albino (UFES)

Subprojetos

Karla Costa (UFES)

Maria Tereza Carneiro (UFES)

Anexo 5

Diolina Moura Silva (UFES)

Mônica Tognella (UFES)

Anexo 6

Agnaldo Silva Martins (UFES)

Subprojetos

Ana Paula Cazerta Farro (UFES)

Leandro Bugoni (FURG)

Sarah Vargas (UFES)

Anexo 7

Maurício Hostim (UFES)

Jorge Dergam (UFV)

Subprojetos

Carlos W. Hackradt (UFSB)

Fabiana Felix Hackradt (UFSB)

Jean-Christophe Joyeux (UFES)

Luis Fernando Duboc (UFV)

Anexo 8

Heitor Evangelista (UERJ)

Coordenação Técnica (CTEC)

Alex Cardoso Bastos

Lara Gabriela Magioni Santos

Laura Silveira Vieira Salles

Tarcila Franco Menandro

Coordenação Escritório de Projetos

Eustáquio Vinicius Ribeiro de Castro

Patrícia Bourguignon Soares

Paulo Roberto Filgueiras

Valdemar Lacerda Junior

Walter Luiz Alda Junior

Coordenação Núcleo de Atuação Integrada em Rede (NAIR)

Edmilson Costa Teixeira

Karla Libardi Gallina

Andressa Christiane Pereira

Anna Paula Lage Ribeiro

Caroline De Marchi Pignaton

Paulo Eduardo Marques

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	6
2	INDICADORES	7
3	DISCUSSÃO	33
4	REFERÊNCIAS	36

LISTA DE FIGURAS

Figura 1: Abundância relativa das famílias de bactérias Anaerolineaceae e Pirellulaceae nas amostras de sedimento ao longo dos setores do ambiente marinho nas duas campanhas amostrais. A saber, Setor Abrolhos, Setor Norte, Setor Foz do Rio Doce, Setor APA Costa das Algas/REVIS e Setor Sul.	11
Figura 2: Abundância relativa das famílias de bactérias Anaerolineaceae e Pirellulaceae na superfície dos corais <i>Millepora alcicornis</i> e <i>Mussismilia harttii</i> nas duas campanhas amostrais no Setor Abrolhos.	12
Figura 3: Representação da frequência do índice de qualidade ambiental desenvolvido para a comunidade fitoplantônica obtido a partir de dados de densidade numérica e clorofila ativa em amostras marinhas e agrupadas em setores de acordo com as características do ambiente.	15
Figura 4: Representação de dados de escala de diversidade obtidos em amostras de comunidade zooplantônica obtidas em quatro campanhas (1,4, 7, 10) com frequência trimestral e agrupadas em setores de acordo com as características do ambiente.	18
Figura 5: Frequência relativa de ocorrência dos vestígios de conchas de Gastropodas.....	20
Figura 6: Frequência relativa de ocorrência dos vestígios de valva de Bivalvia.....	21
Figura 7: Mapeamento batimétrico no setor Norte. Em destaque são apresentadas estruturas recifais em 3D.....	24
Figura 8: Distribuição espacial de indivíduos de <i>Centropomus paralellus</i> no Rio Doce e Rio Ipiranga.	27
Figura 9: Ranking do Fator de Condição Residual (RCI) de 14 espécies nos rios Caravelas, São Mateus, Ipiranga, Doce e Piraquê-Açú.	29
Figura 10: Representação das 4 localidades com identificação de impactos segundo a utilização do espaço por organismos da megafauna marinha (aves, tartarugas e cetáceos).	31
Figura 11: Identificação dos setores onde a biodiversidade estaria mais comprometida frente aos indicadores de impacto causados pelo rompimento da barragem. Os valores foram normalizados de tal forma que o maior valor corresponda a 1.....	35

LISTA DE TABELAS

Tabela 1: Valores de abundância relativa das famílias bacterianas Anaerolineaceae e Pirellulaceae nas amostras de sedimento marinho e em tecidos de coral. Os valores em vermelho indicam valores superiores aos da campanha anterior. 10

INTEGRAÇÃO BIODIVERSIDADE MARINHA

1 INTRODUÇÃO

Este relatório apresenta a análise integrada dos dados bióticos gerados ao longo do primeiro ano de execução do Programa de Monitoramento da Biodiversidade Aquática (PMBA), executado pela Rede Rio Doce Mar (RRDM), no ambiente marinho adjacente à Foz do Rio Doce, entre Guarapari (ES) e Caravelas (sul da Bahia). Por se tratar de uma análise integrada que visa entender e apontar os impactos, observados e potenciais, em diversos grupos bióticos ao longo da cadeia trófica, aqui, serão apresentados e discutidos apenas os parâmetros bióticos selecionados como indicadores dos impactos causados pela chegada dos rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão no ambiente marinho.

Os indicadores foram definidos a partir de critérios pré-estabelecidos, tais como: dados pretéritos ao rompimento da barragem, dados temporais desde a chegada de rejeito na Foz do Rio Doce e ainda através de comparação com informações em literatura científica especializada. Além disso, os indicadores bióticos foram ainda relacionados aos indicadores abióticos e ecotoxicológicos, tais como presença ou ausência de rejeito no fundo marinho, teores de metais no sedimento e coluna d'água, e o índice de Respostas Integradas de Biomarcadores (IBR). Esta integração incorpora as análises de impacto a partir das comunidades microbiana, planctônica e bentônica, na ictiofauna marinha e estuarina, nos fundos e peixes recifais, e nos vertebrados descritos como megafauna. A ictiofauna marinha e estuarina é apresentada no ambiente marinho considerando que o desenho amostral foi definido a partir da amostragem e relação entre o estuário e a plataforma interna.

A chegada do material com rejeito alterou a condição oligotrófica na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce. Os resultados obtidos entre Novembro de 2015 e 2016, bem como ao longo do primeiro ano de monitoramento do PMBA (2018-2019), mostram o impacto dos parâmetros mencionados anteriormente em aspectos quali-quantitativos de diferentes níveis tróficos da cadeia alimentar marinha.

A partir da integração dos dados ficou evidenciada a resposta dos indicadores bióticos às condições ambientais e à variabilidade temporal e espacial dos indicadores abióticos. O aporte de rejeito no ambiente marinho, sua deposição, seguida de ressuspensão e dispersão, vem ainda causando alterações na produtividade primária, estrutura, composição e funcionamento das comunidades biológicas e criando áreas de alta vulnerabilidade para os grupos de topo de cadeia alimentar. Neste contexto, destacam-se as respostas imediata e temporalmente variável nas comunidades planctônicas e bentônicas, bem como modificações significativas no habitat que indicam áreas de grande vulnerabilidade para cetáceos e quelônios.

2 INDICADORES

A análise integrada dos dados aponta que a chegada do rejeito em alta concentração, misturado com solo e detritos, na porção interna da foz do rio e ambiente marinho adjacente ocasionou um incremento nas concentrações de metais micronutrientes (Fe, Mn e Zn) e traços (Cu, Co e V), tanto na fração dissolvida quanto na fração total. Além desses metais, outros elementos como Al, Cr, Ba também apresentaram aumento em suas concentrações na matriz água (BASTOS ET AL., 2017; GOMES ET AL., 2017).

Os levantamentos e análises realizadas entre Novembro/2015 e Abril/2016, pelo mesmo grupo de autores do presente relatório, evidenciaram um aumento significativo da densidade numérica total do fitoplâncton até 23 vezes maior que aquela observada em amostragens pretéritas, (Petrobras, 2015) na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce. A partir de Abril/2016, foram observadas flutuações da densidade numérica, com valores superiores aos observados nas campanhas anteriores ao rompimento da barragem de Fundão, mostrando que a abundância de organismos não retornou a valores registrados anteriormente à ocorrência deste evento. Esse aumento na densidade numérica fitoplanctônica ocorreu em resposta a um incremento significativo da concentração de nutrientes inorgânicos e metais micronutrientes (Fe, Mn e Zn) e traços (Cu, Co e V) na região.

As alterações nas condições ambientais na região marinha adjacente à Foz do rio Doce, bem como o aumento significativo da densidade numérica fitoplanctônica resultou em um efeito cascata na cadeia alimentar marinha. Acompanhando o aumento inicial da densidade numérica fitoplanctônica, foi observado, em novembro-dezembro/2015, um aumento significativo de quase duzentas 200 vezes na abundância total do zooplâncton, em relação aos valores registrados nas amostragens pretéritas realizadas em estudos prévios na região próxima à Foz do Rio Doce (PETROBRAS, 2015). A partir de janeiro/2016, a abundância retornou a valores intermediários. Foi observada ainda uma alteração na estrutura da comunidade zooplanctônica, com perda imediata de diversidade e aumento na abundância de algumas espécies. Em novembro/2015, cerca de 80% da comunidade zooplanctônica era constituída por indivíduos pertencentes a apenas duas espécies de copépodos.

Dados da comunidade ictioplanctônica obtidos pós-rompimento da barragem de Fundão (janeiro-fevereiro/2016), apresentaram um menor número de táxons quando comparados àquele observado nos monitoramentos realizados na região da Foz do Rio Doce em 1999 e 2014. Em janeiro/2016, foi registrada pela primeira vez larvas que estavam com sedimento alaranjado aderido ao corpo, indicando um contato direto com a lama de rejeito. Em abril/2016, também pela primeira vez na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce, foram observadas larvas com trato digestório destruído. Essas larvas apresentavam maiores concentrações de vários metais, principalmente Fe e Mn, quando comparadas às larvas com trato digestório íntegro coletadas em 2014 e 2015.

A comunidade bentônica também apresentou alterações significativas quando os dados obtidos pelo PMBA são comparados a dados pretéritos. Foram observadas reduções no registro de organismos do

Subfilo Crustacea, Filo Bryozoa, tubos e organismos da Classe Polychaeta, Classes Bivalvia e Scaphopoda. Esses resultados apontaram para uma redução ou desaparecimento de organismos com partes moles no corpo (como dos Filos Nematoda e Platyhelminthe) na região, bem como a presença de conchas e valvas vazias e inteiras (sem fragmentações), indicando a ocorrência de organismos recentemente mortos.

Os indicadores bióticos que foram definidos como evidências do impacto causado pelo aporte de rejeitos no mar estão baseados em comparação com dados pretéritos, evolução temporal pós rompimento, comparação com a literatura específica que define valores de referência ou modelos de classificação e ainda o conhecimento científico consolidado sobre espécies ou gêneros que são indicadores de ambientes estressados, poluídos ou contaminados por metal pesado. Como mencionado anteriormente, os indicadores bióticos aqui selecionados estão baseados em estudos sobre as comunidades microbiana, planctônica e bentônica, ictiofauna marinha e estuarina, fundos e peixes recifais, e vertebrados descritos como megafauna.

As análises microbiológicas visaram inicialmente a descrição das comunidades microbianas no ambiente marinho, seguido da análise de possíveis perturbações em tais comunidades e sua relação com a presença de metais e características físico-químicas.

Os resultados obtidos com as análises da comunidade microbiana no ambiente marinho indicam pequenas alterações na comunidade bacteriana entre as duas campanhas analisadas (campanha 1 – setembro/outubro 2018; campanha 2 – janeiro/fevereiro 2019). Devido ao fato de se tratarem de matrizes distintas (sedimento, água e coral), observou-se comunidades bacterianas formadas por organismos específicos que apresentaram dominância característica para cada uma das matrizes citadas.

De maneira geral, as amostras de água apresentaram maior homogeneidade e pouca dominância de grupos microbianos específicos que pudessem servir como parâmetro na avaliação de possíveis indicadores microbianos. Por outro lado, as amostras de sedimento e coral possibilitaram um melhor monitoramento geográfico e temporal de alterações ambientais.

Neste sentido, alguns grupos bacterianos identificados chamaram atenção devido a sua presença e abundância nas amostras de sedimento na Foz do Rio doce, bem como sua presença em amostras de coral das duas espécies contempladas nesta análise (*Millepora alcicornis* e *Mussismilia harttii*). Desta forma, bactérias pertencentes à família Pirellulaceae estão sendo propostas no presente trabalho como bioindicadores da presença do sedimento do Rio Doce e de metais pesados em corais de Abrolhos. Este grupo bacteriano foi o mais abundante no sedimento da região do Rio Doce com maior concentração de metais (Linhares - RDL) e, ainda, já foi previamente relatado como o mais abundante em sedimentos de outros rios contaminados com metais pesados. Além disso, este grupo possui muitos genes de resistência a metais pesados. A família Pirellulaceae foi encontrada também em sedimentos da Foz do Rio Doce até a região de Abrolhos.

Denota-se também um aumento de sua abundância relativa da primeira para a segunda campanha. Este grupo foi também identificado em amostras de tecido de corais. Deste modo, as bactérias da família Pirellulaceae também estão sendo consideradas como potenciais indicadores dos efeitos provocados pelo sedimento do Rio Doce nos corais de Abrolhos.

As bactérias da família Anaerolineacea também são aqui consideradas como potenciais indicadoras da presença de metais pesados, uma vez que já são reconhecidas literatura por apresentarem um elevado potencial ANNAMOX (oxidação anaeróbia da amônia). Cabe destacar que este grupo bacteriano se apresenta elevados valores de abundância nas amostras de sedimento do Rio Doce, os quais diminuem gradualmente nos pontos amostrais mais distantes da Foz do Rio Doce.

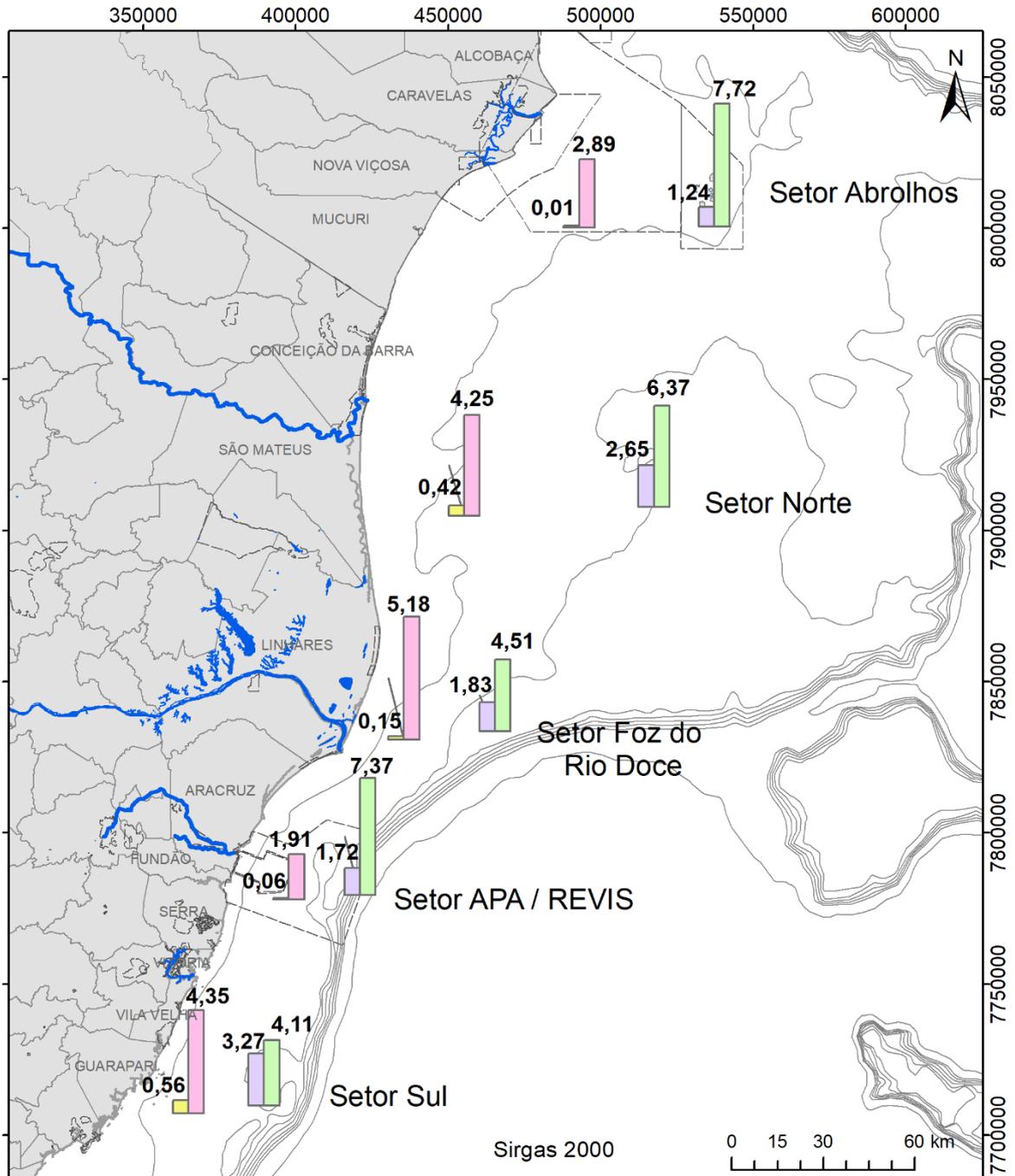
Com base no exposto acima, as famílias bacterianas Anaerolineacea e Pirellulaceae são monitoradas no âmbito do PMBA como possíveis indicadoras dos efeitos do sedimento do Rio Doce na região marinha, bem como do efeito deste sedimento nos corais da região de Abrolhos (Figura 1). Considerando estes bioindicadores, é possível observar a presença considerável destes organismos na região marinha, principalmente nas amostras obtidas na segunda campanha (janeiro-fevereiro/2019). Este fato pode estar relacionado a variações temporais (sazonais), que só poderão ser melhor avaliadas a partir da terceira campanha do PMBA.

Avaliando a presença destes grupos microbianos nos corais de Abrolhos, observa-se uma redução na abundância destes grupos da campanha 1 (setembro - outubro 2018) para a campanha 2 (janeiro - fevereiro 2019). Comparando as duas espécies de corais analisadas, o coral da espécie *Mussismilia harttii* apresenta maior abundância relativa dos referidos grupos bacterianos nas duas campanhas (Figura 2). Isto pode ser explicado pelas diferenças existentes na estrutura do coral, uma vez que o mesmo possui maior teor de muco, o que facilita a aderência e colonização de organismos exógenos.

Tabela 1: Valores de abundância relativa das famílias bacterianas Anaerolineaceae e Pirellulaceae nas amostras de sedimento marinho e em tecidos de coral. Os valores em vermelho indicam valores superiores aos da campanha anterior.

Campanha	Setor / organismo	Anaerolineaceae	Pirellulaceae	
		(%)	(%)	
Marinho	1	Abrolhos	0,01	1,24
		APA	0,06	1,72
		FOZ	0,15	1,83
		Norte	0,42	2,65
		Sul	0,56	3,27
	2	Abrolhos	2,89	7,72
		APA	1,91	7,37
		FOZ	5,18	4,51
		Norte	4,25	6,37
		Sul	4,35	4,11
Corais (Abrolhos)	1	<i>Millepora alcicornis</i>	0,05	4,69
		<i>Mussismilia harttii</i>	0,05	12,25
	2	<i>Millepora alcicornis</i>	0,01	0,38
		<i>Mussismilia harttii</i>	0,03	8,75

Figura 1: Abundância relativa das famílias de bactérias Anaerolineaceae e Pirellulaceae nas amostras de sedimento ao longo dos setores do ambiente marinho nas duas campanhas amostrais. A saber, Setor Abrólhos, Setor Norte, Setor Foz do Rio Doce, Setor APA Costa das Algas/REVIS e Setor Sul.



Abundância relativa das famílias de bactéria Anaerolineaceae e Pirellulaceae no sedimento

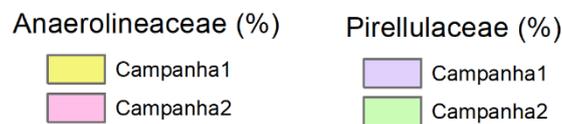
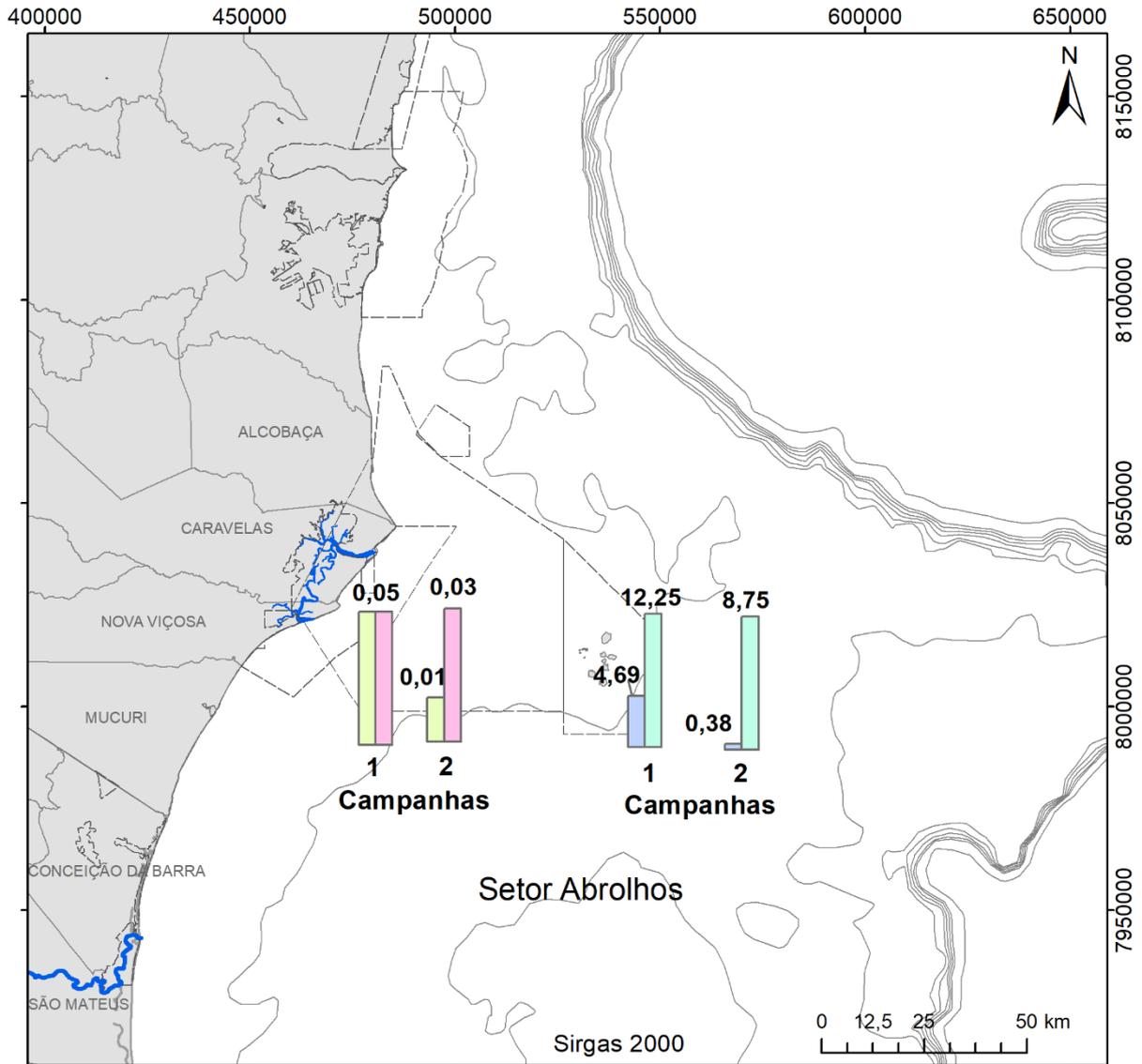


Figura 2: Abundância relativa das famílias de bactérias Anaerolineaceae e Pirellulaceae na superfície dos corais *Millepora alcicornis* e *Mussismilia harttii* nas duas campanhas amostrais no Setor Abrolhos.



**Abundância relativa das famílias de bactéria
Anaerolineaceae e Pirellulaceae
na superfície dos corais
Millepora alcicornis e *Mussismilia harttii* em Abrolhos**

Anaerolineaceae (%)

- Millepora alcicornis*
- Mussismilia harttii*

Pirellulaceae (%)

- Millepora alcicornis*
- Mussismilia harttii*

🌊 Hidrografia Unidades de Conservação

Para compor um índice de qualidade ambiental qualitativo e quantitativo para o fitoplâncton marinho, foram utilizados dois indicadores que comprovadamente sofreram alterações após o impacto da lama de rejeitos, comparando dados pretéritos, a fase aguda do impacto e a fase crônica atual. Esses indicadores foram a densidade numérica de organismos fitoplanctônicos (organismos.L⁻¹) e a clorofila ativa (%), para os quais foi possível ser feita uma análise quantitativa para todo o período monitorado (pré-impacto, pós-impacto agudo e pós-impacto crônico). Neste caso as comparações foram feitas com base em limites de referência definidos conforme os dados pretéritos existentes para a região amostrada. Existem outros indicadores (composição da comunidade e biomassa em clorofila-a) que também evidenciavam alteração de forma qualitativa, mas para os quais, por diversos motivos, não foi possível quantificar os limites de referência: ausência de dados pretéritos, dados pretéritos com localização e/ou frequência amostral incompatíveis com aquelas aplicadas no PMBA, falta de um padrão quantitativo pré-impacto, pós-impacto agudo e pós-impacto crônico.

Foram observadas as variáveis selecionadas em todas as amostras coletadas no primeiro ano do PMBA e os dados foram comparados com aqueles pretéritos ao rompimento da barragem de Fundão, e que estão atualmente disponíveis. Através destes dados pretéritos foram estabelecidas as faixas de variações consideradas como “normais” e calculados os percentuais de amostras que se mostraram dentro ou fora (Figura 3). No caso da densidade numérica, que tendeu a aumentar após o impacto, foram considerados como indicadores de impacto as amostras que apresentaram valores acima daqueles considerados normais. Com relação a clorofila ativa (relação clorofila / feopigmentos), que é uma medida da saúde fisiológica, foram considerados como indicadores de impacto as amostras que apresentaram valores abaixo daqueles considerados normais.

O comportamento da comunidade fitoplanctônica ao longo do primeiro ano do PMBA comprovou a hipótese de que a comunidade tem estado sob a influência de constantes distúrbios intermediários, os quais têm impossibilitado que a comunidade se recupere. O distúrbio frequente na região marinha adjacente à Foz do Rio Doce seria causado tanto pela continuidade do aporte do material oriundo do rompimento da barragem, como pela periódica ressuspensão desse material contido no sedimento. A densidade numérica do fitoplâncton continuou apresentando valores acima dos encontrados em levantamentos prévios à Novembro/2015, apesar de ter apresentado flutuações ao longo do monitoramento. Essas flutuações diferiram nos setores Foz Sul, Foz Central e Foz Norte na região do Rio Doce sugerindo que as condições meteoceanográficas que controlam a dispersão de nutrientes inorgânicos, metais e material particulado em suspensão (MPS) na região, também resultam em respostas diferenciadas na variação da densidade numérica do fitoplâncton.

Flutuações espaço-temporais também foram observadas nos parâmetros que avaliam a saúde fisiológica do fitoplâncton, de forma que uma pior saúde fisiológica foi observada sob condições de maior concentração de metais na coluna d'água. Os menores valores de clorofila ativa foram encontrados próximo ao fundo, em resposta às maiores concentrações de metais nas frações particulada e total próximas ao fundo. Os menores valores médios de clorofila ativa para a camada próxima ao fundo foram observados nas campanhas 7 (51,41 %), 8 (51,87 %) e 3 (57,79 %), as quais

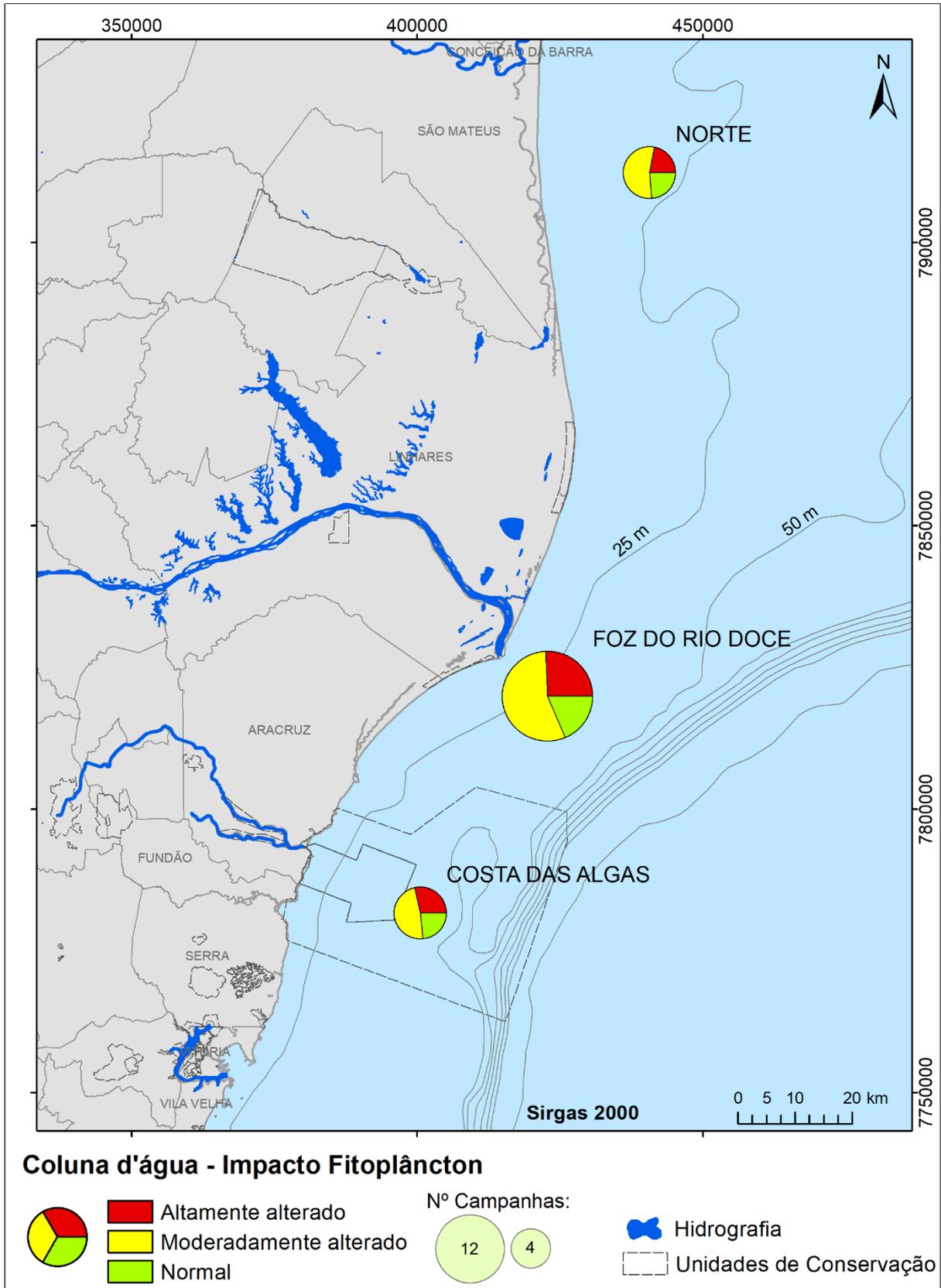
foram precedidas por eventos de aumento da energia de ondas, e conseqüentemente maior mobilidade do sedimento superficial.

Em relação a composição do fitoplâncton, ainda foi observada a dominância de cianobactérias e algas verdes oportunistas nas campanhas caracterizadas por elevadas concentrações de metais na água (exemplo: campanhas 1, 4, 8 e 9). Nessas campanhas também é possível observar uma menor contribuição de cocolitoforídeos (Haptófitas), que são mais sensíveis a mudanças nas condições ambientais, como forte estratificação térmica (BAUMANN ET AL., 2005), aumento nas concentrações de Fe e Zn (Schulz et.al, 2004), e desequilíbrio da razão de Redfield. Vale ressaltar que a composição da comunidade fitoplanctônica também mostrou variação espaço-temporal fortemente associada às variações nas condições ambientais, acompanhando o padrão dos outros indicadores.

A partir das classificações qualitativas para cada indicador (densidade numérica e clorofila ativa), explicadas anteriormente, cada amostra foi categorizada em um índice cruzando as informações dos dois indicadores, da seguinte forma: a) se os dois indicadores apresentaram a classificação “alterado”, o ambiente foi classificado como “Altamente alterado”; b) se um dos indicadores apresentou a classificação normal e o outro alterado ou se só existia um valor de indicador para aquela amostra e a classificação era alterado, então o índice seria “Moderadamente alterado”; c) nos casos em que ambos indicadores apresentaram a classificação normal, ou em casos em que só havia dados de um indicador para aquela amostra e que estava identificado como normal, então a classificação seria “Normal”.

Os percentuais se referem ao número de amostras que indicaram uma das três condições. Para o setores Sul e Abrolhos os resultados foram considerados como inconclusivos, devido à ausência ou insuficiência de dados pretéritos para ser construído um padrão comparativo, além de terem sido feitas apenas duas campanhas. Os resultados mostram que os três setores com dados conclusivos apresentam um padrão semelhante, onde cerca de 25% do tempo a condição está definida como “Altamente alterado” e mais de 50% do tempo, como “Moderadamente alterado”. Apesar das condições de impacto no setor em frente ao rio Doce serem um pouco maiores, o setor APA também apresentou índices bem elevados de impacto alto e moderado. Além disso, florações de espécimes fitoplanctônicos foram observados na subsuperfície das águas de algumas estações amostrais deste setor, sendo isso também um indicador de impacto.

Figura 3: Representação da frequência do índice de qualidade ambiental desenvolvido para a comunidade fitoplanctônica obtido a partir de dados de densidade numérica e clorofila ativa em amostras marinhas e agrupadas em setores de acordo com as características do ambiente.



Os indicadores quantitativos de impacto na comunidade zooplanctônica são os índices ecológicos de Diversidade de Shannon (H') e riqueza de Margalef (d), que podem ser ainda comparados com dados pretéritos. Os valores de diversidade para o zooplâncton foram classificados com base na escala proposta por Cavalcanti e Lazarrábal (2004). Embora, na média, os valores durante o PMBA foram classificados como médios, esses valores estão abaixo dos encontrados em regiões ambientalmente similares como por exemplo, a Bacia de Campos (BONECKER 2006; 2015; DIAS 2010). Análise quali-quantitativa da abundância das espécies *Penilia avirostris* (espécie sensível a diferentes tipos de poluentes), *Paracalanus cf parvus* e *Temora turbinata* (espécies com reconhecida capacidade de adaptação a diferentes tipos de impacto antrópico) também está sendo utilizada para avaliação do impacto.

Dois setores apresentaram resultado de diversidade baixa: Setor Foz do Rio Doce (Isóbata de 10m) e Setor Abrolhos (Isóbata de 20m) (Figura 4).

O Setor Foz do Rio Doce (Isóbata 10m) apresentou diversidade baixa num momento de maior vazão do Rio e altas concentrações de MPS sugerindo que o material que é lixiviado ao longo do leito do rio e transportado até sua foz, pode causar efeitos deletérios na comunidade zooplanctônica através de soterramento, devido aos maiores níveis de turbidez bem como ao déficit nutritivo que pode ser causado pela presença de contaminantes (DAVID ET AL., 2005; HATJE ET AL., 2017). Portanto, este resultado aponta um possível impacto crônico, visto que, em pesquisa realizada dois anos antes do rompimento da barragem de rejeitos de minério, a comunidade zooplanctônica na Foz do Rio Doce apresentava maiores valores de diversidade em relação a toda bacia do Espírito Santo e porção norte da Bacia de Campos (PETROBRAS, 2015).

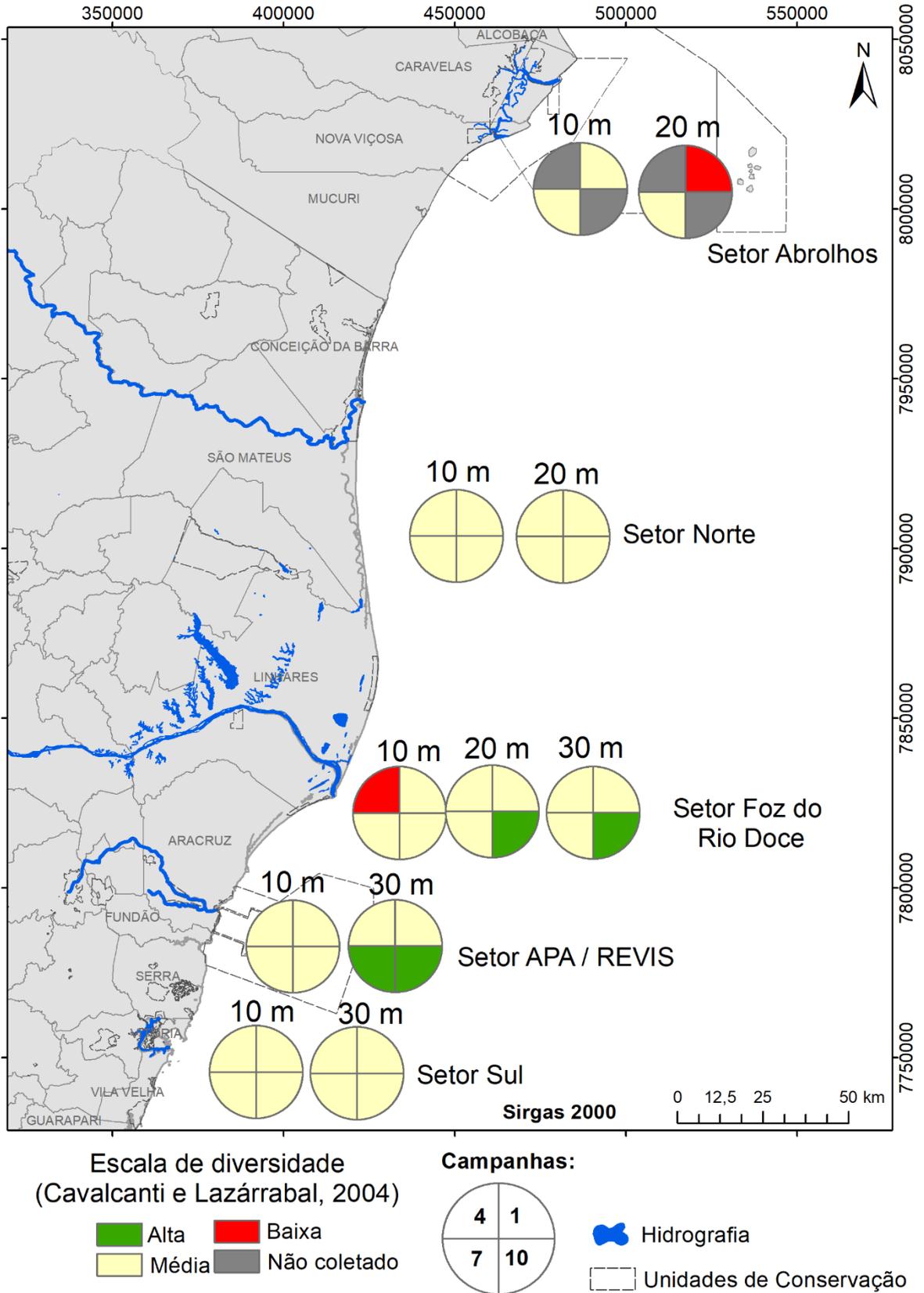
O Setor Abrolhos (Isóbata de 20m) é um ambiente dominado pela influência da Água Tropical que por sua vez é caracterizada por baixos teores de nutrientes refletindo assim em baixos valores de abundância zooplanctônica (EKAU E KNOPPERS, 1999; FIGUEIREDO ET AL., 2018). Além disso, a diversidade dessa região é considerada baixa quando comparada aos demais ecossistemas de recife de coral ao redor do mundo, como já registrado por Alvarez-Cadena et al., (1998) nos recifes do Caribe, onde mais de 87 espécies foram identificadas.

A campanha 1 apresentou baixa diversidade dos organismos zooplanctônicos, o que pode ter sido resultado da dominância de *Paracalanus* spp., cujas altas taxas de mortalidade, ocasionadas por impactos antropogênicos e perda por predação, podem ser compensadas pela sua reprodução contínua e taxa de crescimento rápida em ambientes de alta temperatura e grande disponibilidade de alimento e, por esse motivo, resultam em uma comunidade abundante em formas juvenis, comuns em regiões sob distúrbios ambientais. Além disso, a região do Parque Nacional Marinho de Abrolhos compreende uma área que recebe influência de outras vertentes ambientais e, como já apontado em resultados preliminares referentes à campanha semestral, possivelmente os impactos recebidos nessa região podem ter inúmeras fontes, como por exemplo, do estuário do Rio Caravelas, além da atividade de dragagem que ocorre na região.

Considerando todos os setores, as campanhas que registraram alta diversidade estiveram associadas às isóbatas mais profundas e geograficamente mais afastadas da influência direta do Rio Doce.

No caso do Setor Sul, existe a influência de outras atividades antrópicas realizadas nas regiões metropolitanas de Vitória e Vila Velha, tais como: despejo de efluentes domésticos e industriais, dragagem para atividade portuária, entre outros, que podem estar impactando a comunidade zooplanctônica.

Figura 4: Representação de dados de escala de diversidade obtidos em amostras de comunidade zooplancônica obtidas em quatro campanhas (1,4, 7, 10) com frequência trimestral e agrupadas em setores de acordo com as características do ambiente.

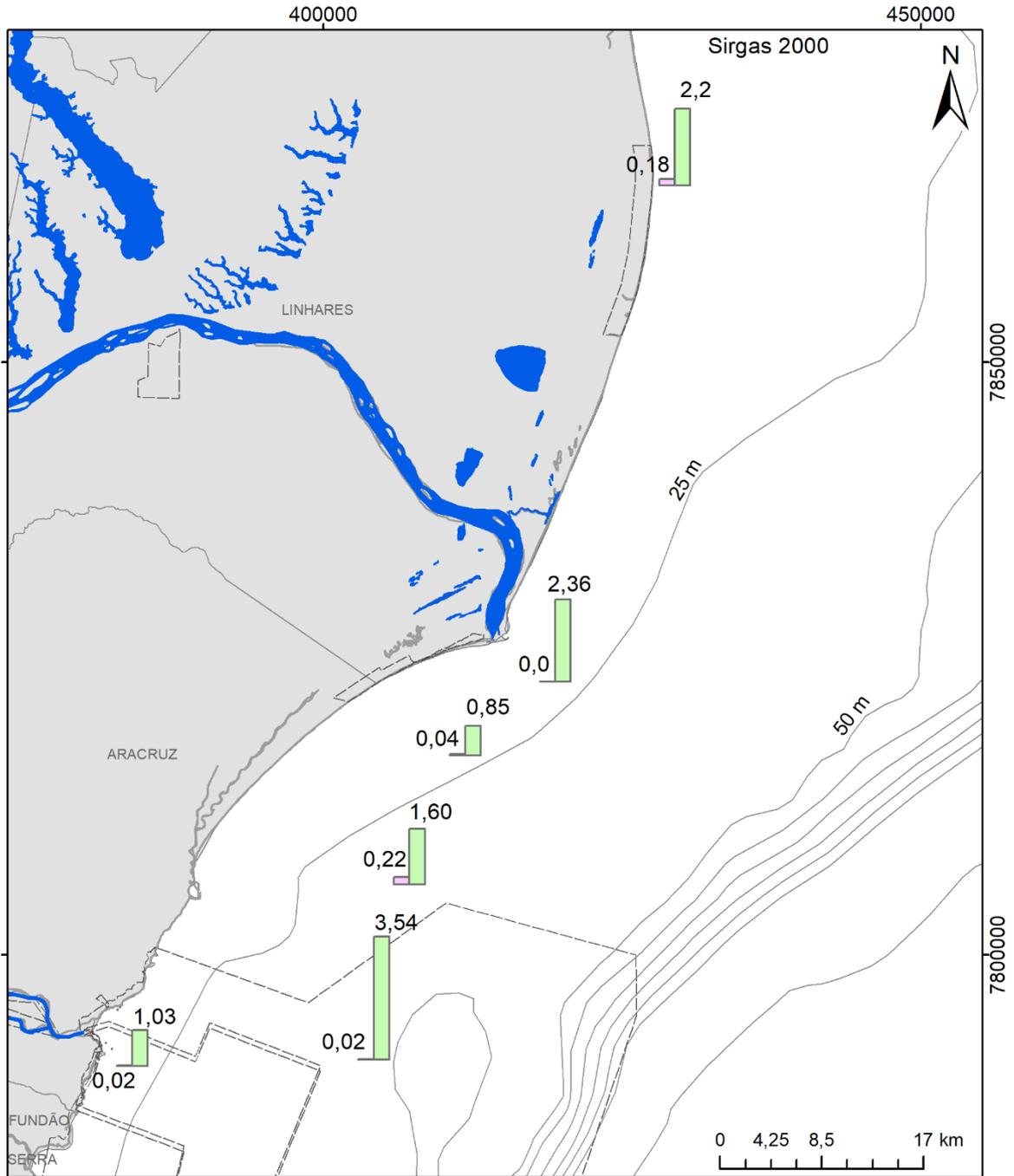


Os indicadores de impacto utilizados com base na comunidade ictioplanctônica foram a densidade de larvas e ovos e a ocorrência de larvas com trato digestório destruído. As densidades de ovos de peixes refletem uma medida de avaliação de estoque pesqueiro, mostrando se houve ou não desova. Densidades inferiores a 20 ovos.100 m⁻³ é uma concentração muito baixa, não sendo expressiva para caracterizar desova e densidades entre 20 - 500 ovos.100 m⁻³ indicam atividade de desova baixa. Portanto, a atividade de desova foi baixa nas duas primeiras campanhas (1 e 4). Já densidades acima de 1.000 ovos.100 m⁻³ mostram alta atividade de desova, como aquelas registradas nas campanhas 7 e 10. Neste sentido, cabe destacar a observação de uma relação entre densidade de ovos e teor de metais na água foi inversa, ou seja, quanto maior o teor de metais na água, menor a densidade de ovos de peixes. Isso significa que a variabilidade temporal observada nas comunidades fito e zooplanctônicas também foi registrada no ictioplâncton. Portanto, as condições ambientais e os teores de metais na água acabam influenciando diretamente esses indicadores bióticos.

A ocorrência de larvas de peixes com trato digestório destruído, na região de estudo, foi observada pela primeira vez nas amostras coletadas pós rompimento, já que dados pretéritos nunca relataram essa anomalia. Para este indicador, foi usada apenas a referência de ocorrência por campanha e localidade. A ocorrência de larvas de peixes com trato digestório destruído na região marinha e costeira adjacente após a chegada da pluma de rejeitos é uma evidência do impacto causado pelo acidente. Larvas com essas características ocorreram desde o Setor Norte até o Setor Sul da área de estudo, com as maiores frequências de ocorrência tendo sido registradas nos setores da Foz e Costa das Algas.

Os critérios para definição de indicadores de impacto com base na comunidade bentônica também utilizaram dados pretéritos coletados pré rompimento da barragem, obtidos ao longo da plataforma do Espírito Santo e Abrolhos. Dois grupos de indicadores foram selecionados: número de vestígios de organismos, indicando uma maior mortandade dos organismos; e ocorrência de grupos tolerantes a impacto antrópico que apresentaram aumento na abundância, quando comparados com os dados pretéritos disponíveis (poliquetas e crustáceos anfípodos). A variação temporal e espacial desses indicadores podem ser observadas na Figura 5 e na Figura 6.

Figura 5: Frequência relativa de ocorrência dos vestígios de conchas de Gastropodas.

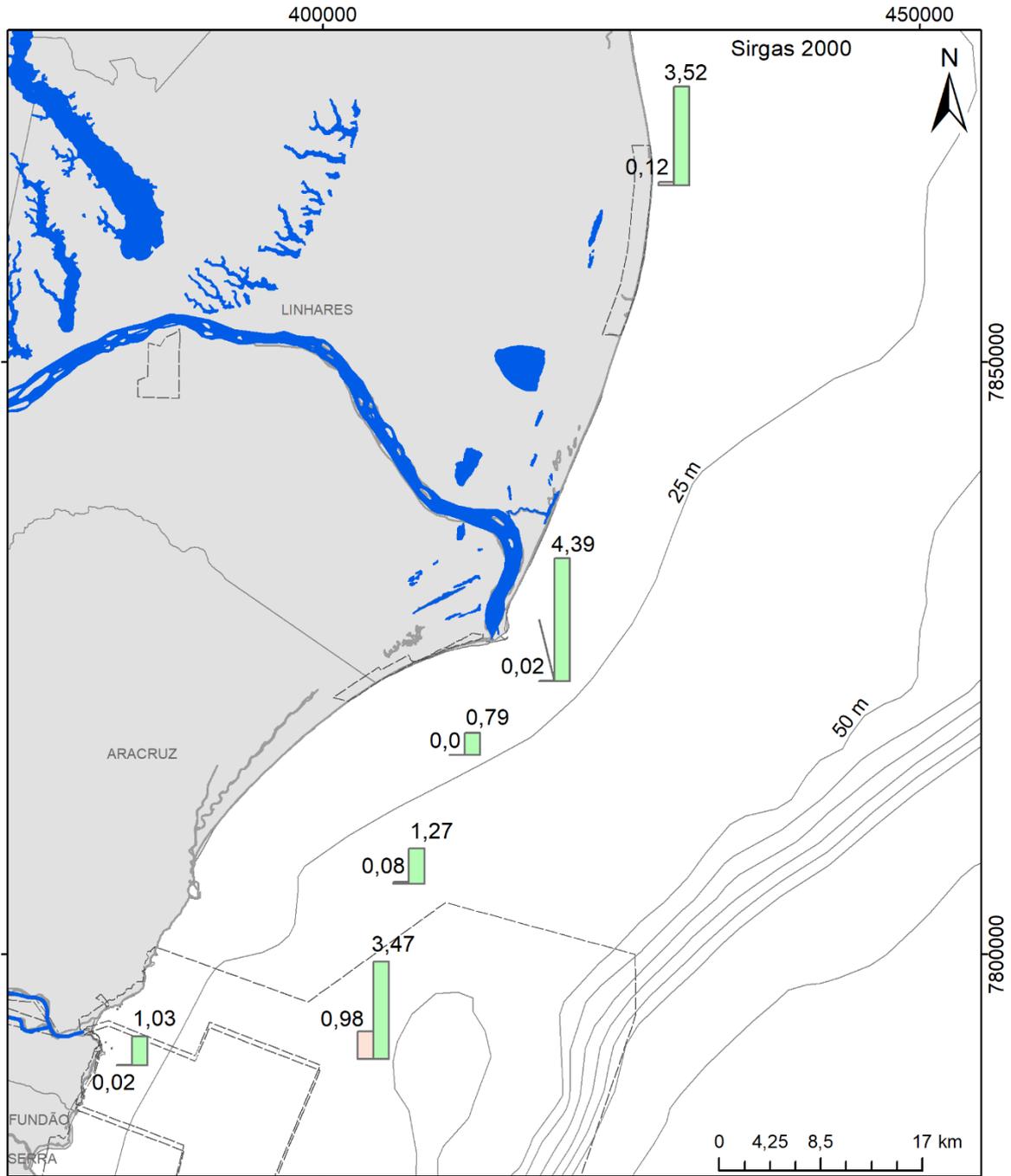


Frequência de ocorrência relativa dos vestígios de conchas de gastropodas

Pré Pós

Hidrografia Unidades de Conservação

Figura 6: Frequência relativa de ocorrência dos vestígios de valva de Bivalvia.



Frequência de ocorrência relativa de valva de Bivalvia

Pré Pós

Hidrografia Unidades de Conservação

O indicador referente a abundância de vestígios de organismos mortos recentemente e de espécies tolerantes a ambientes impactados continua a ser observado no Setor Foz do Rio Doce, com a mesma tendência e padrão que foi observado pós rompimento, entre novembro de 2015 e novembro de 2016. Comparando com dados pretéritos, pré rompimento, o número de vestígios e a frequência relativa de conchas vazias, mesmo com uma variabilidade temporal, apresentam valores superiores ao período de antes do rompimento. No geral, o Setor Foz do Rio Doce apresentou as maiores frequências relativas de conchas vazias (conchas de Bivalvia e de Gastropoda), bem como os menores valores de diversidade e riqueza de conchas. O aumento de vestígios foi observado nos Setores APA, FOZ, NORTE e ABROLHOS.

Estes dados podem indicar a alteração da comunidade, conseqüentemente um aumento na densidade, por espécies de Polychaeta e Crustacea resistentes a impactos ambientais.

Os maiores valores de densidade de Polychaeta registrados em toda a amostragem foram observados na Foz do Rio Doce. Esse tipo de ocorrência é descrito para áreas impactadas, por tratar-se de um grupo resistente a perturbações geradas pelo aporte de poluentes. Os valores de Crustacea Amphipoda apresentaram aumentos seguindo os valores de Polychaeta, entretanto, com números menos expressivos. Este grupo é apontado na bibliografia como indicador de impacto, principalmente por metais.

No Setor APA, além do aumento na ocorrência de vestígios de conchas de Gastropoda e valva de Bivalvia, foi observado um aumento importante de vestígios de esqueletos de Bryozoa, exatamente quando se observa um aumento de larvas do grupo, no zooplâncton. Estes dados evidenciam um efeito a médio e longo prazo dos contaminantes no bentos, que devem se dissipar para as áreas mais profundas da plataforma, quando saem da coluna d'água e atingem o sedimento, levando a resultados mais duradouros.

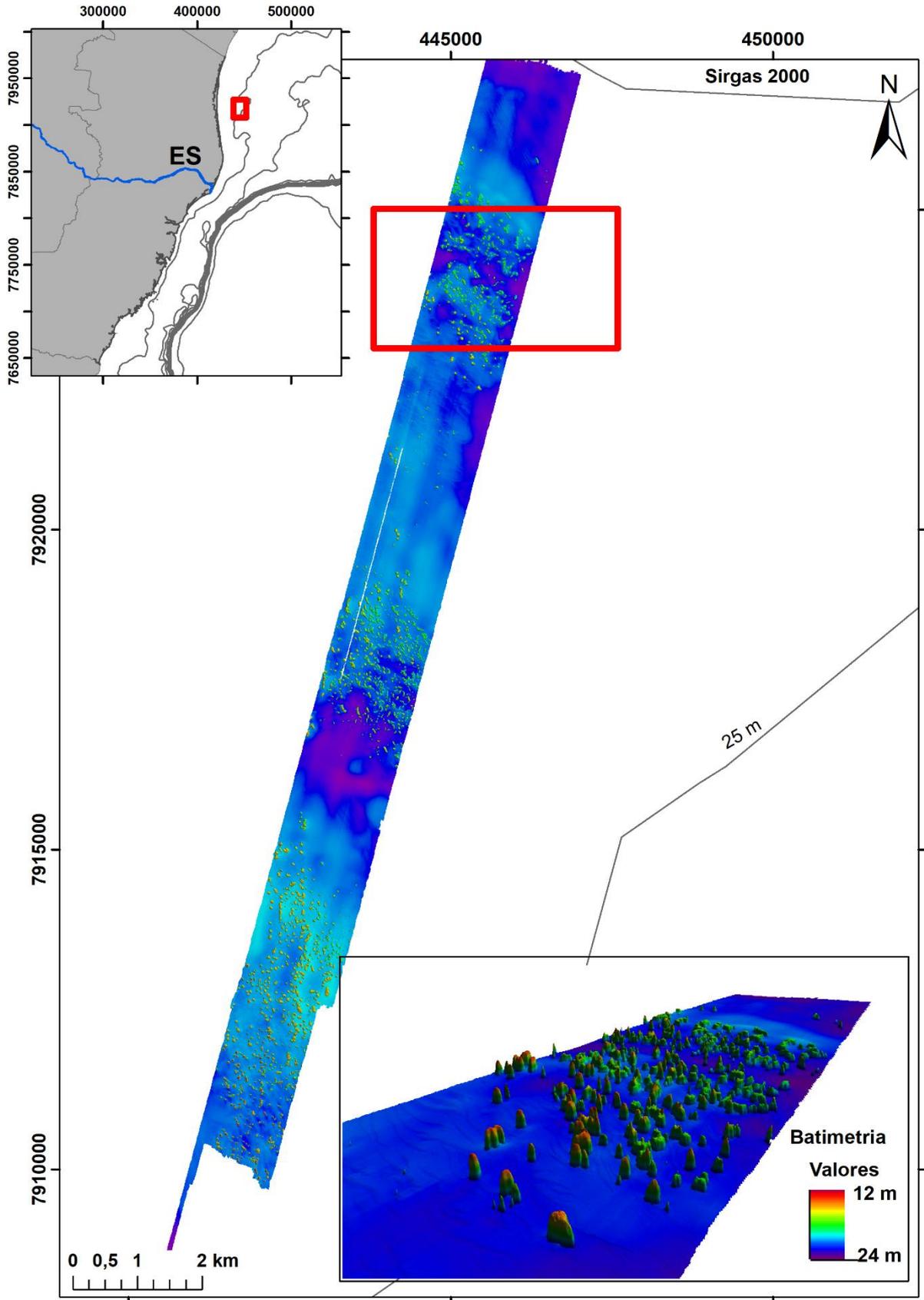
Os indicadores do bentos marinho mostraram efeitos mais duradouros do impacto, com aumento dos seus registros ao longo do período de monitoramento, tanto para os indícios de morte de organismos (vestígios de Gastropoda, Bivalvia e Bryozoa), como para ocupação das áreas por espécies resistentes a impactos ambientais de Polychaeta e de Crustacea Amphipoda. A interpretação que se faz nesse momento é que a comunidade bentônica pode estar apresentando respostas de mais longo prazo ao impacto do aporte de rejeito no mar. A variabilidade temporal observada e os maiores índices e valores de indicadores nos Setores APA e FOZ é um indício desse processo. Possivelmente, o que está ocorrendo é uma alteração na estrutura destas comunidades, decorrentes de substituições de funcionalidade dos seus organismos.

A abordagem de indicadores em ambientes recifais está baseada na vulnerabilidade de cada região diagnosticada ao longo do PMBA, bem como na identificação de indícios de impacto. As áreas recifais estudadas envolvem fundos de rodolitos, recifes biogênicos, recifes costeiros associados a lateritas e macroalgas. Os indicadores de impacto estarão associados as alterações na cobertura bentônica, na variabilidade da produção de carbonato de cálcio medida, na colonização dos recifes (experimentos

com placas), na característica dos sedimentos depositados nos recifes, na saúde dos corais e em indicadores fitoplanctônicos. Por outro lado, a ausência dados pretéritos sobre esses fundos recifais não permitiram uma análise ou comparação dos dados obtidos pelo PMBA com aqueles obtidos antes do rompimento da barragem de Fundão, exceto para recifes de Abrolhos.

Em termos de vulnerabilidade, os estudos do PMBA indicaram um mosaico de diferentes tipos de fundos recifais na APA Costa das Algas (bioconstruções associadas a canais incisos na plataforma, extensão de fundos de rodolitos e concreções de algas calcáreas, que forma fundos recifais e a extensão de recifes lateríticos submersos). No Setor NORTE, o mapeamento dos Recifes Esquecidos revelou, de forma inédita, a estrutura recifal desse sistema pouco conhecido, mostrando a presença de centenas de estruturas recifais pinaculares, isoladas ou coalescidas, concentradas em três áreas (norte, centro e sul) (Figura 7).

Figura 7: Mapeamento batimétrico no setor Norte. Em destaque são apresentadas estruturas recifais em 3D.



Em termos de indicadores de impacto, os resultados do PMBA evidenciaram sazonalidade marcada na cobertura bêntica dos recifes emergentes e adjacentes ao litoral na APA Costa das Algas. Comparação dos resultados do primeiro ano do PMBA, com os apresentados em GOLDER (2016a, b), referentes ao verão de 2012, revelou aumento expressivo na cobertura de *Sargassum* spp. (tolerantes a sedimentos finos), e redução na cobertura de algas calcárias articuladas e *Caulerpa* spp. Além disso, alguns sítios, que são considerados “afetados” pelo rejeito nos estudos prévios, apresentaram redução de ~20% na cobertura total de macroalgas.

As taxas de produção de CaCO_3 nos Recifes Esquecidos ($167 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$) foram menores do que as registradas em Abrolhos e adjacências ($307 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$). O sítio na área sul de concentração de pináculos, foi uma exceção ($249 \text{ g.m}^{-2}.\text{ano}^{-1}$), tendo apresentado maior colonização por CCA, Peyssonneliales e Bryozoa. Não houve recrutamento de corais nas placas (CAUs) instaladas nos Recifes Esquecidos, contrastando com as estruturas localizadas nos recifes de Abrolhos e adjacências. Isso já pode ser um indício de fatores que estão limitando a colonização de corais nessa região. As assembleias bênticas associadas aos pináculos da área sul dos Recifes Esquecidos se destacaram pela alta abundância de zoantídeos, organismos de crescimento rápido e geralmente associados a sedimentação elevada. De fato, as maiores taxas de sedimentação em toda a região de estudo foram registradas nesse sítio, seguida pelo recife Sebastião Gomes em Abrolhos, onde a abundância de zoantídeos também é elevada.

Em Abrolhos, o recrutamento de corais ocorreu nas estruturas instaladas nos sítios costeiros e no Parcel dos Abrolhos. Não houve recrutamento de corais nas estruturas instaladas em banco de rodolitos (A5), onde a produção de CaCO_3 foi dominada por briozoários e CCA e a produção de massa orgânica foi máxima, em função da maior cobertura de macroalgas. As taxas de produção de CaCO_3 no primeiro ciclo do PMBA foram semelhantes às dos anos anteriores ao desastre (REIS et al., 2016).

As concentrações de picocianobactérias do gênero *Prochlorococcus*, cerca de 10 vezes menores do que nas demais áreas, é um indicativo que reflete os maiores níveis de eutrofização característicos do sistema recifal de Abrolhos.

Em termos da dinâmica da cobertura bêntica nos fundos recifais, observou-se que os organismos de crescimento rápido apresentaram maior variação temporal. Neste sentido, a variação sazonal na abundância de macroalgas tendeu a se sobrepor à variação interanual. Macroalgas tendem a responder a contaminação por metais, concentração de nutrientes e pressão de herbivoria (relacionada com o esforço de pesca), mas os indutores dos padrões observados não estão claros. A cobertura relativa de macroalgas foi, no geral, inversamente relacionada com a de *turf* e cianobactérias, sendo que esses últimos são organismos antagonistas dos corais. A despeito da grande variabilidade na cobertura de organismos de crescimento rápido, a cobertura de corais foi estável entre 2015 e 2019. Dentre os corais, no entanto, a abundância de algumas espécies variou significativamente, pelo menos no sítio monitorado continuamente (Pedra de Leste em Abrolhos, com cobertura coralínea de 15%), com aumentos na abundância de *Montastrea cavernosa* e diminuição na de outros táxons (e.g. *Agaricia*

spp., *Favia gravida*, *Millepora nitida*). A análise do conjunto dos dados, pré e pós rompimento, não permite atribuir a variação observada na estrutura de comunidades recifais de Abrolhos e adjacências ao evento.

Os dados acerca da saúde dos corais nos recifes de Abrolhos evidenciaram os efeitos negativos do estresse térmico registrado em escala regional. O branqueamento em massa decorrente do estresse térmico, observado nos Recifes Esquecidos e nos recifes de Abrolhos, embora não relacionado com o rejeito, representa uma dimensão importante do monitoramento em longo prazo, uma vez que compromete a saúde dos corais e pode ser agravado pelos efeitos do desastre.

As assembleias de peixes recifais amostradas na APA, em comparação com os Recifes Esquecidos e com os recifes de Abrolhos, apresentaram menor abundância, biomassa, riqueza e diversidade. As assembleias de peixes recifais nos Recifes Esquecidos foram similares às de Abrolhos, com menor biomassa de alguns grupos alvos da pesca, mas com algumas espécies apresentando maiores abundâncias nos Recifes Esquecidos do que nos recifes costeiros de Abrolhos. A estrutura das assembleias de peixes recifais de Abrolhos, amostrada nos arcos interno e externo, esteve associada principalmente à distância da costa, uma variável que se confunde com a proteção contra a pesca, uma vez que os recifes do arco externo estão inseridos na área do Parque Nacional. A abundância e riqueza de pós-larvas de peixes foi máxima nas áreas protegidas (Arquipélago de Abrolhos ~52%, 50 taxa; Parcel dos Abrolhos ~29%, 47 taxa), e mínima nas desprotegidas (Sebastião Gomes ~10%, 25 taxa; Parcel das Paredes ~8%, 29 taxa).

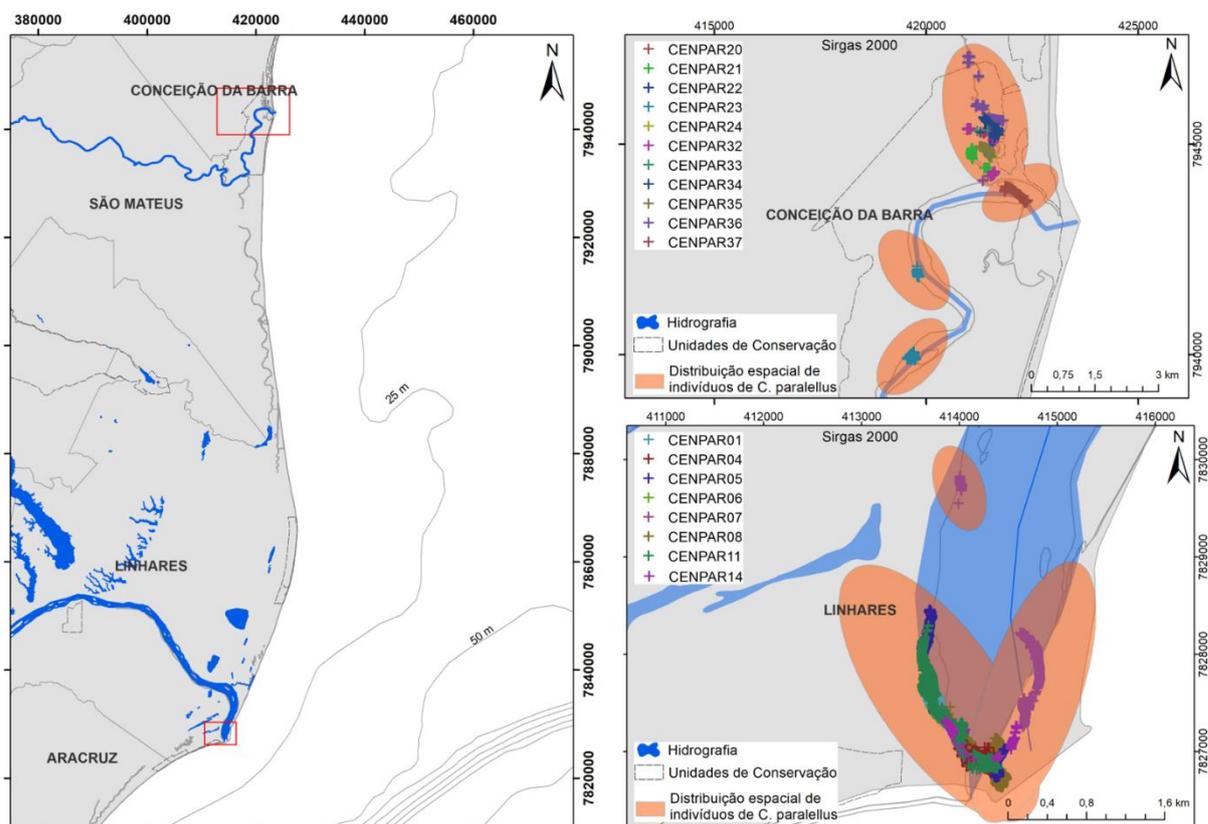
As análises da ictiofauna e carcinofauna estuarina realizadas visaram à caracterização da composição específica, guildas tróficas e distribuição espaço-temporal das comunidades, bem como de populações em cada estação amostral, tendo como base os valores dos índices ecológicos (S, H' e J'), abundância (total, relativa% e CPUA – indivíduos/100m²), biomassa (total, relativa% e CPUA – g/100m²) e dominância das espécies. As análises de telemetria buscaram detectar possíveis impactos avaliando o padrão de movimentação e o uso do habitat para populações de robalos na área diretamente afetada (Rio Doce), comparando com uma área indiretamente impactada (Rio São Mateus). As análises do fator de condição consistiram em analisar a relação entre o peso e o comprimento de espécies através do Índice de Condição Residual (RCI) em 14 espécies de peixes.

A partir da análise dos resultados obtidos ao longo dos 12 meses de amostragem não é possível indicar diferenças espaciais significativas quanto à abundância, biomassa e índices ecológicos calculados para as comunidades de peixes e crustáceos que ocorrem nas áreas amostradas. As diferenças observadas se referem às áreas internas e externas e aos pontos de amostragem nos estuários, sendo passível de uma interpretação envolvendo peculiaridades ambientais de cada estuário e não como uma relação de causa e efeito exclusiva do impacto do rompimento da barragem de Fundão.

No contexto espacial, comparações entre os padrões de movimentação e uso de habitat através da telemetria acústica indicaram diferença significativa na profundidade média dos 19 indivíduos de *Centropomus parallelus* marcados entre os rios estudados. De modo geral, os robalos utilizaram locais

mais profundos no Rio Doce do que no rio São Mateus (Figura 8). No Rio Doce, os indivíduos se concentraram nos canais profundos, acompanhando a margem, não sendo detectados nas áreas rasas no leito do rio. Por sua vez, no rio São Mateus, os indivíduos se dispersaram através dos tributários e em áreas a montante em relação à foz do rio (Figura 8). Tal fato provavelmente se deve ao elevado acúmulo e concentração de lama nas áreas rasas do Rio Doce, o que afeta diretamente a disponibilidade de recursos para a espécie (e.g. refúgios e presas). Além disso, no Rio Doce não foi registrado o deslocamento de indivíduos para áreas a montante da foz. Desta forma, os robalos no Rio Doce se mostram confinados aos poucos canais profundos localizados próximos à desembocadura do rio, não seguindo o padrão típico de utilização espacial da espécie descrito na literatura (DAROS et al., 2016; BOUCEK et al., 2019).

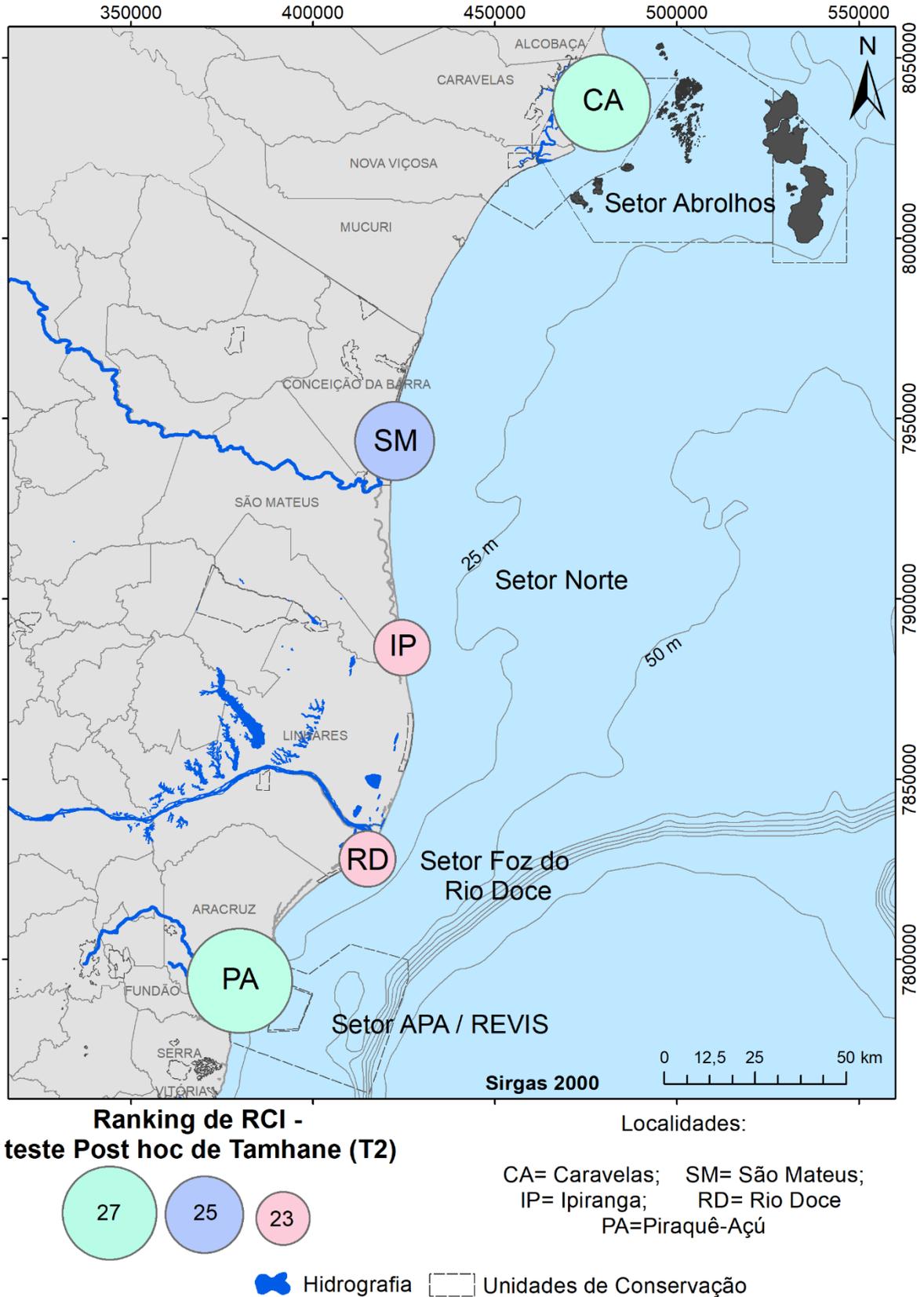
Figura 8: Distribuição espacial de indivíduos de *Centropomus parallelus* no Rio Doce e Rio Ipiranga.



Ainda em relação ao espectro espacial, a abordagem usada para testar a variação do fator de condição (avaliado pelo Índice de Condição Residual; RCI) detectou condição corporal distinta entre as regiões investigadas considerando-se um total de 14 espécies de peixes analisadas. Comparações pluri-específicas evidenciaram menor RCI no Ipiranga e no Rio Doce e maior no São Mateus, Caravelas e Piraquê-Açú (Figura 9). O Ipiranga é um estuário intermitentemente aberto para o mar, e o baixo RCI observado está em concordância com uma possível influência da baixa descarga estuarina e aporte de nutrientes para a zona costeira onde residem as espécies estudadas. Os resultados de condição corporal (RCI) obtidos apresentaram uma tendência inversa à concentração de diversos elementos (e.g., Fe, Mn e Cr) no sedimento: altos teores na região da Foz do Rio Doce, com concentração

decrecendo gradativamente para o norte (em direção ao Ipiranga, São Mateus e Caravelas, nesta ordem) e bruscamente para o sul (em direção ao Piraquê-Açu). O padrão observado no RCI pode, portanto, ser uma resposta negativa da ictiofauna estuarino-costeira ao impacto decorrente do rompimento da barragem de Fundão. Em médio prazo, a condição corporal reflete uma ampla gama de fatores abióticos e bióticos ao qual um organismo está submetido (LATOURE et al., 2017). No entanto, o uso de múltiplas espécies em estudos de longo prazo tem sido bem-sucedido para evidenciar fatores exógenos que influenciam a condição em nível de comunidade (BROSSET et al., 2015; LATOUR et al., 2017). Baseado nos valores do rank total obtido através dos testes *post hoc* de Tamhane (T2), foram obtidos os seguintes valores de RCI: Piraquê-Açu (27), Caravelas (27), São Mateus (25), Ipiranga e Rio Doce (23) (Figura 9). Estes valores mais baixos indicam de forma bem generalizada que para todos os peixes analisados a maior probabilidade do RCI ser inferior é nos estuários dos rios Doce e Ipiranga. Por conta da generalização desse resultado, foi dada uma interpretação moderada para esse indicativo de impacto.

Figura 9: Ranking do Fator de Condição Residual (RCI) de 14 espécies nos rios Caravelas, São Mateus, Ipiranga, Doce e Piraquê-Açú.



A análise sobre o impacto na megafauna foi realizada baseada no potencial de vulnerabilidade das populações de aves, quelônios e cetáceos, considerando seu habitat e área de alimentação. Dessa maneira, a partir das várias metodologias empregadas, foram definidas 4 áreas distintas que mostram os diferentes aspectos relacionados à vulnerabilidade desses organismos (Figura 10).

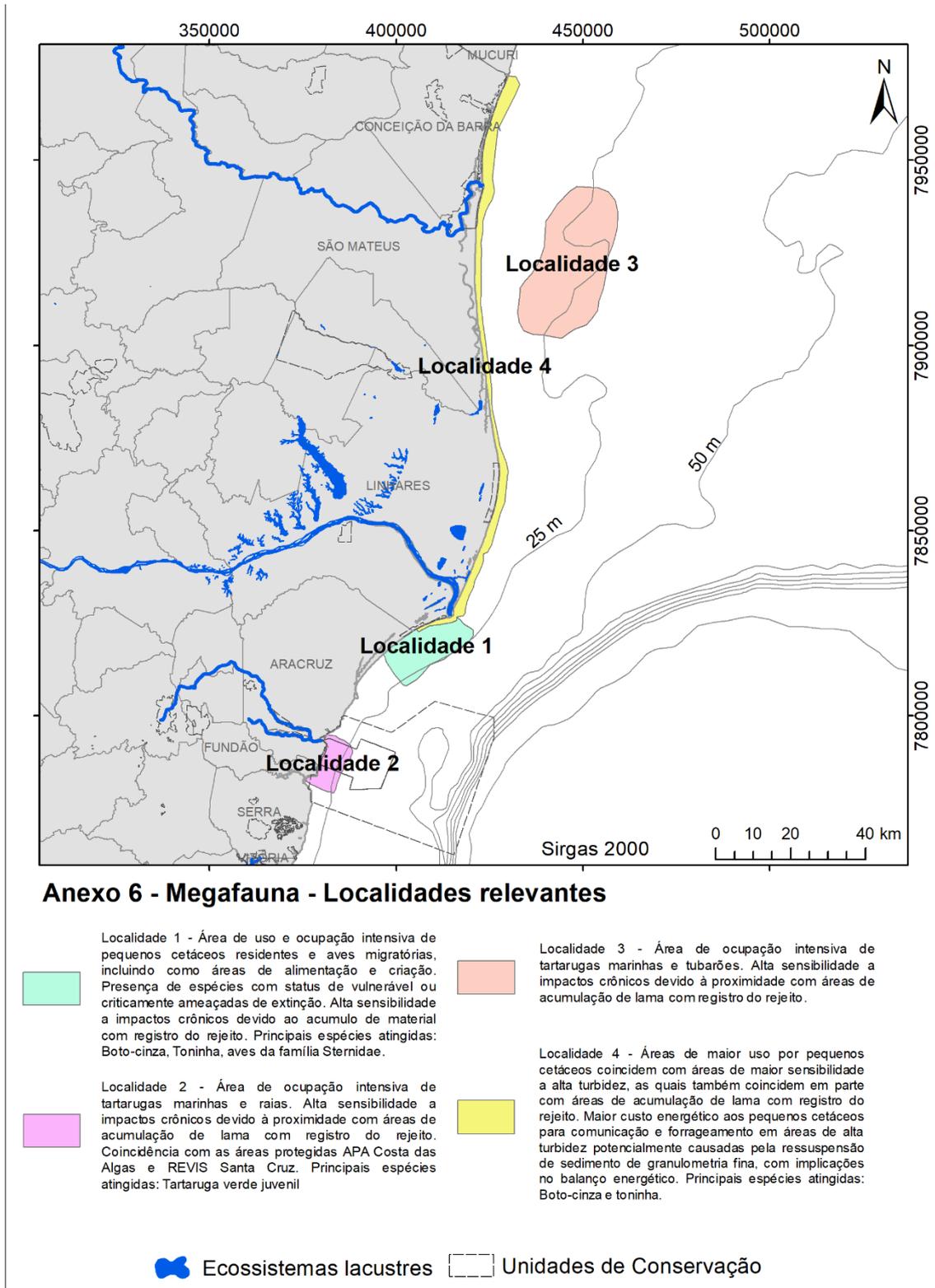
Localidade 1: Região costeira localizada entre a Foz do Rio Doce e 20km ao sul desta, sendo delimitada pela isobata de 30m de profundidade. Área de uso e ocupação intensiva de pequenos cetáceos residentes e aves migratórias como locais de alimentação e criação. Registra-se, nessa área a ocorrência de espécies com status de vulnerável ou criticamente ameaçadas de extinção. Além disso, essa região demonstra alta sensibilidade a impactos crônicos devido à presença de grande acumulação de lama de rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão. Neste caso, as principais espécies atingidas são: o boto-cinza (*Sotalia guianensis*), a toninha (*Pontoporia brainvillei*), e as aves da família Sternidae.

Localidade 2: Região costeira localizada entre a Foz do Piraque-Acú e a Foz do Rio Fundão (Nova Almeida). Área de ocupação intensiva de tartarugas marinhas e raias e que apresenta alta sensibilidade a impactos crônicos devido à proximidade com áreas de acumulação de lama de rejeitos. Esta região apresenta coincidência com as áreas protegidas da APA Costa das Algas e do REVIS Santa Cruz. Neste caso, a principal espécie atingida são os juvenis da tartaruga verde (*Chelonia mydas*).

Localidade 3: Região dos recifes esquecidos, localizada entre a Foz do Rio São Mateus e Barra Nova, desde a costa até as isobatas de 15 e 20 m. Área de ocupação intensiva de tartarugas marinhas e tubarões, apresentando alta sensibilidade a impactos crônicos devido à proximidade com áreas de acumulação da lama de rejeitos.

Localidade 4: Região costeira localizada entre 10km ao sul da Foz do Rio Doce e a divisa entre os estados do ES e BA (Itaúnas), estendendo-se desde a costa até a isobata de 10m. Compreende-se uma área de maior uso por pequenos cetáceos, as quais coincidem com áreas de maior sensibilidade a alta turbidez, as quais também coincidem em parte com áreas de maior acúmulo de rejeitos. Cabe destacar a ocorrência de um maior custo energético por parte dos pequenos cetáceos para comunicação e forrageamento. Além disso, implicações no balanço energético podem ocorrer em áreas de alta turbidez, as quais são potencialmente causadas pela ressuspensão de rejeitos da lama. Neste caso, as principais espécies atingidas são: o boto-cinza (*Sotalia guianensis*) e a toninha (*Pontoporia brainvillei*).

Figura 10: Representação das 4 localidades com identificação de impactos segundo a utilização do espaço por organismos da megafauna marinha (aves, tartarugas e cetáceos).



Em termos dos indicadores de impacto para aves marinhas, é importante destacar que esses organismos são altamente móveis, de modo que a área impactada por rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão pode ser utilizada por espécies oriundas de áreas reprodutivas, localizadas a milhares de quilômetros da foz do Rio Doce. O impacto do aporte de rejeitos oriundos do rompimento da barragem de Fundão na referida área, pode representar perturbações em locais afastados da área de amostragem. Além disso, o aporte de rejeitos nas áreas utilizadas pelas aves marinhas, pode resultar em impactos de curto prazo, mas especialmente em impactos que poderão ser identificados em médio e longo prazo. Para os impactos de médio e longo prazos, é possível fazer inferências em relação à vulnerabilidade das aves marinhas, a partir dos dados levantados no primeiro ano de execução do PMBA.

Para cada área, foi determinada uma classe de impacto e vulnerabilidade, a partir da comparação dos dados obtidos com dados pretéritos ou referências bibliográficas. Os principais dados obtidos no monitoramento de aves marinhas realizado pelo PMBA permitiram demonstrar o que segue:

1. Arquipélago dos Abrolhos - Área reprodutiva de sete espécies de aves marinhas, das quais duas delas (*Phaethon aethereus* e *Sula leucogaster*) foram avaliadas como indicadoras de impacto sobre o grupo. Foi definido um potencial de alto impacto devido, especialmente, às alterações nos parâmetros de saúde, redução no tamanho populacional, falhas na reprodução, diminuição da diversidade genética, alteração das presas ingeridas, diminuição nos níveis de elementos essenciais, e aumento nos níveis de elementos não essenciais. A vulnerabilidade também é considerada alta porque a partir de dados de rastreamento remoto, foi possível identificar que não houve alteração substancial nas áreas de alimentação entre antes e depois do rompimento, as quais se sobrepõem às áreas potencialmente impactadas pelos rejeitos, conforme demonstrado no PMBA. Portanto, é possível inferir que as aves marinhas que se reproduzem em Abrolhos estão utilizando as áreas atingidas pelos rejeitos para alimentação.

2. Ilhas Trindade e Martin Vaz – Área reprodutiva de sete espécies de aves marinhas, entre as quais *Pterodroma arminjoniana*, classificada Criticamente Ameaçada de Extinção pela Portaria MMA 444/2014, e que utiliza a Foz do Rio Doce e adjacências como área de alimentação no período pré-incubatório. Observou-se a contaminação de *P. arminjoniana* por elementos não essenciais, especialmente Cd e Pb.

3. Ilhas costeiras do Espírito Santo – Área reprodutiva de *Sterna hirundinacea*, classificada como Vulnerável na Portaria MMA 444/2014 e que utiliza a Foz do Rio Doce e águas costeiras para alimentação. O impacto foi classificado como intermediário a partir da falha reprodutiva durante a temporada de 2019, porém, sem avaliação dos parâmetros analisados para outras espécies. A espécie encontra-se ameaçada de extinção no Brasil e alimenta-se de pequenos peixes em áreas costeiras. *Sterna hirundinacea* atualmente não está reproduzindo em elevado número nas ilhas do Estado do

4. Arquipélago Tristão da Cunha – Área reprodutiva de *Thalassarche chlororhynchos*, classificado como Em Extinção (EN) pela IUCN e pela Portaria MMA 444/2014. Não foi observado impacto.

3 DISCUSSÃO

Durante o primeiro ano de monitoramento do PMBA foi possível medir e analisar a importância de eventos hidrológicos na bacia do Rio Doce no aporte de material particulado e dissolvido para a região marinha (RT-27 RRDM/NOV19 – Integração Abiótica dos Ambientes). Em paralelo, as medições realizadas a partir do outono e inverno mostraram também a importância do aumento da energia das ondas na mobilização do fundo e disponibilização de metais dissolvidos na coluna d'água e de materiais particulados em altas concentrações próximos ao fundo ou já depositados no sedimento marinho.

A análise integrada dos parâmetros abióticos e bióticos gerados no âmbito do PMBA permitiu a avaliação de respostas diretas de componentes da base da cadeia trófica aos diferentes processos físicos e químicos atuando na região marinha. A análise espacial e de frequência de ocorrência de indicadores abióticos da contaminação por rejeito também serviu como base para correlacionar os indicadores ou a vulnerabilidade de determinados organismos (ictiofauna e megafauna) nas áreas reconhecidamente impactadas.

Os dados abióticos gerados pelo PMBA indicam que eventos hidrológicos e/ou de ressuspensão podem ser comparáveis ou mais impactantes na disponibilização de alguns metais na coluna d'água do que o próprio evento do rompimento da barragem, ocorrido em novembro de 2015, durante o chamado período agudo. Isso significa que, dependendo do nível trófico e do tempo de resposta à impactos por contaminação por metais, a biota ainda responde a eventos agudos, dentro de um período que já vinha sendo considerado como sendo de impacto crônico. Nesse contexto, espera-se que comunidades planctônicas, principalmente o fitoplâncton e zooplâncton, bem como alguns grupos bentônicos de fundos inconsolidados estejam respondendo de forma mais imediata às variações da qualidade da água e do sedimento. Já grupos da ictiofauna, a dinâmica bêntica recifal e a megafauna podem exigir um maior tempo de resposta, sendo que, neste caso, a estrutura da população ou da comunidade podem estar sendo afetadas.

Para avaliar o nível de integridade e qualidade do ambiente, no que diz respeito à biodiversidade, foram utilizados os indicadores bióticos descritos no presente relatório, visando a consolidação de uma visão espacial das áreas com diferentes **níveis de impacto biótico causado ou associado ao rompimento da barragem de Fundão, bem como a consequente dispersão dos rejeitos no mar**. Para esta análise foram considerados três níveis de critérios associados aos indicadores. Os critérios baseados na comparação com dados pré-rompimento da barragem de Fundão receberam um peso duplicado em relação aos indicadores, os quais foram definidos com base na associação com dados abióticos, comparação com dados pré PMBA, mas pós-rompimento da barragem de Fundão e dados disponíveis na literatura especializada. De forma a complementar a análise de indicadores abióticos, foram utilizados ainda o índice de Respostas Integradas de Biomarcadores (IBR) para a bioacumulação de metais (IBR bioacumulação) e para o conjunto das respostas de todos os biomarcadores (IBR biomarcador). Além disso, foram realizados testes de toxicidade da água e do sedimento para

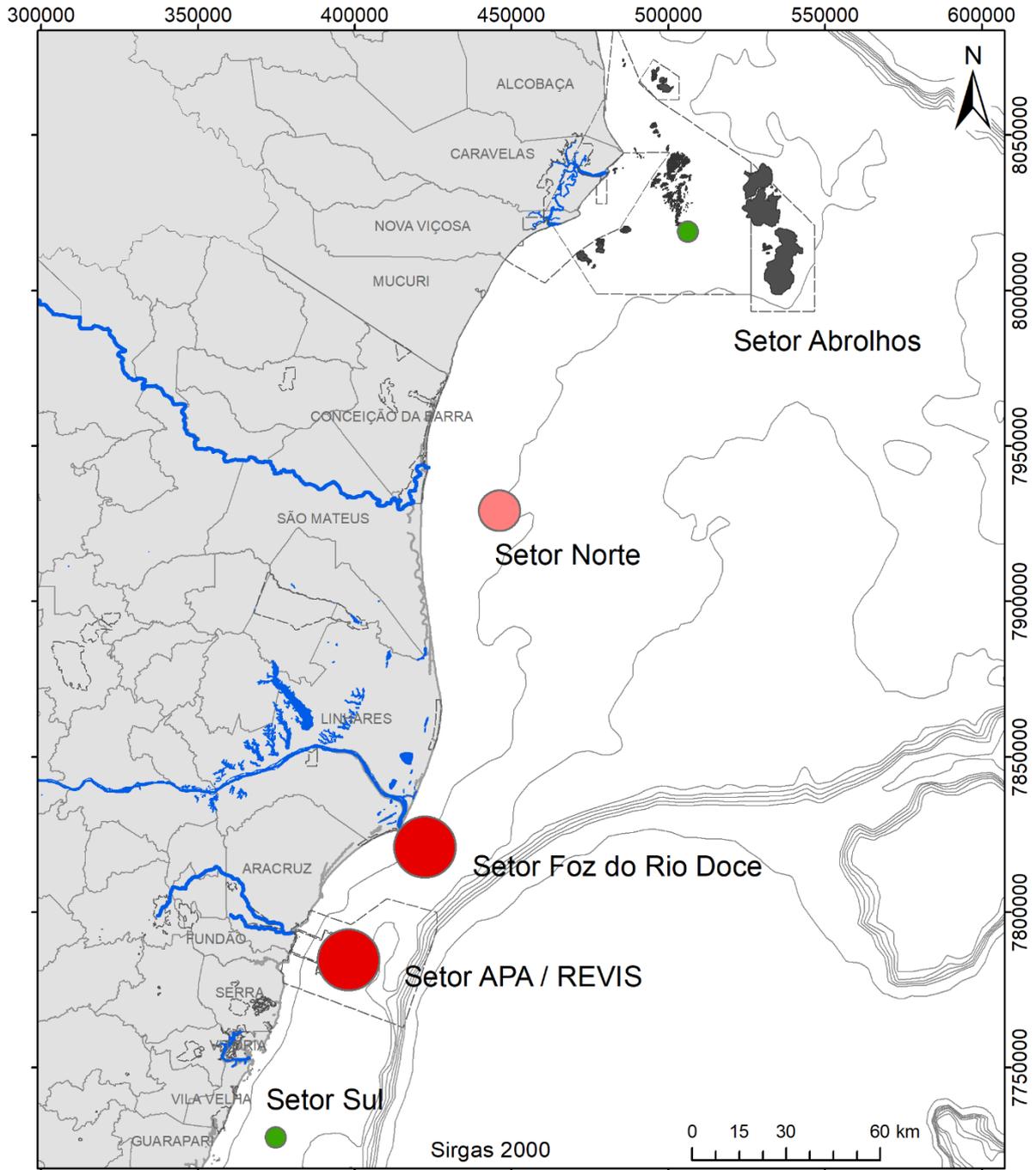
organismos-teste padronizados, cujos resultados foram expressos como Índice de toxicidade (indicadores apresentados no RT-28 RRDM/NOV19 - Índices Ecotoxicológicos).

A avaliação quantitativa considerou o número de indicadores de impacto que cada grupo apresentou ao longo dos 5 compartimentos definidos na região marinha: SUL, APA, FOZ, NORTE e ABROLHOS. Os indicadores que tiveram o critério de análise baseado em dados pretéritos foram multiplicados por 2, em função de serem considerados dados de evidência direta. O IBR foi também considerado como sendo de peso 2, mas o seu valor final foi normalizado para considerar o número de organismos e matrizes usados em cada setor.

Assim, os maiores valores calculados indicam as áreas de menor integridade biótica, ou seja, **áreas onde a biodiversidade estaria mais comprometida frente aos indicadores de impacto causados pelo rompimento da barragem**. Após isso, esses valores foram normalizados, de tal forma que o maior valor corresponda ao valor de 1. Considerando uma divisão do integral 1, em 4 partes, foi definida a seguinte classificação: Alto Número de Indicadores de Impacto (0,75 a 1), Médio Número de Indicadores de Impacto (0,5 – 0,75), Baixo Número de Indicadores de Impacto (0,25 – 0,5) e Muito Baixo Número de Indicadores de Impacto (0 – 0,25).

O resultado obtido está mostrado na Figura 11, onde fica evidente que os setores FOZ e APA são *hot spots* de impacto à biodiversidade.

Figura 11: Identificação dos setores onde a biodiversidade estaria mais comprometida frente aos indicadores de impacto causados pelo rompimento da barragem. Os valores foram normalizados de tal forma que o maior valor corresponda a 1.



Indicadores de Impacto

- Alto Número de Indicadores de Impacto (0,75 a 1)**
- Baixo Número de Indicadores de Impacto (0,25 – 0,5)**
- Médio Número de Indicadores de Impacto (0,5 – 0,75)**
- Muito Baixo Número de Indicadores de Impacto (0 – 0,25)**
- Hidrografia**
- Unidades de Conservação**

É importante ressaltar que esse índice calculado apresenta um valor médio anual, mas as análises temporais indicam que existe uma variabilidade dos valores em função das forçantes físicas e químicas do sistema. Além disso, é importante destacar que o setor NORTE vem apresentando um aumento gradativo nas frequências de ocorrência de indicadores abióticos e bióticos, o que também está ligado à tendência de médio e longo prazo do transporte e dispersão de sedimentos em direção norte, nessa região.

Em síntese, os estudos sobre a biodiversidade marinha, realizados durante este primeiro ano de PMBA, forneceram uma análise adequada do impacto do rompimento da barragem de Fundão nos diferentes grupos bióticos do ambiente marinho. Neste caso, foi observado que a resposta biótica está diretamente ligada aos processos físicos e químicos, tanto do ponto de vista temporal quanto espacial. Os setores onde existe uma baixa integridade biótica, ou seja, setores que foram impactados, quando se considera os indicadores de rejeito, são os mesmos que apresentam indicadores abióticos para contaminação e presença de rejeito, ou seja, APA e FOZ. Por sua vez, o setor NORTE apresenta fortes indicadores de impacto associado ao rejeito, mas com o índice inferior à FOZ e APA, o que também está de acordo com as tendências de dispersão de rejeito em médio e longo prazo nesta direção. Já os setores SUL e ABROLHOS foram considerados como sendo menos vulneráveis em relação ao rompimento da barragem. Por fim, o setor ABROLHOS ainda apresenta dados abióticos inconclusivos em relação à contaminação na região costeira decorrente do rompimento da barragem de Fundão. Neste contexto, cabe destacar que os indicadores bióticos, assim como os abióticos, têm uma variabilidade intra-anual, controlada principalmente pelas forçantes físicas e a ocorrência de rejeito ao longo da bacia do Rio Doce, que por sua vez pode ser depositado em regiões do fundo marinho adjacentes à foz do Rio Doce.

4 REFERÊNCIAS

BOUCEK, R.; TROTTER, A.; BLEWETT, D.; RITCH, J.; SANTOS, R.; STEVENS, P.; MASSIE, J.; REHAGE, J. Contrasting river migrations of common snook between two Florida rivers using acoustic telemetry. **Fisheries Research**, v. 213, p. 219–225, 2019.

DAROS, F. A.; SPACH, H. L.; CORREIA, A. T. Habitat residency and movement patterns of *Centropomus parallelus* juveniles in a subtropical estuarine complex. **Journal of Fish Biology**, v. 88, n. 5, p. 1796–1810, 2016.

BROSSET, P.; MÉNARD, F.; FROMENTIN, J. M.; BONHOMMEAU, S.; ULSES, C.; BOURDEIX, J. H.; BIGOT, J. L.; VAN BEVEREN, E.; ROOS, D.; SARAUX, C. Influence of environmental variability and age on the body condition of small pelagic fish in the Gulf of Lions. **Marine Ecology Progress Series**, v. 529, p. 219–231, 2015.

LATOUR, R. J.; GARTLAND, J.; BONZEK, C. F. Spatiotemporal trends and drivers of fish condition in Chesapeake Bay. **Marine Ecology Progress Series**, v. 579, n. 1–17, 2017.