

**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 Bentos de Fundo
Inconsolidado**

RT- 43/ JUN 23

RA2022 PMBA/Fest

Vitória,

Junho de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	METODOLOGIA	3
2.1	COLETA	3
2.2	ANÁLISE.....	4
2.3	HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS.....	6
3	RESULTADOS DOS INDICADORES	6
3.1	ÍNDICE DE BIODIVERSIDADE.....	7
4	ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS	37
5	REFERÊNCIAS	37

1 HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL

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

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

2 METODOLOGIA

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

2.1 COLETA

As coletas das amostras foram realizadas em substrato inconsolidado por meio do lançamento de um amostrador van Veen, apropriado para este ambiente, com volume de 18 litros. Cada amostra recebeu uma etiqueta com o código do local de coleta, data, profundidade, número sequencial correspondente, observação sobre local/condição de coleta, código da expedição (coletor), seguindo o padrão estabelecido para o projeto PMBA.

No momento da chegada do amostrador a bordo, para cada pegada, foram retiradas as alíquotas para as análises de geoquímica, densidade e granulometria dos subprojetos de Hidrogeoquímica e Sedimentologia. Na sequência, as amostras para a análise de bentos foram transferidas para sacolas plásticas dispostas uma dentro da outra (duplas) com a etiqueta colocada entre elas. Foi então adicionado às sacolas um volume de formalina 4% suficiente para cobrir o sedimento coletado e

fechadas com elásticos. Estas amostras foram então acondicionadas em bombonas e transportadas para os laboratórios Labinmar na UFES Alegre, ES e Labmacro na UFRB, Cruz das Almas, BA.

Em laboratório, estas amostras tiveram o volume total medido, foram lavadas em peneiras granulométricas de 0,5 mm e 0,63 μ m e separadas em três alíquotas de 100 ml (volume total 300 ml), para posterior separação da fauna bentônica. Os organismos foram então triados, quantificados e identificados em grandes grupos taxonômicos (Filo, Classe ou Ordem). Os grupos mais abundantes, Mollusca, Polychaeta e Crustacea foram enviados para taxonomistas para identificação até a categoria taxonômica mais específica possível, ao menos até o nível de Família.

2.2 ANÁLISE

Para analisar os indicadores univariados da comunidade foi observado como diferentes métricas da comunidade modificaram ao longo do período do monitoramento e como as variáveis abióticas influenciaram nesta variação. As métricas utilizadas foram a Abundância (Densidade) – Número de indivíduos de cada táxon presentes em um volume de amostra triado; Riqueza – número de táxons em determinada amostra; Índice de Diversidade – calculado através do índice de diversidade de Shannon-Weaver; Índice de Equitabilidade – calculado através do índice de Equitabilidade de Pielou; e Índice de Dominância – calculado através do índice de diversidade de Simpson. Os grupos taxonômicos Mollusca e Polychaeta foram definidos como indicadores por serem encontrados em altas densidades em diversas estações amostrais, além de serem táxons consagrados como bioindicadores de impactos em ambientes marinhos (WARWICK; CLARKE, 1993; RYU et al., 2011; ZALMON et al., 2015).

Além do foco nestes dois táxons, Mollusca foi analisado utilizando dois critérios distintos para o registro da comunidade biológica: vestígios de partes duras encontradas no local e exemplares em que foi possível observar tecido mole, ou seja, organismos que estavam vivos no momento da coleta. Os critérios adotados para considerar os vestígios como parte da biota local, e não como parte do sedimento biodetrítico, estão baseados no estado de conservação das estruturas. Apesar de serem frágeis, observando-se o estado de conservação dos exemplares (vestígios completos, ainda com brilho e sem avarias e marcas de rolamento e transporte), é possível inferir que aquele organismo era residente no ponto amostral e que não foi trazido de outro local, podendo assim auxiliar na compreensão da dinâmica da comunidade (KIDWELL, 2002, 2008; ALBANO; SABELLI, 2011; KIDWELL; TOMASOVYCH, 2013).

Para analisar a estrutura da Riqueza e Diversidade dos grupos zoológicos, foram utilizados modelos lineares generalizados usando as distribuições adequadas para cada caso, buscando contemplar seus pressupostos. Comparações par-a-par *post-hoc* foram feitas para estimar as médias dos mínimos quadrados para cada nível das variáveis independentes e para testar as diferenças médias dos escores de resposta. Foi verificada a significância da variação dos indicadores ecológicos entre os diversos setores, campanhas e profundidades.

Para monitorar e entender de forma mais refinada os processos que ocorrem nas comunidades bentônicas em toda a extensão da malha do PMBA, torna-se necessário integrar os dados bióticos das

comunidades e os dados abióticos do meio. As variáveis abióticas foram analisadas pelos subprojetos de Hidrogeoquímica e Sedimentologia, ambos parte do grupo Marinho Integrado. Para que esta integração seja possível, o delineamento da malha amostral, a metodologia de coleta, incluindo o próprio amostrador e a amostra recuperada, são os mesmos para os subprojetos Bentos de Substrato Inconsolidado, Hidrogeoquímica e Sedimentologia, nas campanhas trimestrais e semestrais. Entretanto, por motivos operacionais, nem todos os dados para todas as estações amostrais estavam disponíveis para a utilização por este tema, de forma que apenas aqueles pontos com todas as informações foram incluídos nas análises de integração.

Alguns compostos contaminantes orgânicos não foram incluídos a priori nas análises por não apresentarem variação ao longo do tempo e do espaço. Entre os dez compostos de Pesticidas, cinco foram excluídos por conta deste critério: DeltaHCH, GamaHCH (Lindano), Endrin, Alfaclordano, Gamaclordano. E entre os Esteróis: Estigmastanol e Colestenol. O conjunto de variáveis referentes aos Contaminantes Emergentes (e. g. Ibuprofeno etc.), Aminas e Fenóis também foram analisados e não foram incluídos nas análises pelo mesmo critério.

Em seguida foram avaliadas as correlações entre as diferentes variáveis dentro do mesmo grupo de compostos: Hidrocarbonetos Aromáticos Policíclicos (PHAs), Pesticidas e Esteróis e PCBs. Quando encontrada correlação muito alta (acima de 80%) a variável de menor significância biológica (baseado na literatura) foi removida das análises. Desta forma, reduzimos o montante de variáveis sem perder informação substancial. Dos HPAs, foram removidas cinco variáveis: Acenaftaleno, Fenantreno, Pireno, Criseno, Bz(k)fluoranteno. Já para os Esteróis também foram removidas cinco variáveis: Epicoprostanol, Coprostanona, Campesterol, Lanosterol e Estigmasterol.

Ao final, compõem a matriz de contaminantes orgânicos 11 variáveis, das quais três são referentes aos Pesticidas e sete aos PHAs, além dos PCBs totais. A matriz de contaminantes metais é composta pelo Índice Mineralógico do Ferro (IMS) e por quatorze metais, todos pertencentes à fração parcial no sedimento: Cobalto (Co), Níquel (Ni), Cobre (Cu), Arsênio (As), Prata (Ag), Cádmio (Cd), Bário (Ba), Vanádio (V), Chumbo (Pb), Crômio (Cr), Ferro (Fe), Alumínio (Al), Zinco (Zn) e Manganês (Mn). A matriz ambiental foi constituída principalmente de variáveis sedimentológicas: Matéria orgânica (MO), percentuais de Silte-Argila, areia fina, areia grossa, cascalho e carbonato de cálcio (CaCO₃). A matriz espacial foi formada a partir dos Mapas de Autovetores de Moran (Moran Eigenvector Maps, MEMs) (LEGENDRE; LEGENDRE 2012). MEMs são variáveis lineares que representam todas as configurações possíveis de autocorrelação espacial, sendo extraídos de uma matriz de vizinhança gerada com as coordenadas geográficas de cada estação do projeto.

Para investigar a influência das variáveis abióticas sobre a abundância, riqueza e diversidade de cada grupo, utilizamos modelos de regressão Random Forest através de árvores de decisão. A escolha deste método é bastante adequada para lidar com o grande número de variáveis abióticas preditoras, evitando saturação e modelando as relações não-lineares, esperadas para uma escala espacial extensa como a do PMBA. Para tanto, os dados foram aleatoriamente divididos em dois conjuntos: de treino (70%) e de teste (30%). As variáveis preditoras mais importantes foram avaliadas pela perda de

acurácia do modelo relativa à permutação de cada variável. Os modelos foram avaliados pela percentagem de explicação, e pela sua acurácia ao correlacionar os valores preditos com os observados para a riqueza e diversidade.

Para correlacionar a composição das comunidades com as variáveis abióticas foram realizadas análises de redundância (RDA). As variáveis abióticas preditoras foram organizadas em três partições. As partições delimitadas dizem respeito aos diferentes tipos de variáveis abióticas, ou seja, matrizes ambientais, espacial, além de contaminantes metais (metal-IMS) e não-metals (orgânicos). Para cada partição uma rotina de análise foi estabelecida com a verificação de colinearidade (com $vif < 6$) e seleção de variáveis por *forward selection*. Posteriormente, as partições foram unidas e a RDA realizada. Também foi calculado a influência de cada partição na estrutura. Dessa forma, foi possível verificar, além da estruturação da comunidade, a relação desta estrutura com variáveis de diferentes naturezas, atribuindo a presença ou não de causalidade com contaminantes relacionados ao rejeito.

2.3 HISTÓRICO DE ALTERAÇÕES E ADAPTAÇÕES DE METODOLOGIAS

Não houve alteração ou adaptação na metodologia adotada para a determinação dos indicadores deste Tema ao longo do PMBA/Fest.

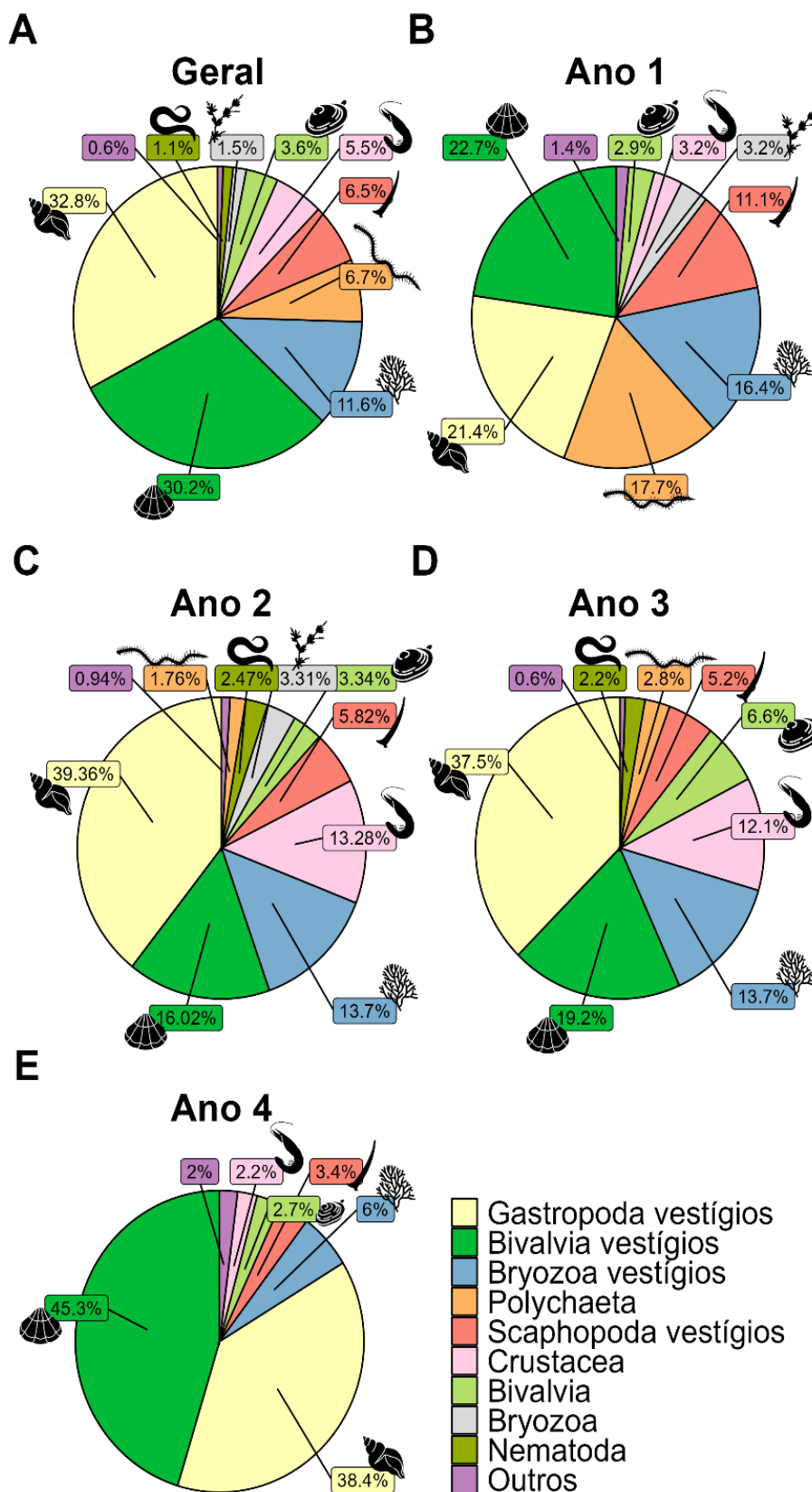
3 RESULTADOS DOS INDICADORES

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

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

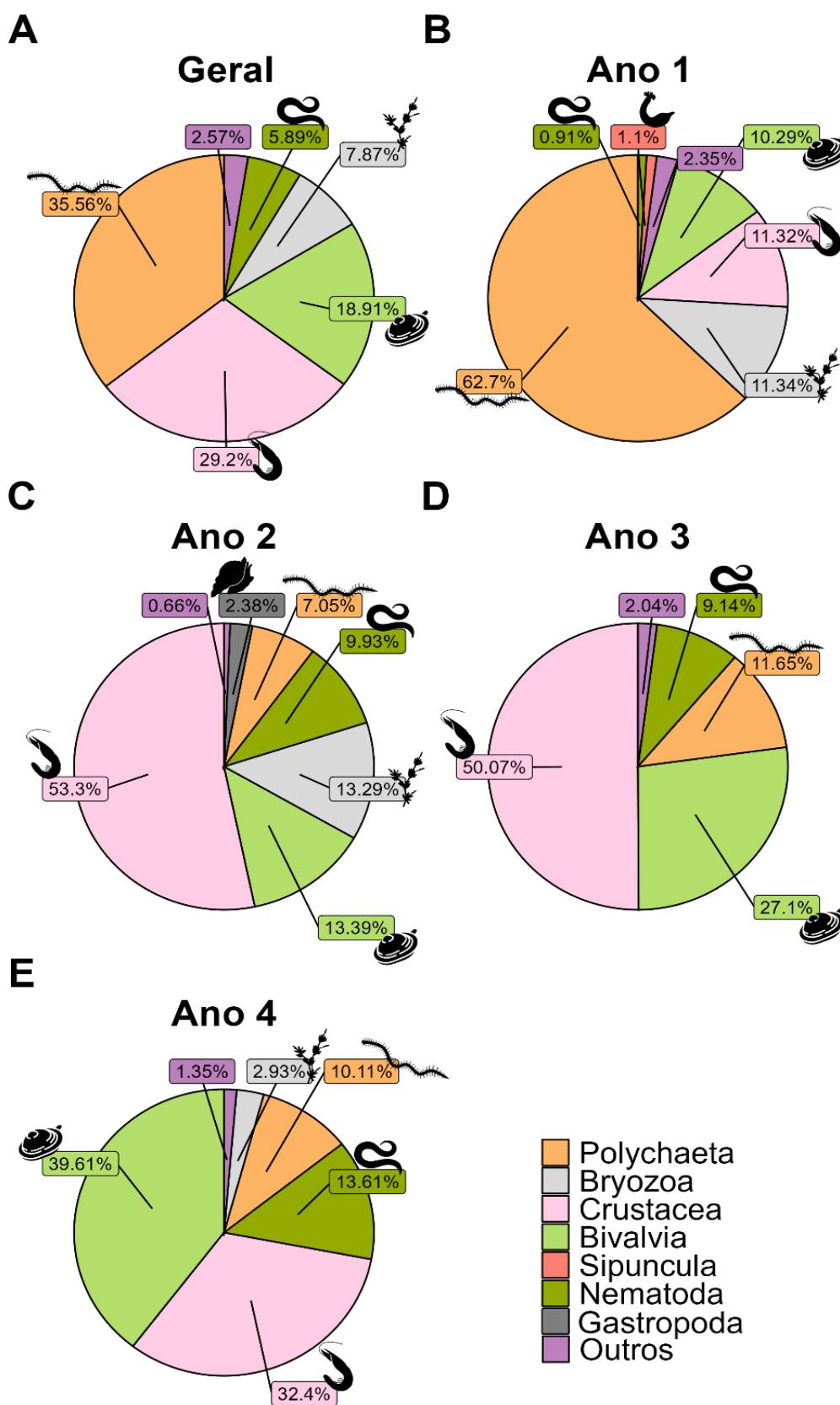
3.1 ÍNDICE DE BIODIVERSIDADE

Figura 1: Composição taxonômica da macrofauna bentônica



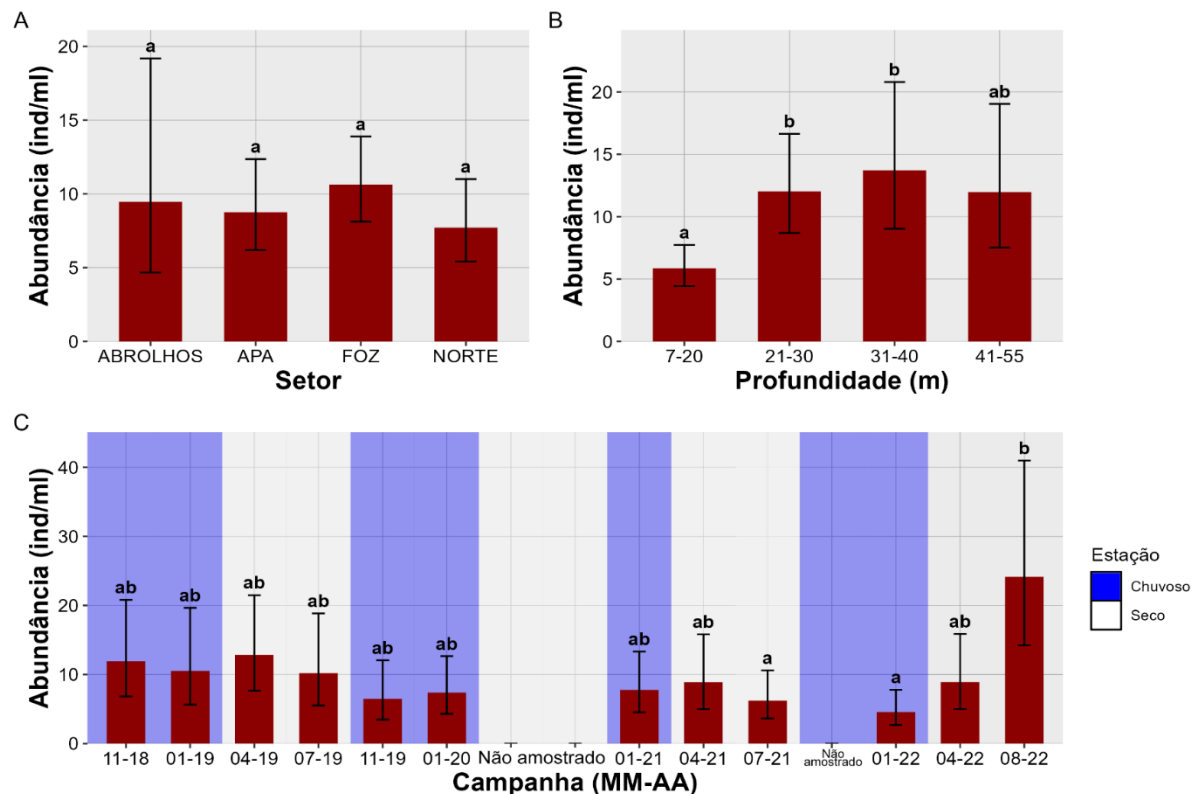
Durante o período de monitoramento foram registrados 768.490 indivíduos (Ano 1 = 232.839 ind.; Ano 2 = 111.101 ind.; Ano 3 = 203.019 ind. e Ano 4 = 221.531 ind.), identificados e quantificados conforme previsto pela Meta 1 deste tema. Até o fim do Ano 4 foram identificados 14 filos, sendo estes: Porífera, Cnidaria, Platyhelminthes, Nematoda, Nemertea, Mollusca, Annelida, Arthropoda (Crustacea), Echinodermata, Brachiopoda, Bryozoa, Entoprocta, Hemichordata e Chordata. Dentre esses, Mollusca e Annelida: Polychaeta se destacaram como mais abundantes. Para Mollusca, além dos organismos com partes moles (vivos no momento da coleta), também foram registrados os seus vestígios, conchas e valvas inteiras e sem marcas de rolamento, ou seja, vestígios recentes e pertencentes ao local de coleta, especialmente para as Classes Gastropoda, Bivalvia e Scaphopoda, que compreenderam 73,17% do total de moluscos encontrado.

Figura 2: Composição taxonômica da macrofauna bentônica excluindo os vestígios



Principais grupos taxonômicos e suas contribuições para o total de organismos registrados durante todo o período amostral (Geral) e em cada ano de monitoramento. Durante o período de monitoramento foram identificados 14 filos, sendo estes: Porifera, Cnidaria, Platyhelminthes, Nematoda, Nemertea, Mollusca, Annelida, Arthropoda (Crustacea), Echinodermata, Brachiopoda, Bryozoa, Entoprocta, Hemichordata e Chordata. Considerando-se apenas os organismos com partes moles, durante o primeiro ano de coleta a comunidade foi dominada por Polychaeta, no segundo e terceiro ano por Crustacea, e no quarto ano por Bivalvia.

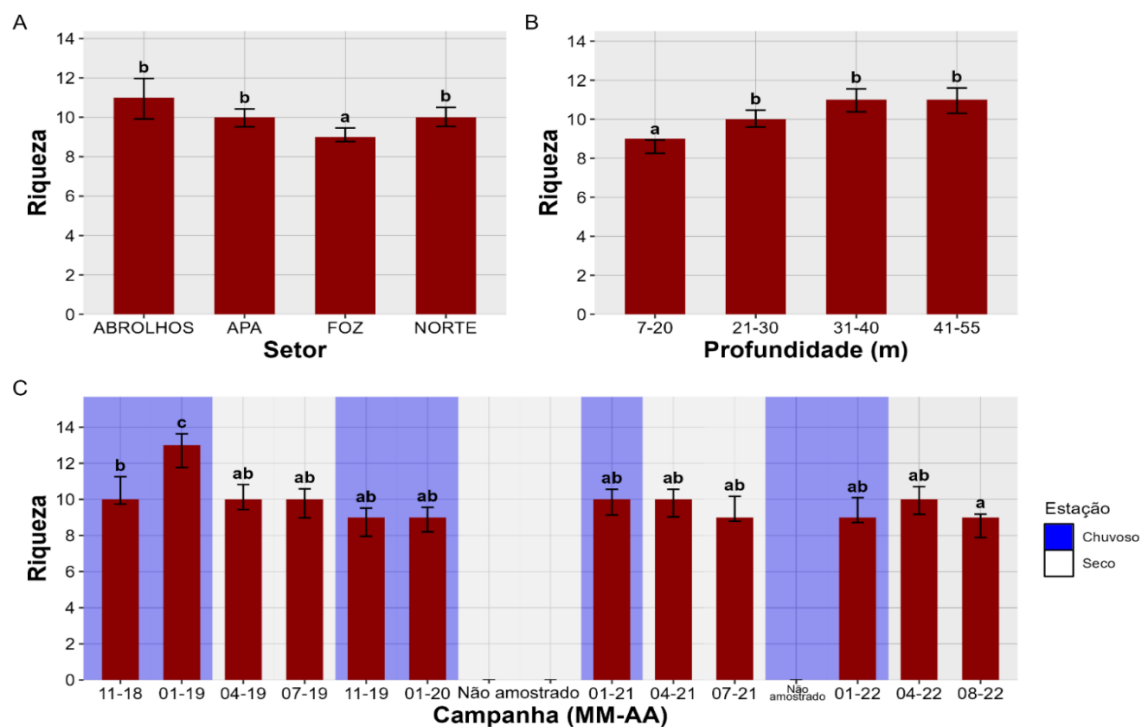
Figura 3: Abundância (Densidade) de organismos da macrofauna nos setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



Os maiores valores de abundância (Densidade) de organismos da macrofauna foram registrados para o setor Abrolhos, seguido da Foz e APA, e os menores valores no setor Norte, entretanto, não foram encontradas diferenças significativas entre os setores. Quanto à profundidade, as amostras mais rasas (entre 7-20 m) apresentaram os menores valores e se diferenciam significativamente das demais categorias, exceto pela categoria 41-55 m. As três categorias mais profundas apresentaram valores de densidade semelhantes entre si. Entre as campanhas, os menores valores de densidade observados em 07-21 e 01-22 mostraram diferença significativa em relação à campanha 08-22, que apresentou os maiores valores. Importante ressaltar que o valor mais alto registrado na campanha de 08-22 esteve

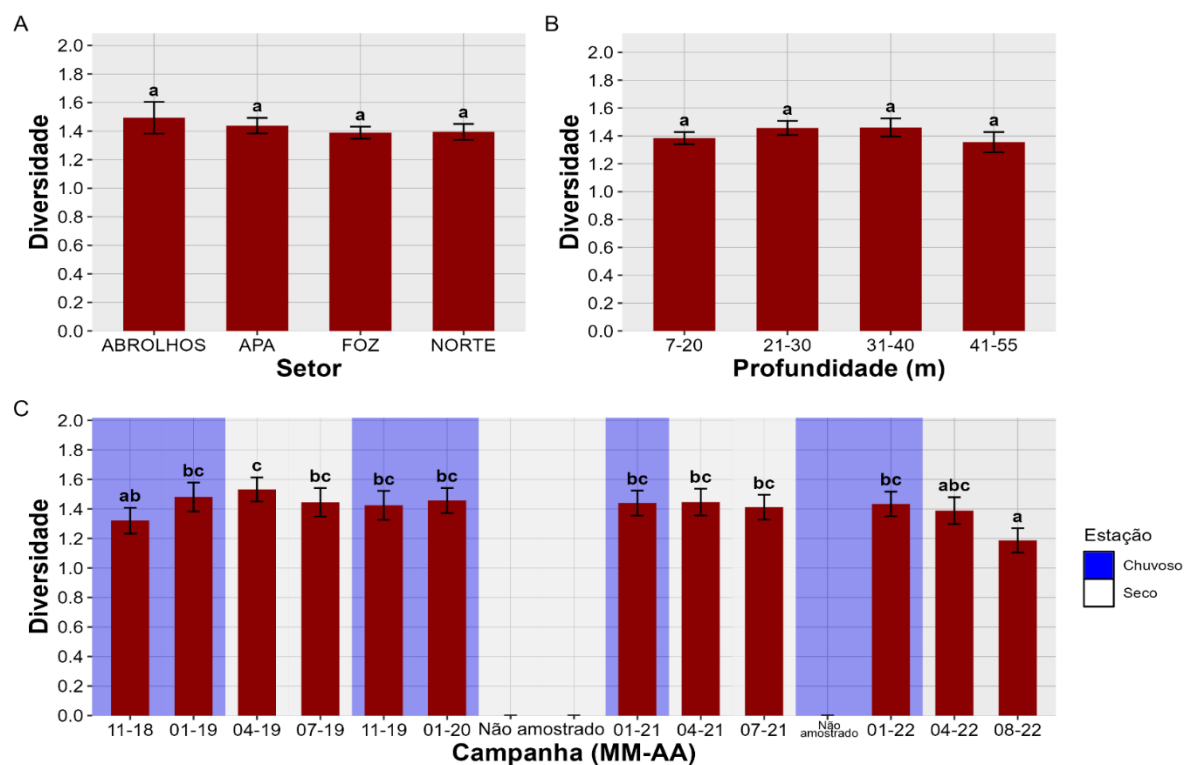
associado ao aumento na abundância de vestígios de Mollusca, como será apresentado mais à frente, não indicando recuperação da macrofauna, mas, ao contrário, alta mortalidade de organismos.

Figura 4: Riqueza de organismos da macrofauna nos setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



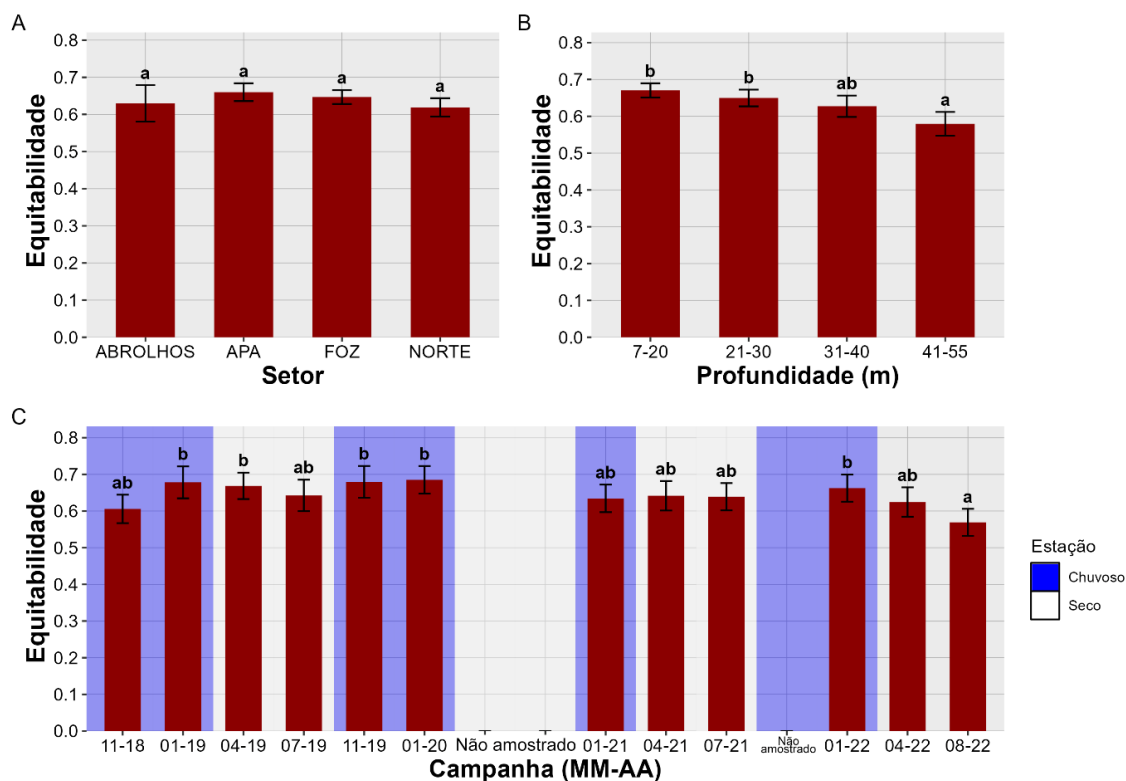
Para a riqueza de organismos da macrofauna, observamos que o setor da Foz apresentou o menor número de táxons, significativamente diferente dos demais setores, especialmente para as menores profundidades, onde as amostras de 7-20 m apresentaram riqueza significativamente menor em relação às demais. Ao mesmo tempo, notou-se uma tendência de aumento da riqueza em Abrolhos. Ao longo do monitoramento, poucas variações foram registradas para a riqueza, com valores significativamente maiores para 01-19, e os menores valores para 11-18, significativamente diferente apenas desta e da campanha 08-22, com valores ainda menores, porém, sem diferenças importantes em relação às demais.

Figura 5: Índice de diversidade de Shannon-Weaver da comunidade macrobentônica entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais



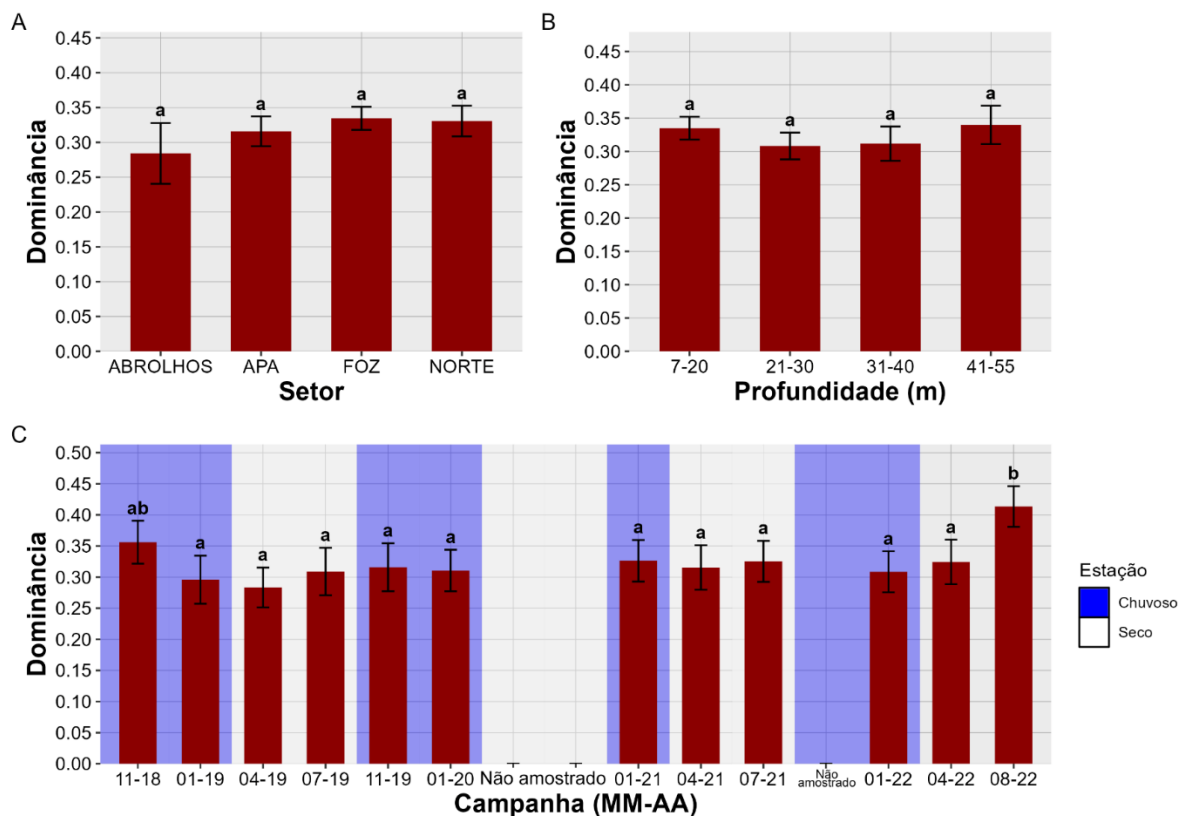
Os valores de diversidade de Shannon-Weaver para a macrofauna refletiram pouca variação da riqueza e os episódios de aumento na abundância (Densidade) tratados anteriormente, não apresentando diferenças significativas entre os setores e profundidades. Entre as campanhas, a de 08-22 se diferenciou das demais com o menor valor de diversidade observado ao longo do monitoramento.

Figura 6: Índice de equitabilidade de Pielou da comunidade macrobentônica entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



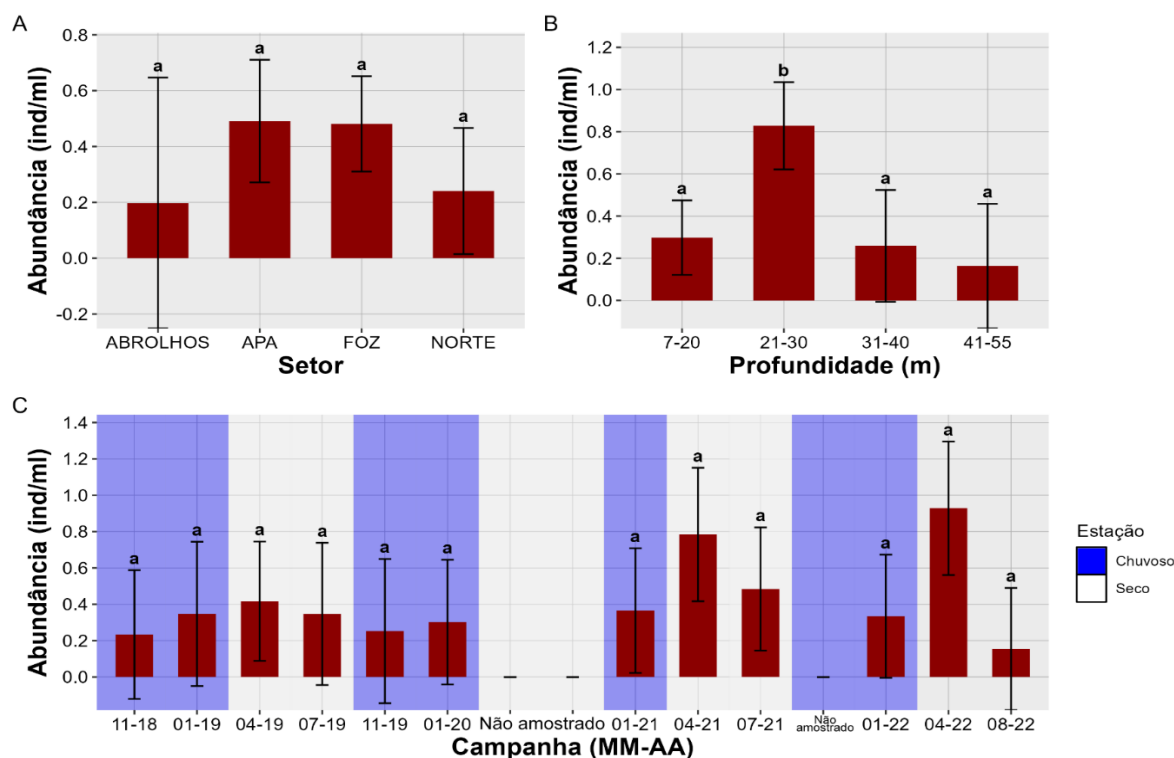
Os valores do índice de equitabilidade de Pielou da comunidade macrobentônica mostraram pouca variabilidade entre setores, não apresentando diferenças significativas entre eles. Entre profundidades, há uma tendência de diminuição dos valores, com a categoria mais profunda (41-55m) apresentando valores significativamente mais baixos do que as duas mais rasas (07-20m e 21-30m). Para as campanhas, os valores também mostraram pouca variação, com destaque apenas para a campanha 08-22, que apresentou os menores valores registrados, significativamente menores que metade das campanhas, a maior parte destas no período chuvoso (01-19, 04-19, 11-19, 01-20, 01-22).

Figura 7: Índice de diversidade de Simpson (Dominância) da comunidade macrobentônica entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



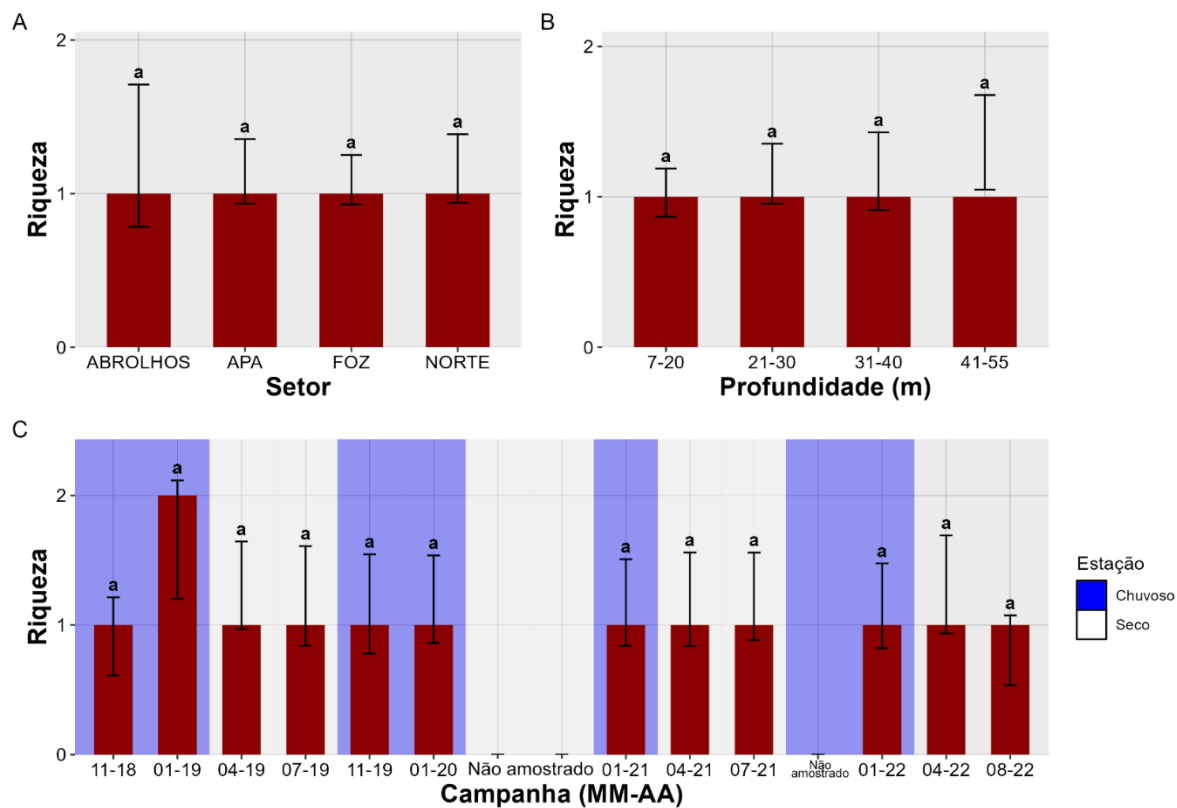
Os valores do índice de Dominância da comunidade macrobentônica mostraram pouca variabilidade tanto entre setores quanto entre profundidades, não apresentando variações significantes nessas categorias. Para as campanhas, os valores também mostraram pouca variação, com destaque apenas para a campanha 08-22, que apresentou valores significativamente superiores a maior parte das campanhas, exceto 11-18.

Figura 8: Abundância (Densidade) de Mollusca com partes moles nos setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



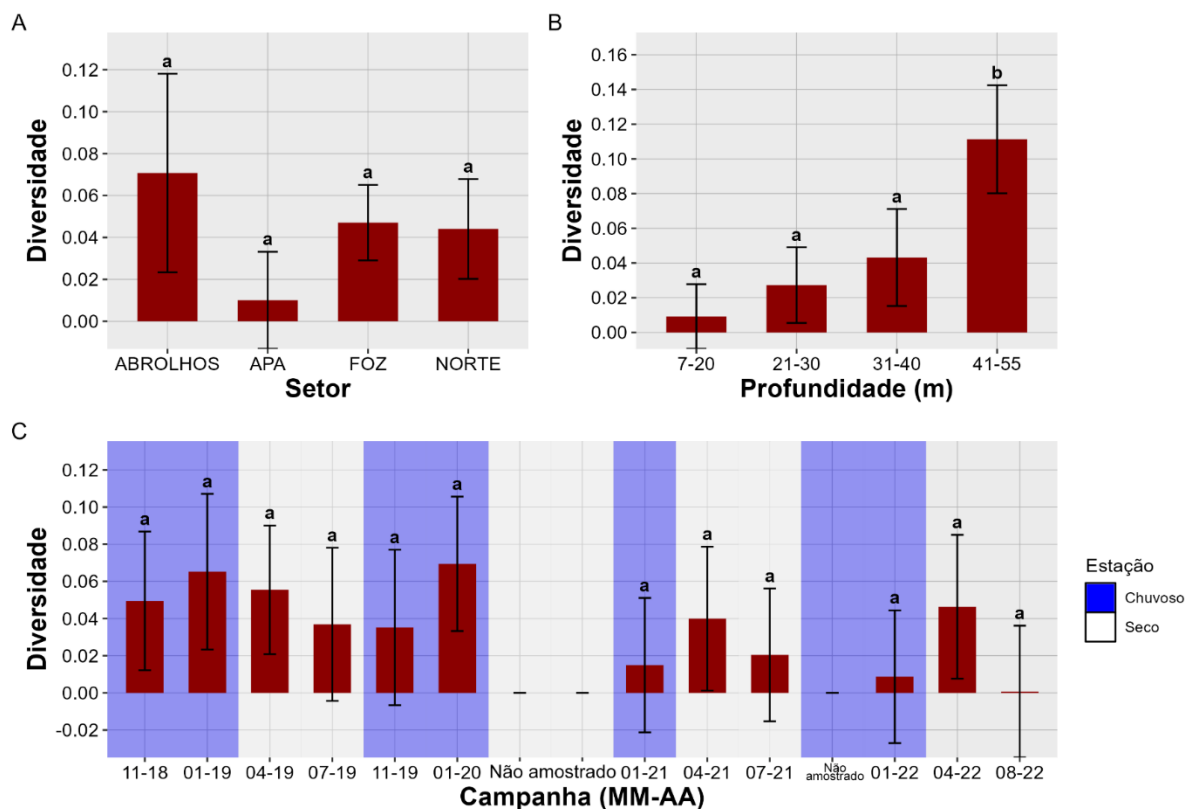
A abundância (densidade) de Mollusca com partes moles não apresentou diferenças significativas entre os setores, entretanto os maiores valores foram observados para os setores Foz e APA, especialmente para as profundidades entre 21-30 m, com valores, significativamente diferentes em relação às demais. Estas unidades amostrais são caracterizadas pela maior distância da área de aporte de rejeito e por maiores teores de CaCO_3 , associados a fundos de cascalhos biodetríticos e bancos de rodolitos, conhecidos por fornecerem maior número de microhabitats para organismos bentônicos. Entre as campanhas, observa-se uma tendência ao aumento da densidade de Mollusca com partes moles nos períodos secos, embora estas diferenças não sejam significativas. Entretanto, para a campanha do período seco 08-22 registrou-se os menores valores de densidade, próximos aos das campanhas dos períodos chuvosos 11-18 e 11-19.

Figura 9: Riqueza de Mollusca com partes moles entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



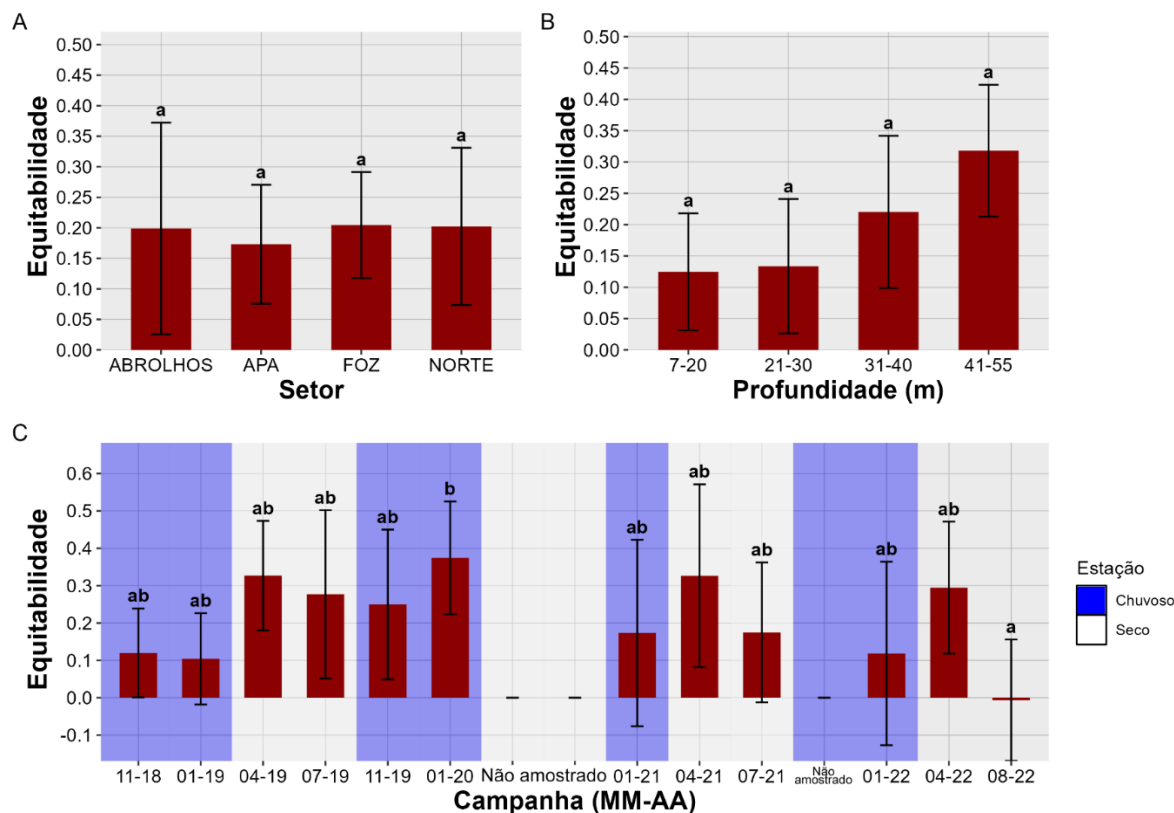
Para a riqueza de Mollusca com partes moles não houve variações significativas entre os setores, profundidades e campanhas, embora observou-se uma tendência de aumento nos valores conforme aumenta a profundidade. Da mesma forma, entre as campanhas, os maiores valores foram registrados no período chuvoso do Ano 1 (01-19) e os menores registrados no período seco do Ano 4 (08-22).

Figura 10: Índice de diversidade de Shannon-Weaver da comunidade de Mollusca com partes moles entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



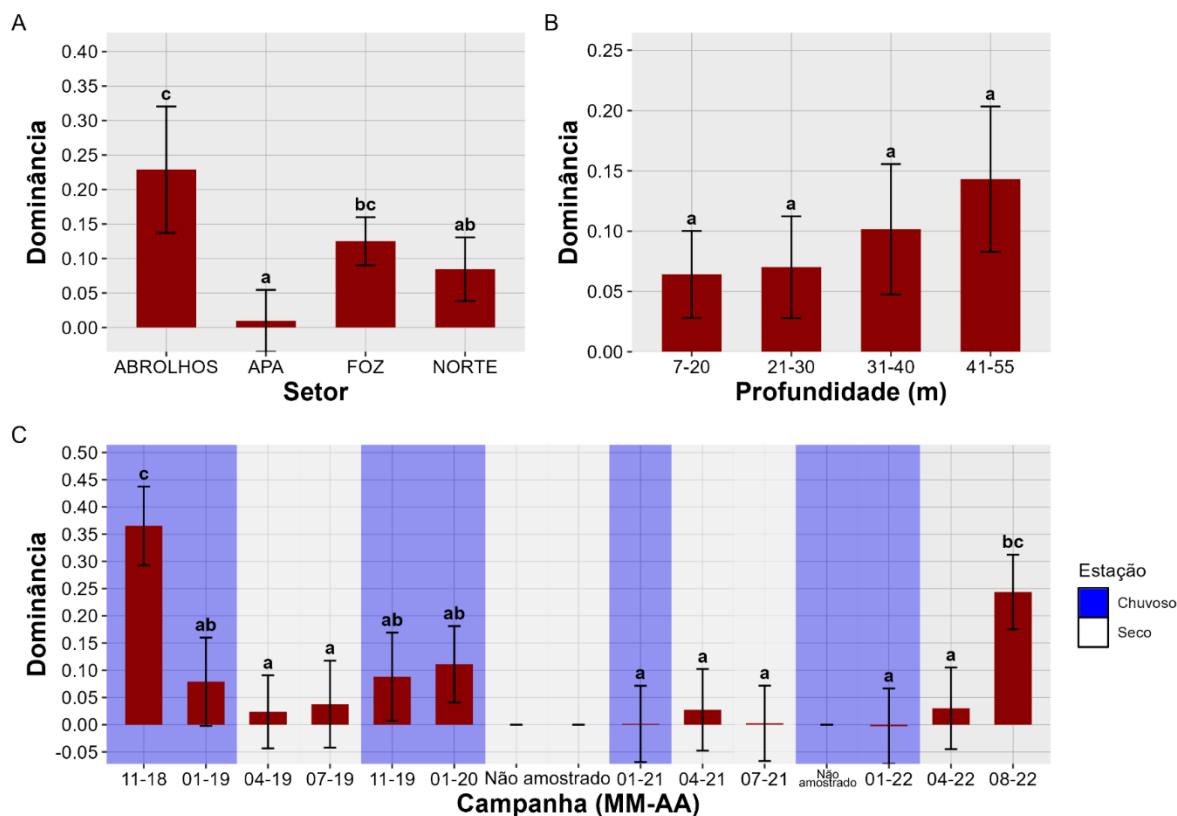
A diversidade de Mollusca com partes moles refletiu o que foi observado para densidade e riqueza, não houve diferenças significativas entre os setores. Entre as profundidades, os maiores valores de diversidade foram observados para 41-55 m, diferindo estatisticamente das demais. Não foram registradas diferenças significativas entre as campanhas.

Figura 11: Índice de equitabilidade de Pielou da comunidade de Mollusca com partes moles entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



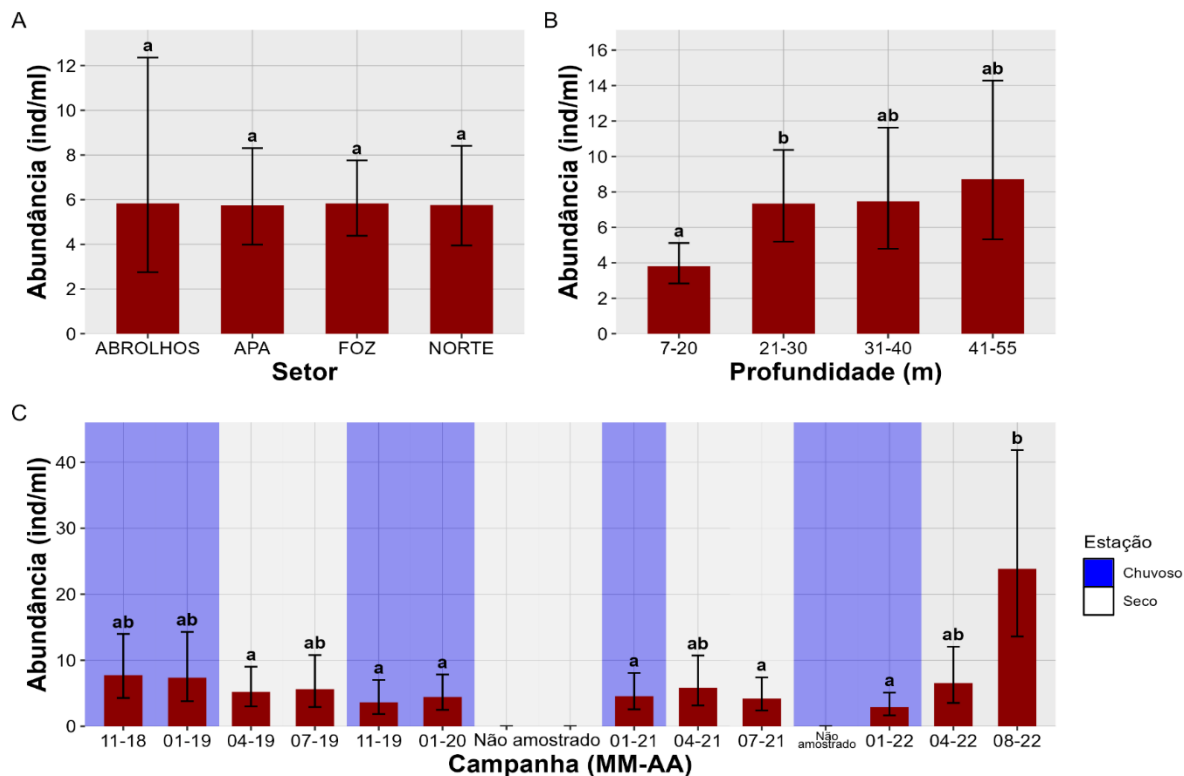
Não houve variações significativas entre os setores e profundidades. Para as campanhas, observou-se novamente valores mais baixos registrados para a campanha 08-22, mas com diferenças significativas apenas para a campanha 01-20.

Figura 12: Índice de diversidade de Simpson da comunidade de Mollusca com partes moles entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



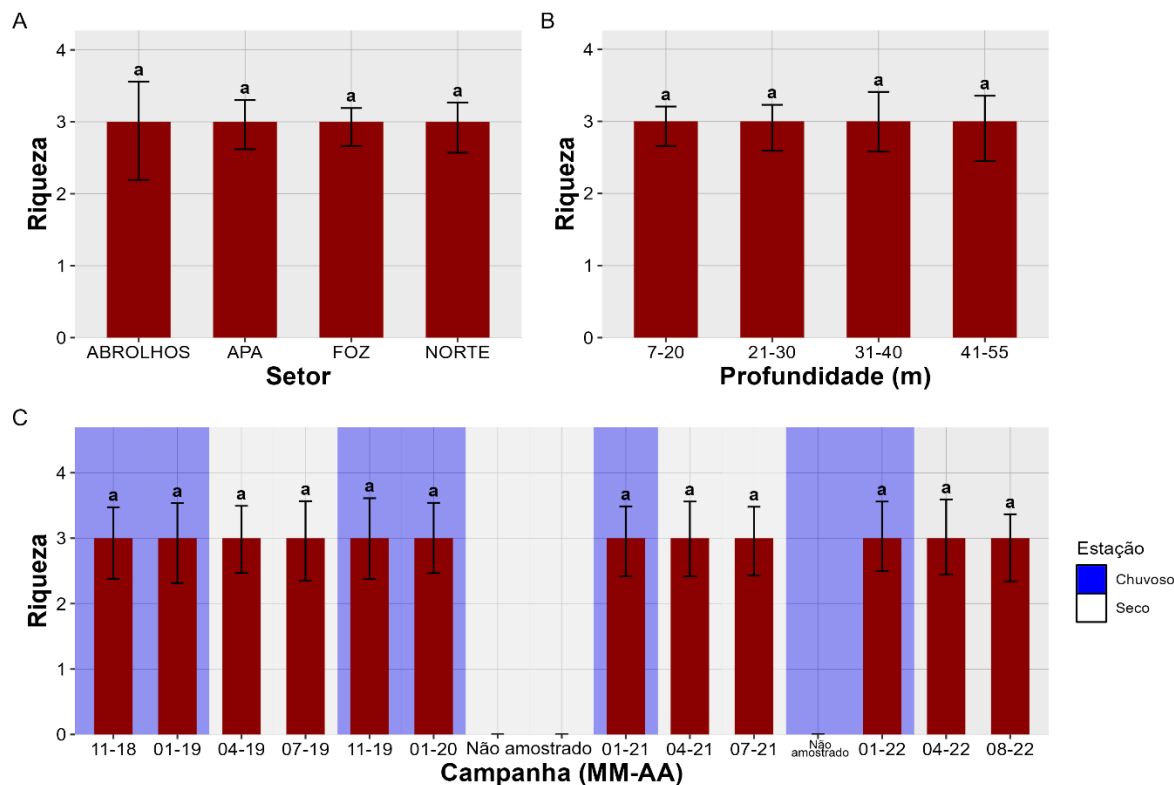
Para o índice de diversidade de Simpson da comunidade de Mollusca com partes moles, o setor Abrolhos mostrou valores significativamente superior ao de todos os outros setores. O setor Foz foi o segundo maior, mas apenas significativamente superior ao setor APA, que apresentou os menores valores registrados. De forma semelhante aos resultados de equitabilidade, não houve variações significativas entre as profundidades, e também se observou uma tendência de aumento nos valores de dominância com as profundidades. A campanha 11-18 apresentou os maiores valores de dominância, não sendo significativamente superior apenas aos da campanha 08-22. A campanha 08-22 também apresentou valores altos, não sendo significativamente mais altos apenas com relação as coletas 01-19, 11-19 e 01-20.

Figura 13: Abundância (Densidade) de vestígios de Mollusca entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



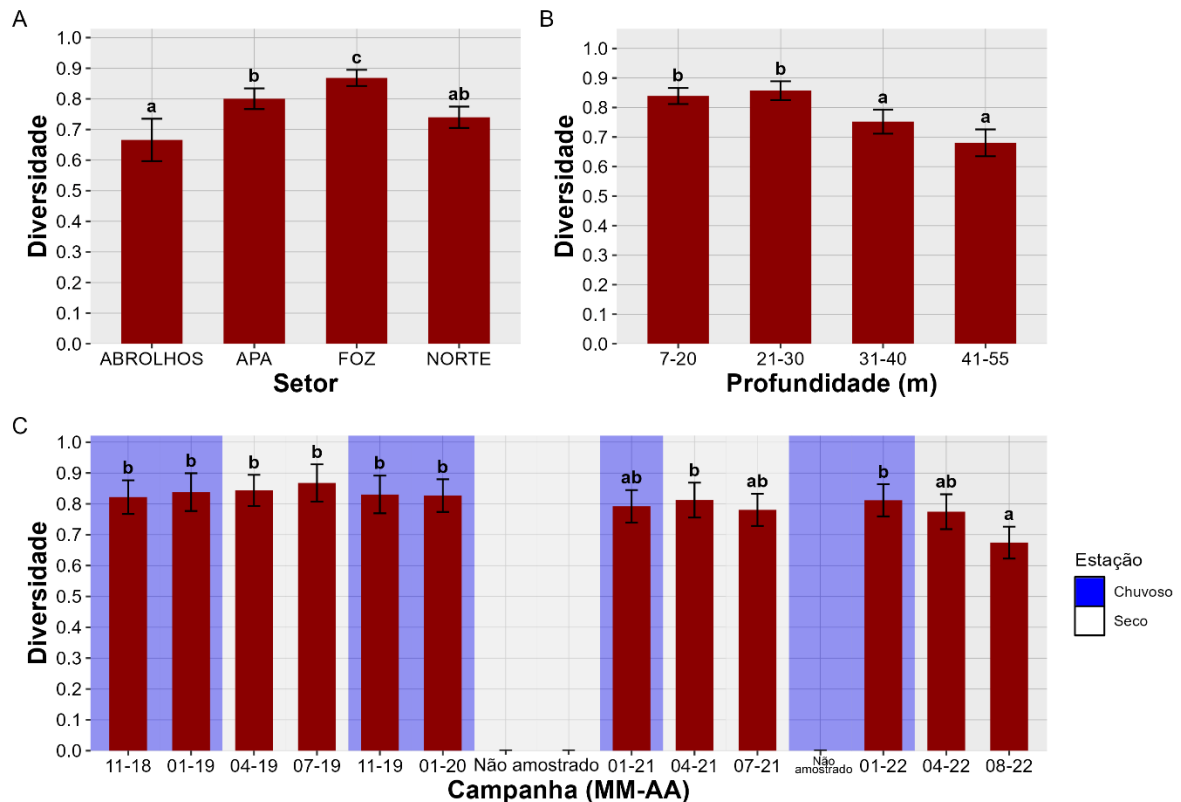
Os setores não apresentaram diferenças significativas na Abundância (Densidade) de vestígios de Mollusca. Entre as profundidades, o menor valor de abundância (densidade) de vestígios foi registrado para as amostras mais rasas (entre 7-20 m), e os maiores valores ocorreram entre 41-55 m, com diferenças significativas apenas entre as profundidades de 7-20 m e 21-30 m. Entre as campanhas, houve uma tendência sazonal, com os maiores valores registrados para a campanha do período seco de 08-22, que foi significantemente diferente das campanhas do período chuvoso de 11-19 e 01-20; 01-21 e 01-22, além das campanhas da estação seca (04-19 e 07-21). Esta campanha 08-22 ocorreu após intenso período de chuvas, com aumento da vazão do Rio Doce e, conseqüentemente, no aporte de rejeito para a plataforma, acarretando o aumento na abundância de vestígios.

Figura 14: Riqueza de vestígios de Mollusca entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



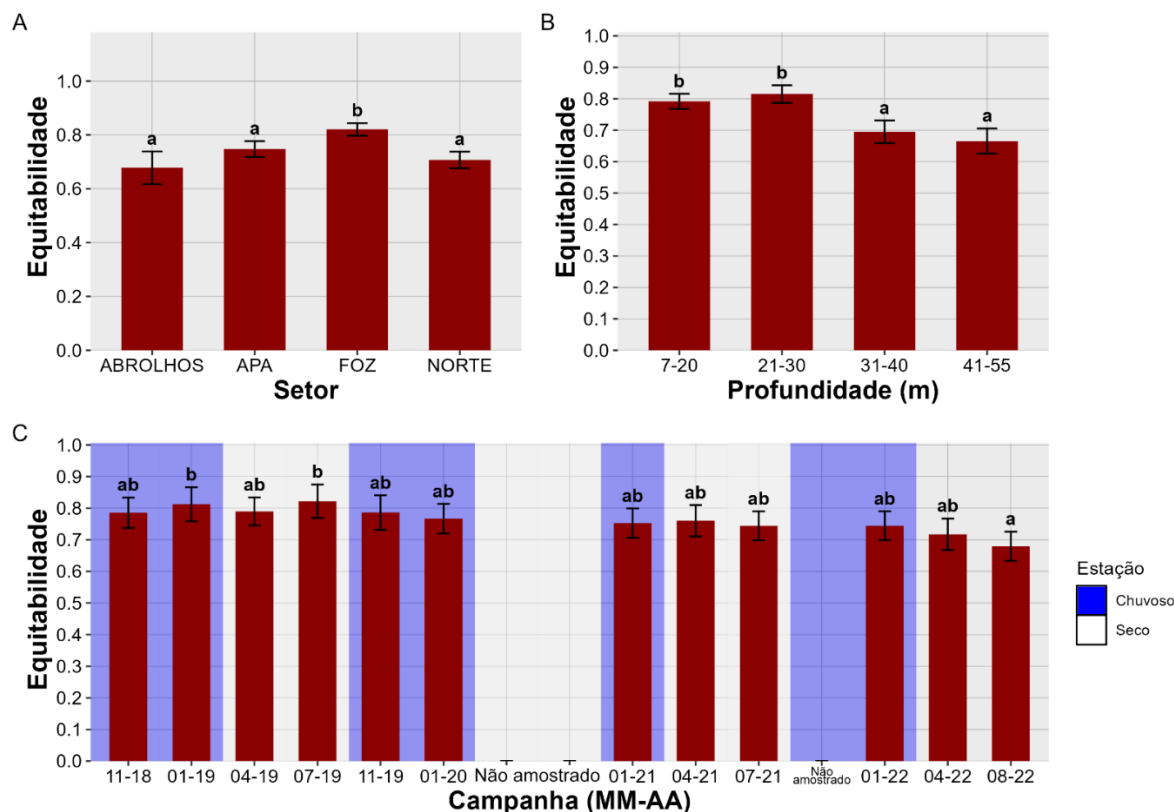
Para a riqueza dos vestígios de Mollusca, se repetiu o mesmo padrão observado para os Mollusca com partes moles, onde a riqueza foi consistente ao longo do monitoramento, sem diferenças significativas entre os setores, profundidades e campanhas.

Figura 15: Índice de diversidade de Shannon-Weaver de vestígios de Mollusca entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



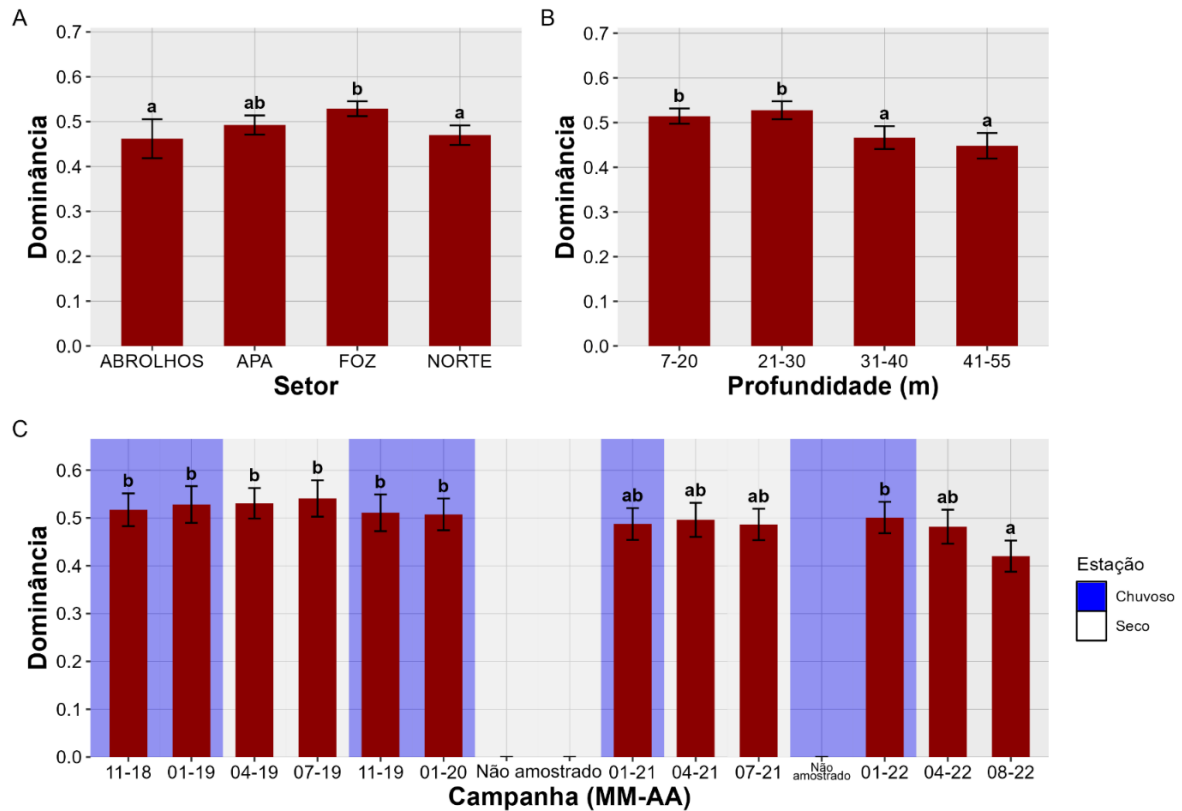
A diversidade de vestígios de Mollusca refletiu o cenário identificado para densidade e riqueza, evidenciando as unidades amostrais com maior morte de organismos. Entre os setores, a Foz apresentou os maiores valores, sendo significativamente diferente dos demais setores, enquanto Abrolhos apresentou os menores valores, sendo significativamente diferente apenas da Foz e da APA. O setor Norte apresentou valores de diversidade semelhantes a Abrolhos e APA. Entre as profundidades, os maiores valores de diversidade foram registrados para 7-20 m e 21-30 m, significativamente diferentes das profundidades de 31-40 m e 41-55 m. Para as campanhas, os vestígios apresentaram a menor diversidade na campanha 08-22, sendo esta significativamente diferente de todas as outras campanhas, exceto 01-21, 07-21 e 04-22. Entre as demais campanhas não foram observadas diferenças significativas.

Figura 16: Índice de equitabilidade de Pielou de vestígios de Mollusca entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



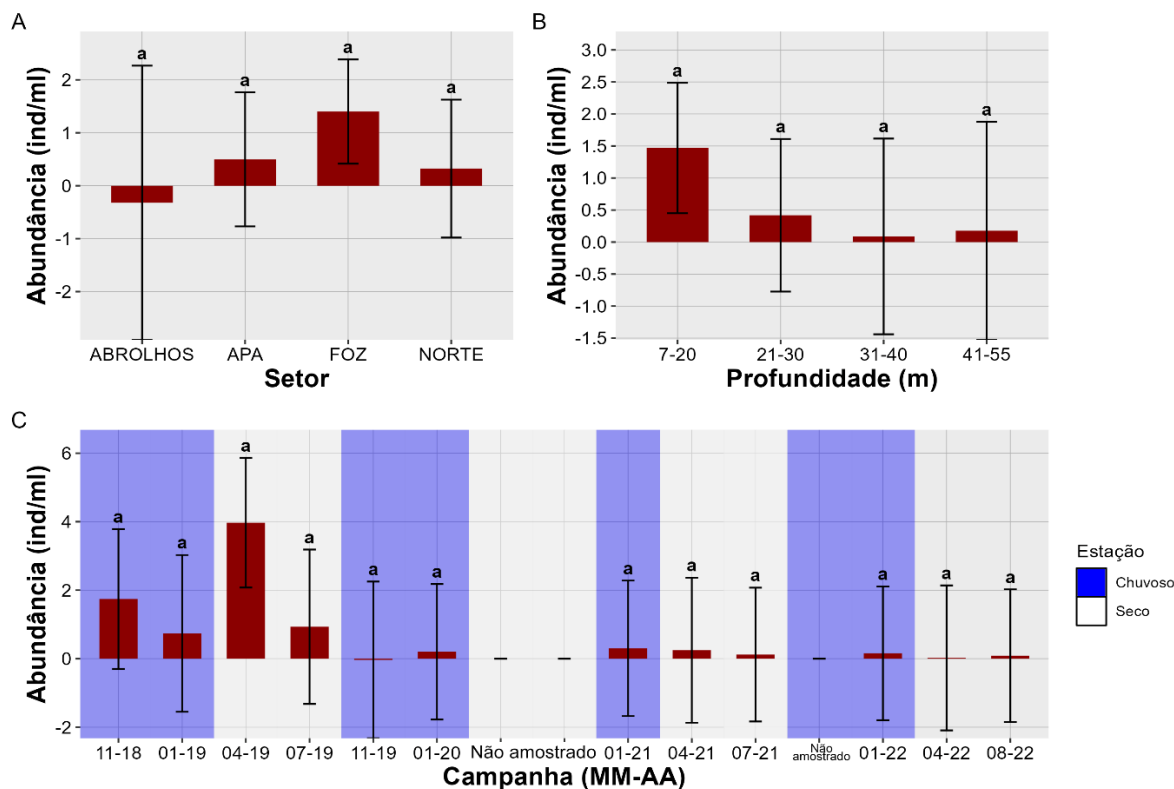
Para o índice de equitabilidade de Pielou de vestígios de Mollusca entre os setores, o setor Foz apresentou valores significativamente superiores aos dos outros, enquanto os outros não apresentaram diferenças significativas entre si. Para as profundidades, as profundidades mais rasas (07-20m e 21-30m) apresentaram valores significativamente mais altos que os das maiores profundidades (31-40m e 41-55m). Com relação as campanhas, houve pouca variação, com destaque apenas para a os valores da campanha 08-22, que apresentou os menores valores registrados, mas significativamente inferiores somente a 01-19 e 07-19.

Figura 17: Índice de diversidade de Simpson (Dominância) de vestígios de Mollusca entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



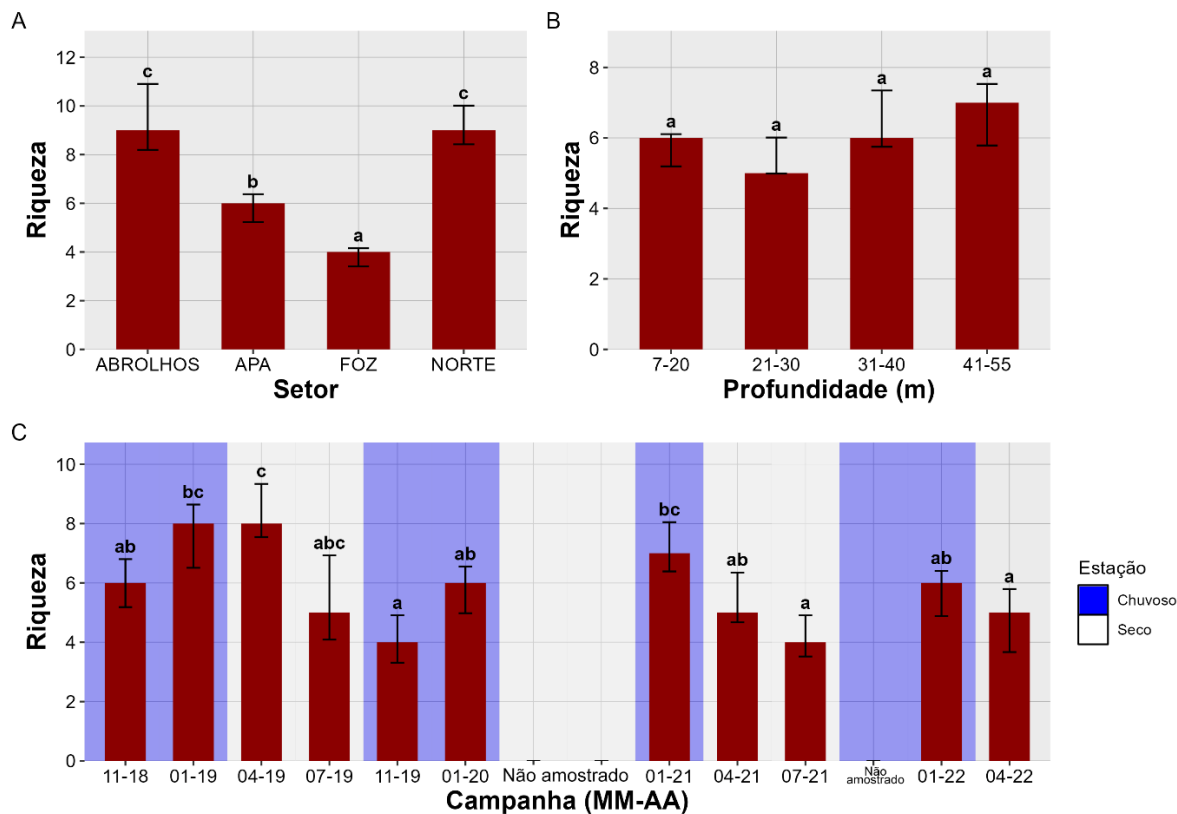
A Dominância de vestígios de moluscos mostrou padrões bastante semelhantes que os de Equitabilidade. O setor Foz apresentou valores significativamente superiores aos dos outros, exceto pelo resultado setor APA. Para as profundidades, as profundidades mais rasas (07-20m e 21-30m) apresentaram valores significativamente mais altos que os das maiores profundidades (31-40m e 41-55m). Com relação as campanhas, houve pouca variação, com destaque apenas para a os valores da campanha 08-22, que apresentou os menores valores registrados, significativamente inferiores a todas as outras campanhas exceto 01-21, 04-21, 07-21 e 04-22.

Figura 18: Abundância (Densidade) de Polychaeta entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



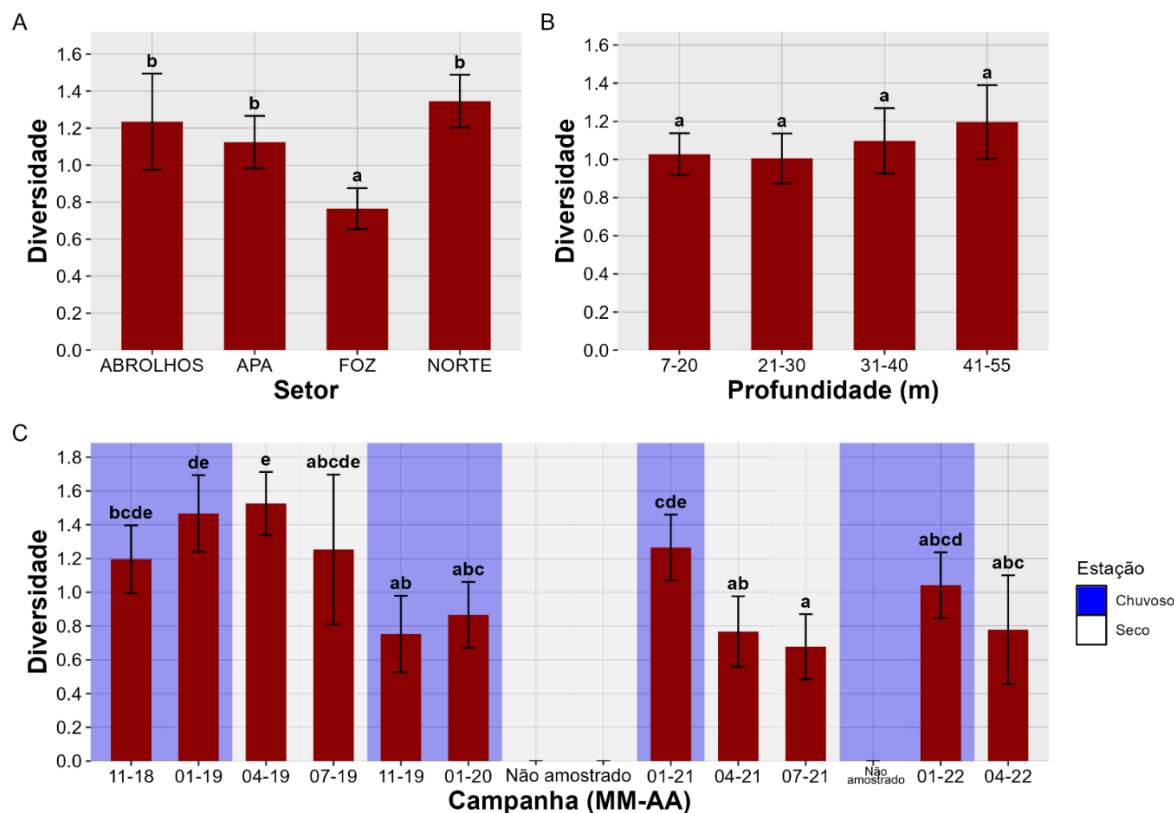
Embora as maiores abundâncias (Densidade) de Polychaeta tenham sido registradas no setor Foz, nas menores profundidades (7-20) e na campanha 04-19, não houve variação significativa entre os setores, profundidades e campanhas.

Figura 19: Riqueza de Polychaeta entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



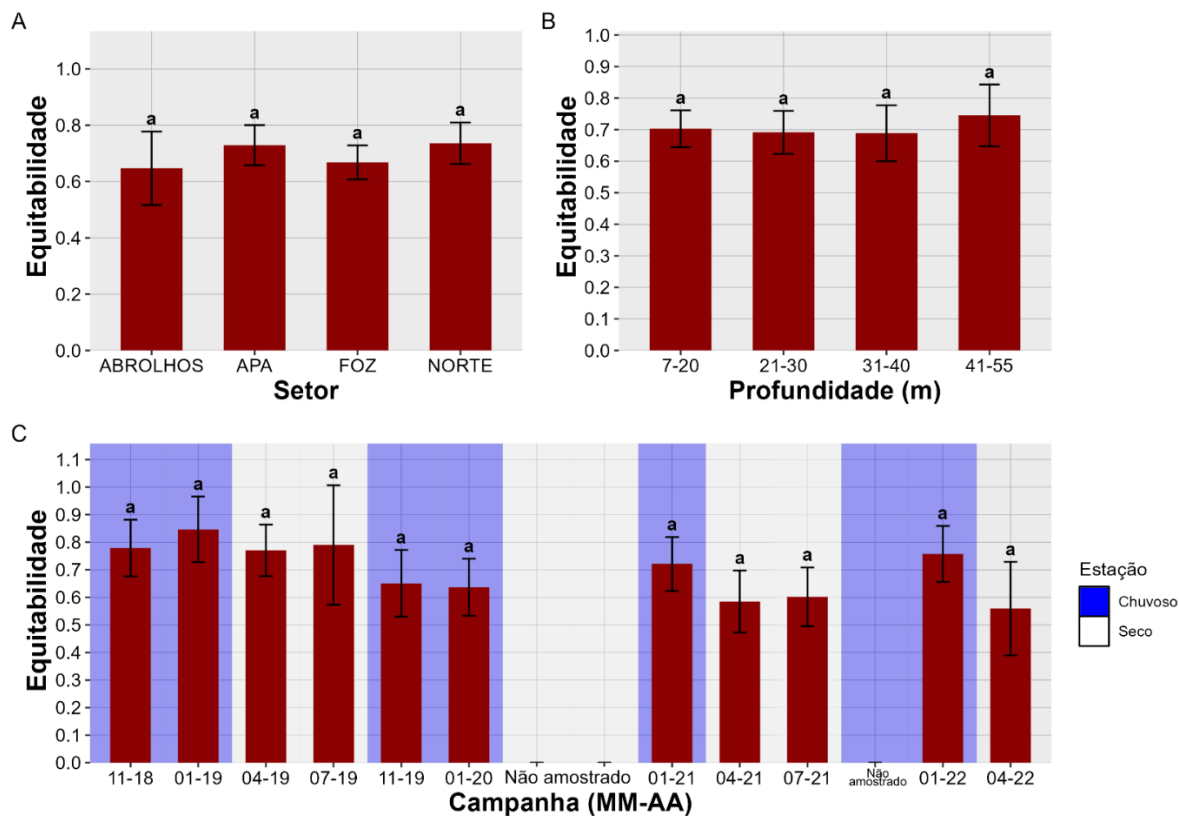
O setor Foz apresentou o menor valor de riqueza de Polychaeta, com diferença significativa entre os demais setores; seguida pela APA, também significativamente diferente dos demais setores; e por Norte e Abrolhos, com valores progressivos, mas sem diferença significativa entre si. Para as profundidades, as amostras não apresentaram diferenças significativas. Entre as campanhas, observou-se diferenças significativas entre 11-19, 07-21 e 04-22, que apresentaram os menores valores, com todas as outras campanhas, menos 11-18, 07-19, 01-20, 04-21 e 01-22. A amostra com o maior valor (04-19) apresentou diferença significativa em relação a todas as outras campanhas, exceto 01-19, 07-19 e 01-21.

Figura 20: Índice de diversidade de Shannon-Weaver da comunidade de Polychaeta entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



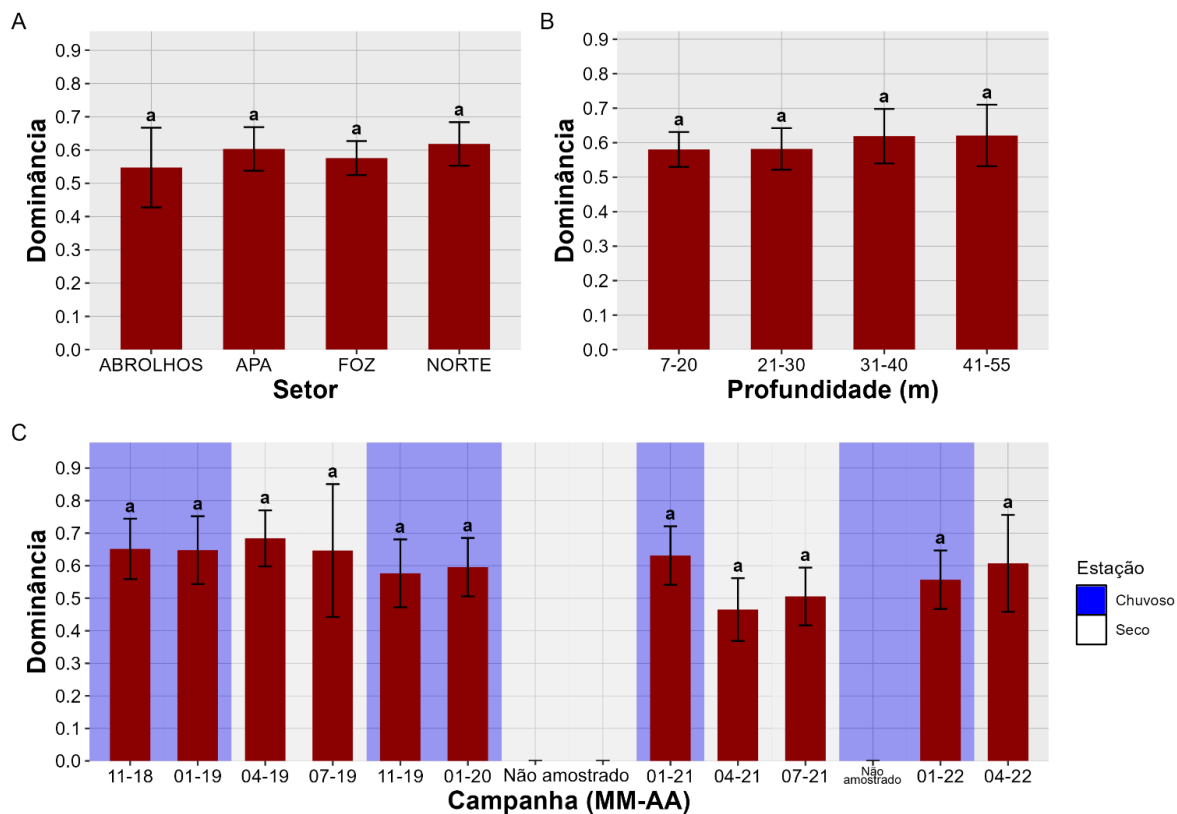
Para o índice de diversidade de Shannon-Weaver da comunidade de Polychaeta, a Foz apresentou os menores valores, com diferença significativa entre os demais setores. Entre as profundidades, observou-se a tendência a um aumento discreto da diversidade nas profundidades de 31-40 m e 41-55 m, entretanto sem diferenças significativas entre as categorias. Entre as campanhas, a diversidade teve um padrão sazonal mais claro do que o observado para a riqueza (descrito anteriormente), com amostragens com valores mais altos no período chuvoso do que no período seco, embora sem formar grupos sazonais significativamente diferentes entre si.

Figura 21: Índice de equitabilidade de Pielou da comunidade de Polychaeta entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



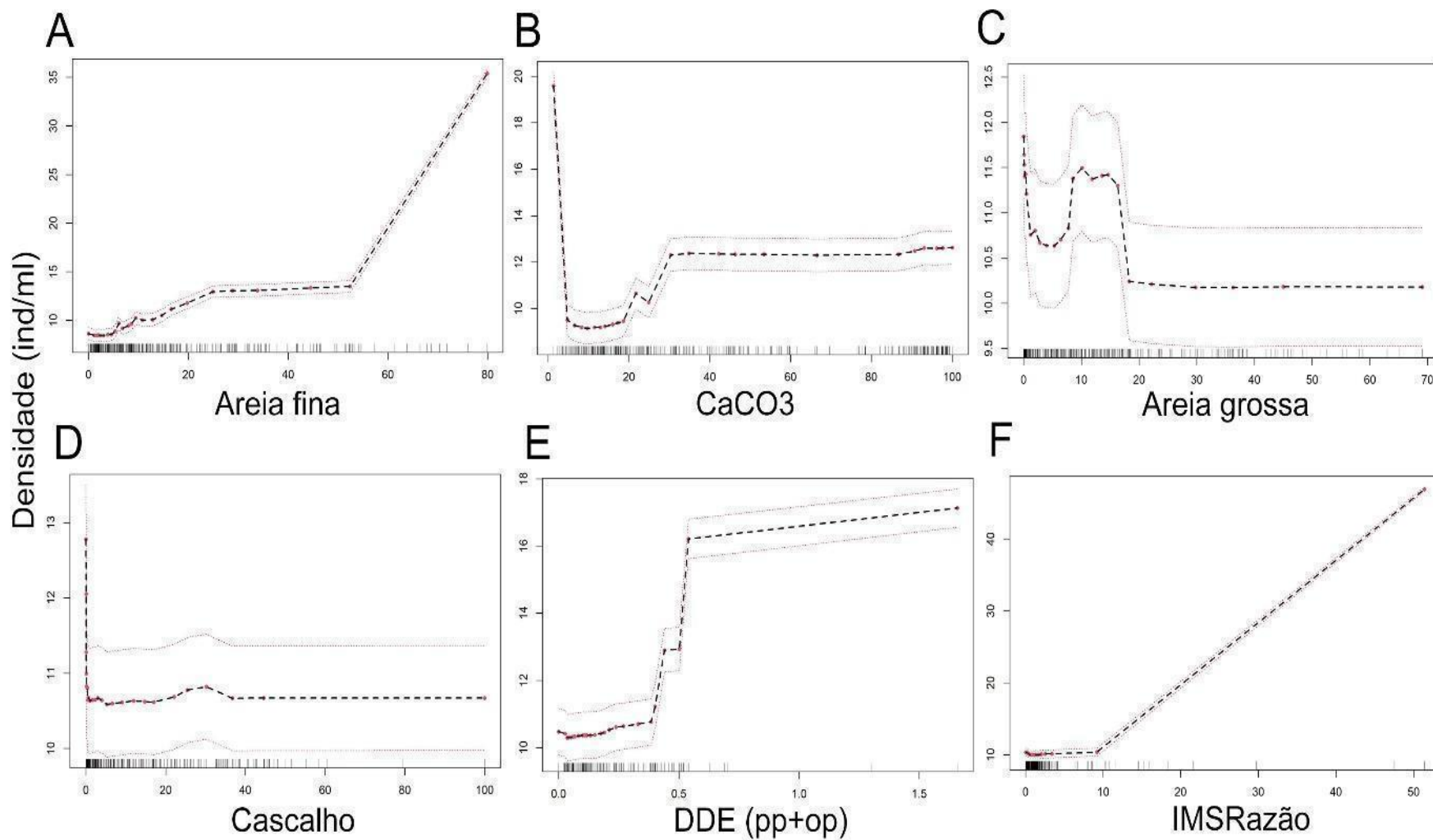
Os resultados não mostraram diferenças significativas para índice de equitabilidade de Pielou da comunidade de Polychaeta entre nenhuma das categorias de Setores, Profundidade ou Campanhas.

Figura 22: Índice de diversidade de Simpson (Dominância) da comunidade de Polychaeta entre os setores (A), profundidades (B) e campanhas (C). Barras indicam a média e as hastes o intervalo de confiança. Letras minúsculas representam a semelhança estatística das comparações par-a-par do teste post-hoc, com correção de Bonferroni, do modelo ajustado. Devido a pandemia de COVID-19, não houve campanhas amostrais entre março e dezembro/2020. A campanha de 10-21 não foi realizada por questões contratuais.



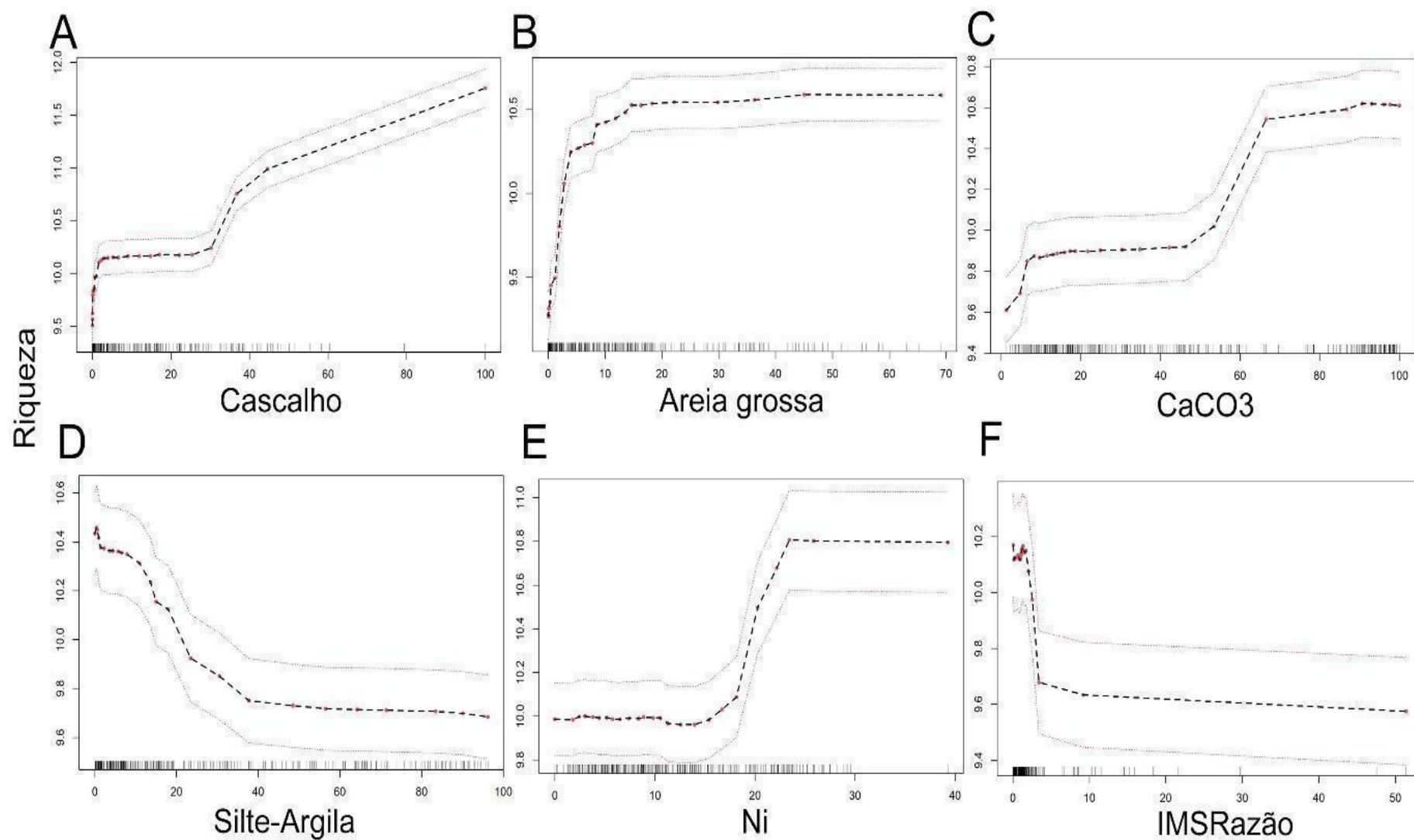
Os resultados não mostraram diferenças significativas para o índice de diversidade de Simpson (Dominância) da comunidade de Polychaeta entre nenhuma das categorias de Setores, Profundidade ou Campanhas.

Figura 23: Dependência parcial da densidade total da comunidade macrobentônica em relação às variáveis selecionadas no modelo de regressão Random Forest. Ordem de apresentação das variáveis representa a ordem de importância para o modelo.



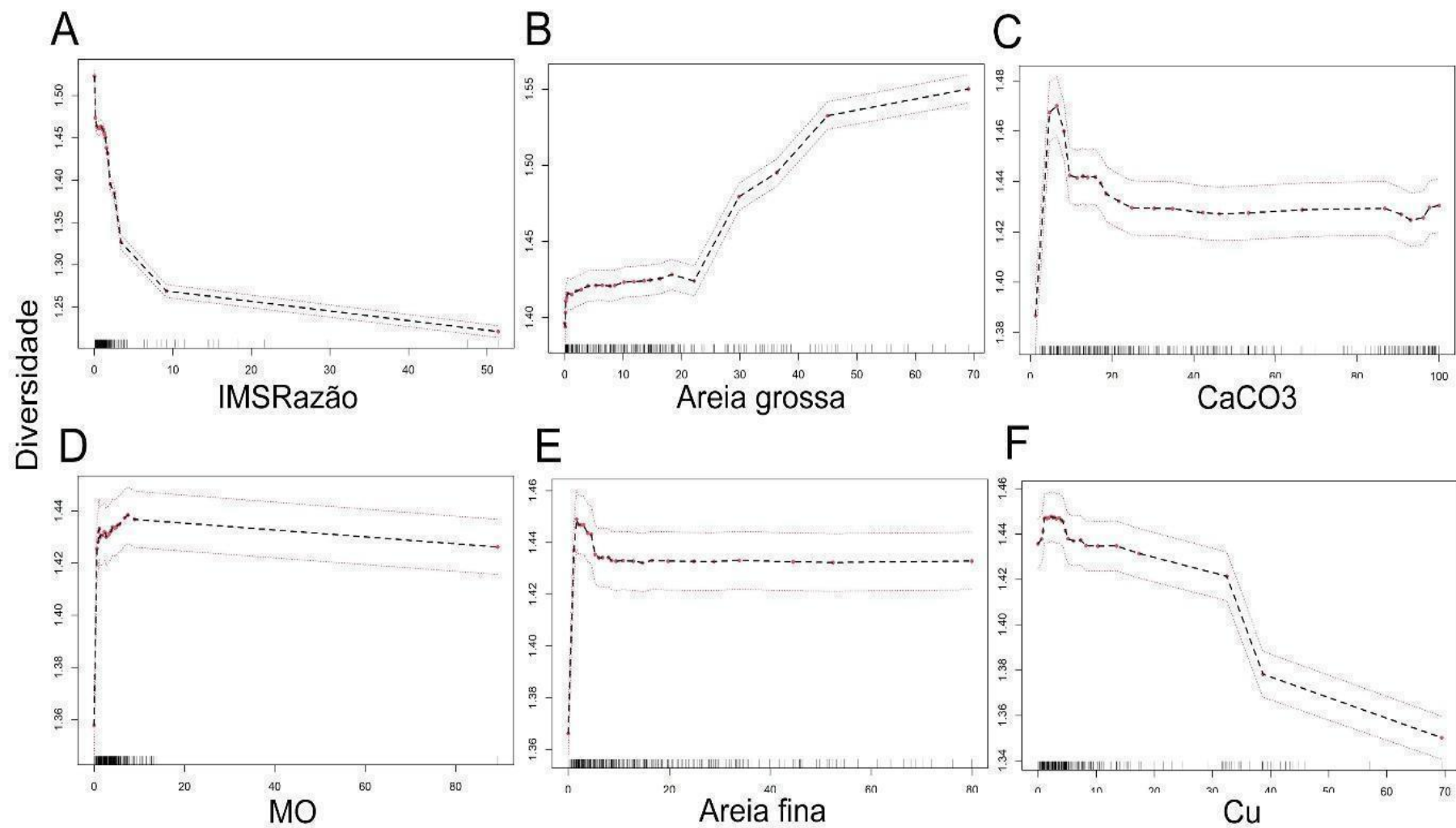
Entre as variáveis ambientais analisadas, os diferentes tipos de sedimento, como cascalho (relacionado aos maiores teores de carbonato de cálcio), areias grossas e areia mais finas foram as que mais influenciaram (positivamente correlacionados) na variação dos indicadores. Embora estes tipos de substrato tenham apresentado correlação positiva com os descritores da comunidade bentônica, os resultados evidenciam diferentes naturezas de efeitos. Os substratos com maior granulometria, cascalho e areia grossa, são caracterizados por altos teores de carbonato de cálcio, uma vez que são principalmente compostos por sedimento biodetrítico e bancos de rodolitos, ambientes que disponibilizam diferentes microhabitats, o que afeta a densidade de forma relativamente fraca. Por outro lado, o sedimento mais fino apresentou relação positiva com a densidade de organismos. Este aumento de densidade reflete o aumento de vestígios de organismos nestes substratos, o que é ainda mais evidenciado pela correlação negativa entre riqueza e silte-argila, dada a afinidade química de metais do rejeito (IMS) com a lama (silte-argila). O Índice Mineralógico do Ferro - IMS mostrou uma correlação positiva com a densidade de organismos. Este aumento na densidade observada está diretamente relacionado ao aumento na mortandade de organismos, discutido anteriormente como o aumento agudo na densidade de vestígios. De forma semelhante, o contaminante orgânico DDE foi correlacionado positivamente com a densidade. A presença desse tipo de contaminante entre as variáveis estruturadoras da comunidade bentônica também foi evidenciada para o Ano 1 e está relacionada a efeitos indiretos da passagem do rejeito. Embora não faça parte efetivamente da sua composição, sua presença em habitats marinhos é indicativo da chegada de materiais terrestres de granulação fina que fornece substrato para o carreamento desse tipo de composto terrestre, tornando-o disponível no ambiente marinho

Figura 24: Dependência parcial da riqueza da comunidade macrobentônica em relação às variáveis selecionadas no modelo de regressão Random Forest. Ordem de apresentação das variáveis representa a ordem de importância para o modelo.



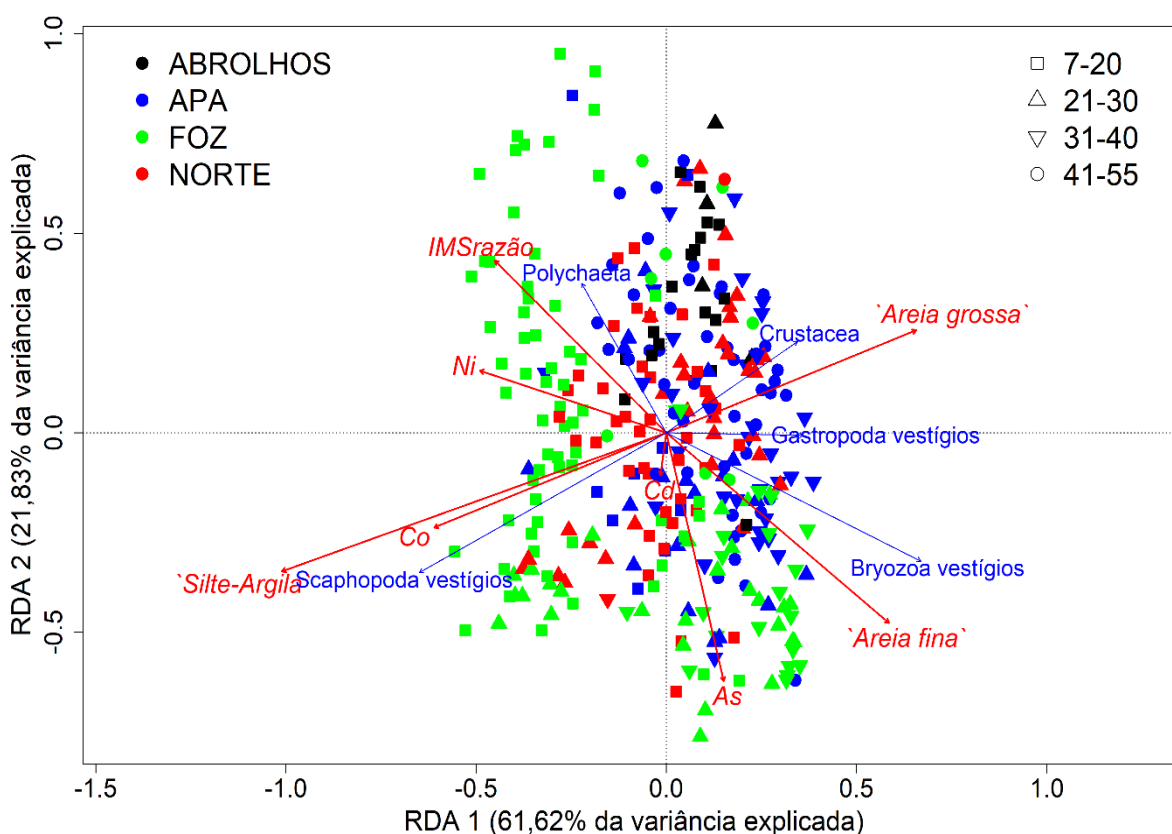
Entre as variáveis ambientais analisadas, os diferentes tipos de sedimento, como cascalho (relacionado aos maiores teores de carbonato de cálcio), areias grossas e areia mais finas foram as que mais influenciaram (positivamente correlacionados) na variação dos indicadores. Embora estes tipos de substrato tenham apresentado correlação positiva com os descritores da comunidade bentônica, os resultados evidenciam diferentes naturezas de efeitos. Os substratos com maior granulometria, cascalho e areia grossa, são caracterizados por altos teores de carbonato de cálcio, uma vez que são principalmente compostos por sedimento biodetrítico e bancos de rodolitos, ambientes que disponibilizam diferentes microhabitats, o que está refletido na correlação positiva com a riqueza, sendo as variáveis ambientais com maior importância para explicar sua variação. O Índice Mineralógico do Ferro - IMS mostrou uma correlação negativa com a riqueza, embora relativamente fraca quando comparado com o seu efeito sobre a diversidade (conforme descrito abaixo). Esses resultados mostram que a riqueza dos organismos indicadores tratados aqui diminui significativamente nas amostras com presença do rejeito, apontada pelo Índice Mineralógico do Ferro (IMS). De maneira geral, para os descritores de comunidade analisados, a contribuição dos efeitos da presença de lama na estruturação das comunidades é potencializada pela presença e intensidade do rejeito (IMS). Este cenário tem sido demonstrado ao longo de todo o monitoramento.

Figura 25: Dependência parcial do índice de diversidade de Shannon-Weaver da comunidade macrobentônica em relação às variáveis selecionadas no modelo de regressão Random Forest. Ordem de apresentação das variáveis representa a ordem de importância para o modelo.



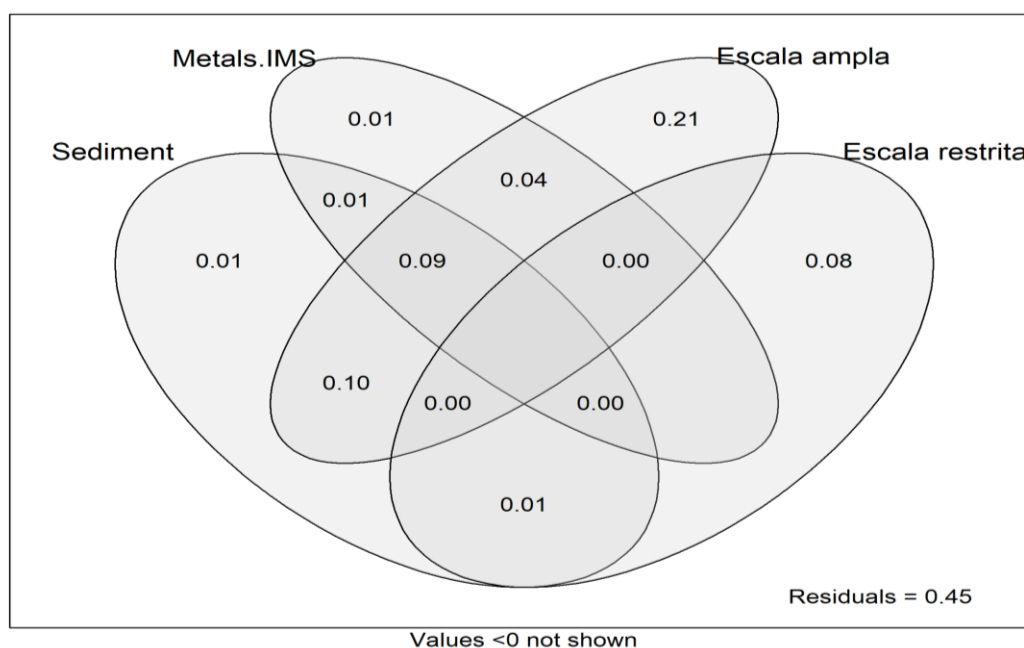
O Índice Mineralógico do Ferro - IMS mostrou uma correlação negativa com a riqueza e diversidade. De fato, para densidade esta foi a métrica ambiental com maior poder explicativo. Esses resultados mostram que a diversidade dos organismos indicadores tratados aqui, especialmente os táxons mais raros, diminuem drasticamente nas amostras com presença do rejeito, apontada pelo Índice Mineralógico do Ferro (IMS). De maneira geral, para os descritores de comunidade analisados, a contribuição dos efeitos da presença de lama na estruturação das comunidades é potencializada pela presença e intensidade do rejeito (IMS), este cenário tem sido demonstrado ao longo de todo o monitoramento. Os diferentes tipos de sedimento, como cascalho (relacionado aos maiores teores de carbonato de cálcio), areias grossas e areia mais finas foram as que mais influenciaram (positivamente correlacionados) na variação dos indicadores. Os substratos com maior granulometria, cascalho e areia grossa, são caracterizados por altos teores de carbonato de cálcio, uma vez que são principalmente compostos por sedimento biodetrítico e bancos de rodolitos, ambientes que disponibilizam diferentes microhabitats, o que está refletido na correlação positiva com a diversidade.

Figura 26: Resultado da ordenação por RDA das estações amostrais para a comunidade macrobentônica para os Anos 1, 2, 3 e 4 entre os setores Foz, Norte, APA e Abrolhos. As cores identificam os setores e as formas as profundidades de cada estação. As setas indicam os eixos de ordenação das variáveis.



A estruturação da comunidade macrobentônica nos quatro anos de monitoramento foi espacialmente bem marcada e dependente principalmente da composição do sedimento, como era de se esperar, mas também da correlação entre a variável IMSRazão e o percentual de lama (silte-argila). Essa influência é dependente da escala espacial utilizada, ganhando destaque, principalmente, quando os setores distintos são comparados. Foi identificada uma clara distinção entre as comunidades macrobentônicas presentes no setor Foz do Rio Doce e em áreas adjacentes, ao sul – nas estações mais rasas do setor APA/REVIS, e sobretudo no setor Norte, na localidade de Degredo. Esses resultados evidenciam a amplitude espacial do impacto do rejeito, identificado principalmente pelos valores mais altos de IMS associado às maiores concentrações de silte-argila e Cobalto, sobre a estrutura das comunidades bentônicas, nestas estações próximas à Foz do Rio Doce e regiões adjacentes à costa. Nas áreas com os mais altos valores de IMS, observa-se que há uma predominância de Polychaetas, especialmente de grupos resistentes, como Spionidae e Magelonidae, já conhecidos na literatura por resistirem a contaminações por metais e soterramento. Esse padrão coincide com o observado para a evolução espaço-temporal do sinal de rejeito e com o padrão de longo-prazo do transporte de sedimento já reportado para a região marinha rasa adjacente à foz do Rio Doce.

Figura 27: Partição da influência das variáveis ambientais na variação apresentada na RDA.



Avaliando a contribuição individual e combinada, de cada partição das variáveis abióticas, observa-se que, da variação explicada pelo modelo utilizado na RDA, 1% é explicada tanto pela matriz ambiental, quanto pela matriz de metais. A maior contribuição para a explicação é dada pela matriz espacial em larga escala com 21%, indicando uma variabilidade relacionada com a dimensão geográfica da área de monitoramento. Apesar disso, a interação entre as matrizes Metal-IMS e espacial em larga escala contribui com 4% de explicação, além de mais 9% quando essas matrizes interagem com a matriz ambiental de sedimento, especialmente silte-argila, evidenciando a potencialização do efeito da lama pela presença do rejeito na estruturação da comunidade bentônica. A manutenção da integração da matriz Metal-IMS entre as principais variáveis estruturadoras da comunidade, reforça a relação direta entre presença do rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão e a estrutura da macrofauna bentônica marinha.

4 ITENS PREVISTOS E NÃO REALIZADOS: JUSTIFICATIVAS

Não houve nenhum item previsto não realizado.

5 REFERÊNCIAS

- ALBANO, P.G.; SABELLI, B. Comparison between death and living molluscs assemblages in a Mediterranean infralittoral off-shore reef. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 310, 206–215, 2011.
- KIDWELL, S.M. Time-averaged molluscan death assemblages: Palimpsests of richness, snapshots of abundance. *Geology*, 30(9), 803–806, 2002.
- KIDWELL, S.M. Ecological fidelity of open marine molluscan death assemblages: effects of post-mortem transportation, shelf health, and taphonomic inertia. *Lethaia*, 41, 199–217, 2008.
- KIDWELL, S.M.; TOMASOVYCH, A. Implications of Time-Averaged Death Assemblages for Ecology and Conservation Biology. *Annual Review of Ecology, Evolution, and Systematics*, 44, 539–63, 2013.
- LEGENDRE, P.; LEGENDRE, L. *Numerical Ecology*. Elsevier, 1006 p, 2012.
- RYU, J.; KIM, J.S.; KANG, S.G.; KANG, D.; LEE, C.H.; KOH, C.H. The impact of heavy metal pollution gradients in sediments on benthic macrofauna at population and community levels. *Environmental Pollution*, 159 (10), p. 2622–2629, 2011.
- WARWICK, R.M.; CLARKE, K.R. Comparing the severity of disturbance; a meta-analysis of marine macrobenthic community data. *Marine Ecology Progress Series*, 92(3), 221–231, 1993.
- ZALMON, I.R., REZENDE, C.E.; VELOSO, V.G.; SALLORENZO, I.A.; PARANHOS, R.; FALCÃO, A.P.; ALMEIDA, T.C.M. Influence of estuarine dynamics on macrobenthos spatial variability along the southeast continental shelf of Brazil. *Scientia Marina*, 79(3), 379–391, 2015.