

**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- 44/ NOV 23

RSE2023 PMBA/FEST

Vitória,

Novembro de 2023

SUMÁRIO

1	HISTÓRICO DE MALHA E FREQUÊNCIA AMOSTRAL	3
2	RESULTADOS DOS INDICADORES	3
2.1	ÍNDICE DE BIODIVERSIDADE.....	4
3	REFERÊNCIAS	34

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 continuidade do monitoramento, apresentadas e aprovadas em 2022, visando o “Novo Ciclo do PMBA/Fest”.

As modificações implementadas se encontram nos seguintes Materiais Suplementares: 1) **MS – Malha e Frequência amostral**, onde as diferentes malhas e frequências amostrais são apresentadas nas abas “Ano 1”, “Transição”, “Novo Ciclo” e “Histórico Frequências” e 2) **MS – Mapas das malhas amostrais**, com a espacialização histórica referente às malhas amostrais dos Ambientes. Como forma de esclarecer os períodos contemplados em cada uma delas, “Ano 1” se refere às estações amostrais 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, à exceção do grupo da Ecotoxicologia, que iniciou a amostragem referente ao Novo Ciclo em janeiro de 2023.

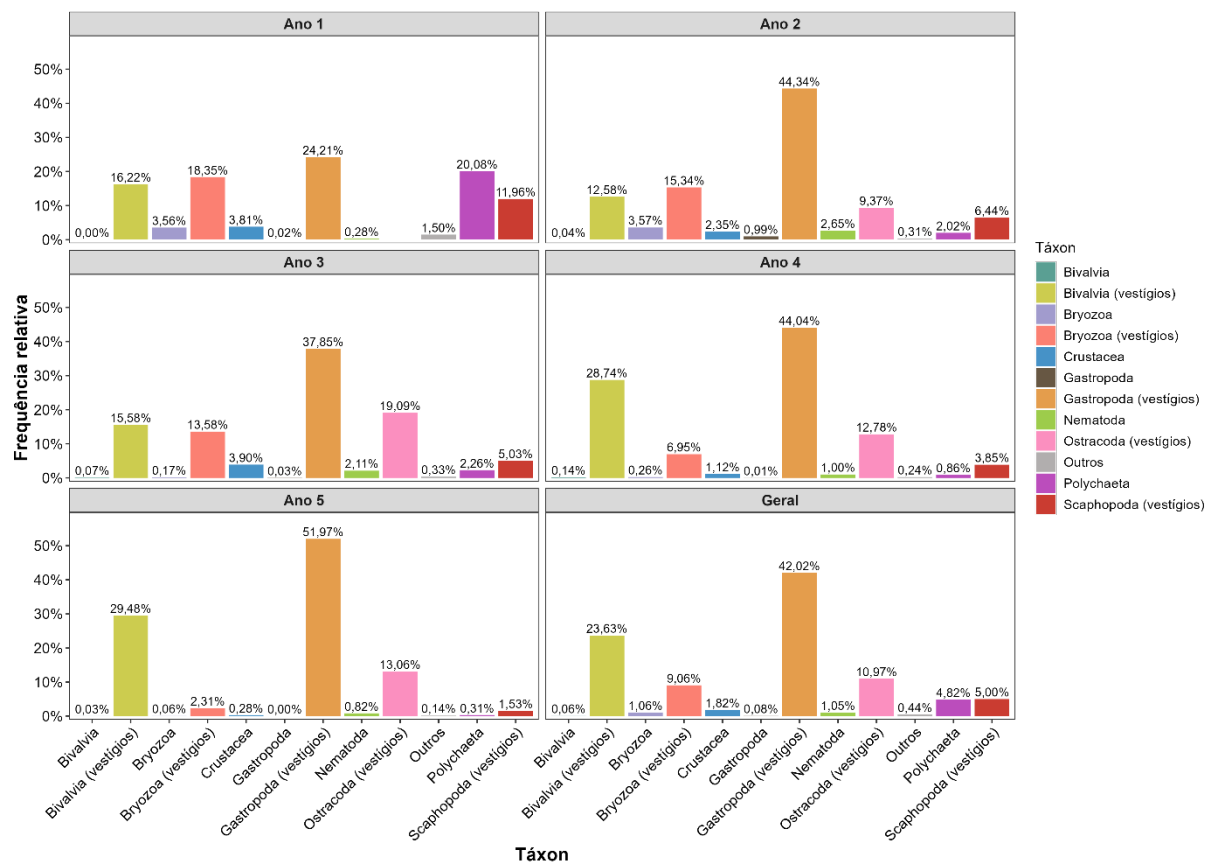
2 RESULTADOS DOS INDICADORES

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 – março/2023) na área ambiental I. Vale ressaltar que, os indicadores aqui apresentados têm como propósito clarificar e sintetizar a historicidade dos resultados, interpretação e conclusões do monitoramento, promovendo o acompanhamento espaço-temporal da qualidade ambiental e biodiversidade, além de configurarem importantes ferramentas de suporte aos gestores ambientais. A partir destes indicadores, pode-se identificar os impactos com relação direta ou indireta ao rompimento da Barragem de Fundão, em Mariana (MG).

Os indicadores do PMBA/Fest vêm se consolidando ao longo do monitoramento e, seguindo a proposta estabelecida desde o Relatório Anual de 2022 (RA2022), a apresentação dos resultados será exclusivamente a partir da apresentação dos indicadores, acompanhados de legenda estendida com a explicação de sua variação espaço-temporal de forma mais direta e objetiva como se segue:

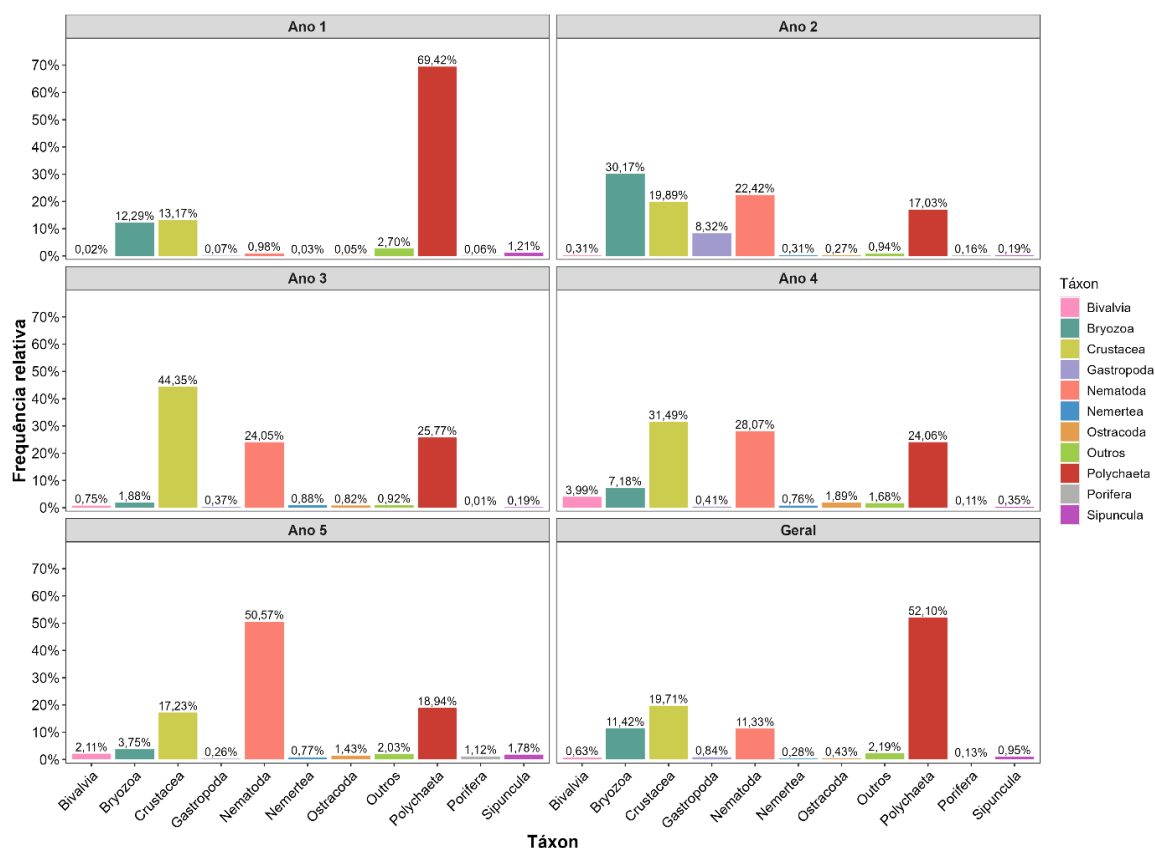
2.1 ÍNDICE DE BIODIVERSIDADE

Figura 1: Composição taxonômica da macrofauna bentônica.



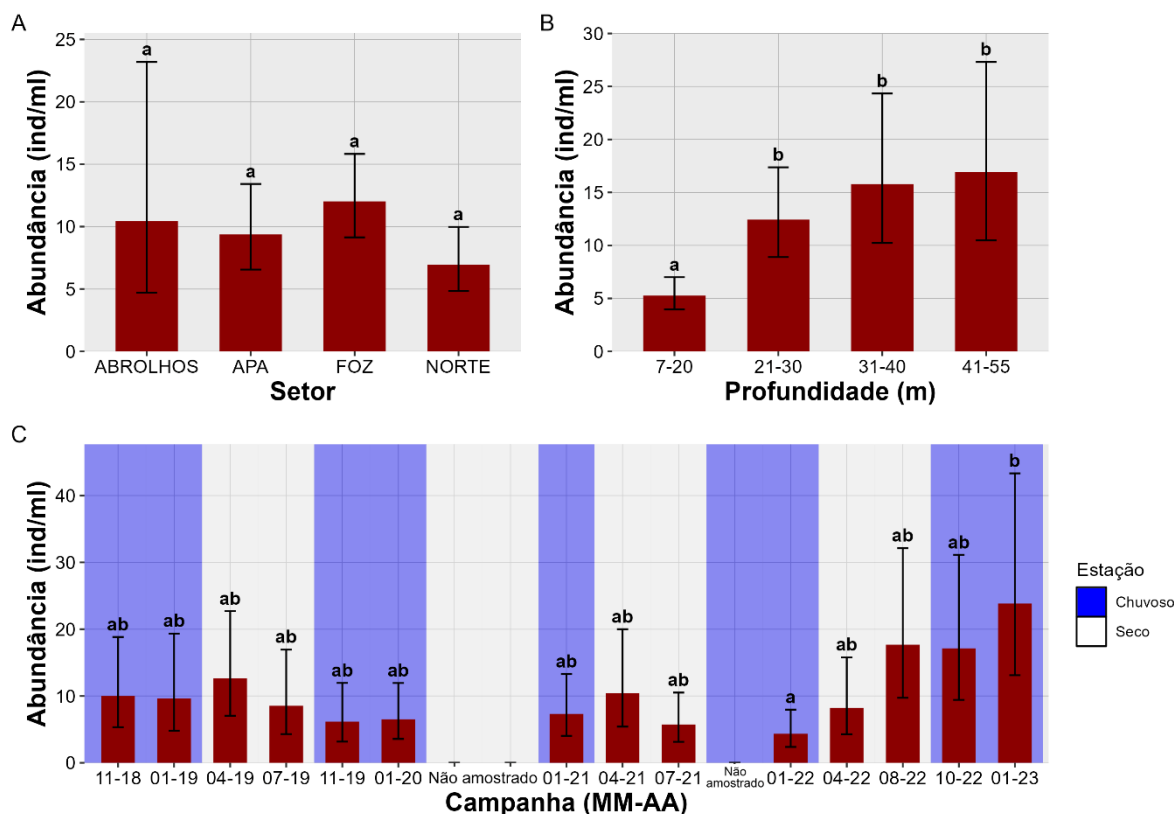
A figura 1 apresenta os principais grupos taxonômicos da macrofauna bentônica, incluindo os vestígios, e suas contribuições para o total de organismos registrados durante todo o período amostral (Geral) e em cada ano de monitoramento. Os táxons cuja frequência relativa na comunidade foi menor ou igual a um por cento em todos os anos de monitoramento (exceto os táxons indicadores Bivalvia e Gastropoda partes moles) foram somados e agrupados em uma categoria única chamada “Outros”. Durante o período de monitoramento foram registrados 952.538 indivíduos (Ano 1 (set/18 a set/19) = 232.839 ind.; Ano 2 (out/19 a set/20) = 111.101 ind.; Ano 3 (out/20 a set/21) = 203.019 ind., Ano 4 (out/21 a set/22) = 221.531 ind. e Ano 5 (out/22 a mar/23) = 184.048), identificados e quantificados conforme previsto pela Meta 1 deste tema. Do início do monitoramento até o período chuvoso de 2023 foram identificados 14 filos, sendo estes: Porifera, Cnidaria, Platyhelminthes, Nematoda, Nemertea, Mollusca, Annelida, Arthropoda, Echinodermata, Brachiopoda, Bryozoa, Entoprocta, Hemichordata e Chordata. Dentre esses, Mollusca, Arthropoda (subfilo Crustacea, Classe Ostracoda) e Bryozoa se destacaram como mais abundantes, especialmente os vestígios, considerando o grau de preservação desse material, sem marcas de rolamento, ou seja, vestígios recentes e pertencentes ao local de coleta. As maiores abundâncias de vestígios foram registradas para Mollusca, especialmente para as Classes Gastropoda, Bivalvia e Scaphopoda, que compreenderam 99,74% do total de exemplares do grupo encontrado e 70,53% do total geral de organismos amostrados ao longo de todo o monitoramento. Entre os anos, a tendência observada foi de que os grupos vestigiais (ex: vestígios de Bivalvia e Gastropoda) tornaram-se mais representativos ao mesmo tempo em que grupos de organismos com partes moles tornaram-se menos abundantes.

Figura 2: Composição taxonômica da macrofauna bentônica excluindo os vestígios.



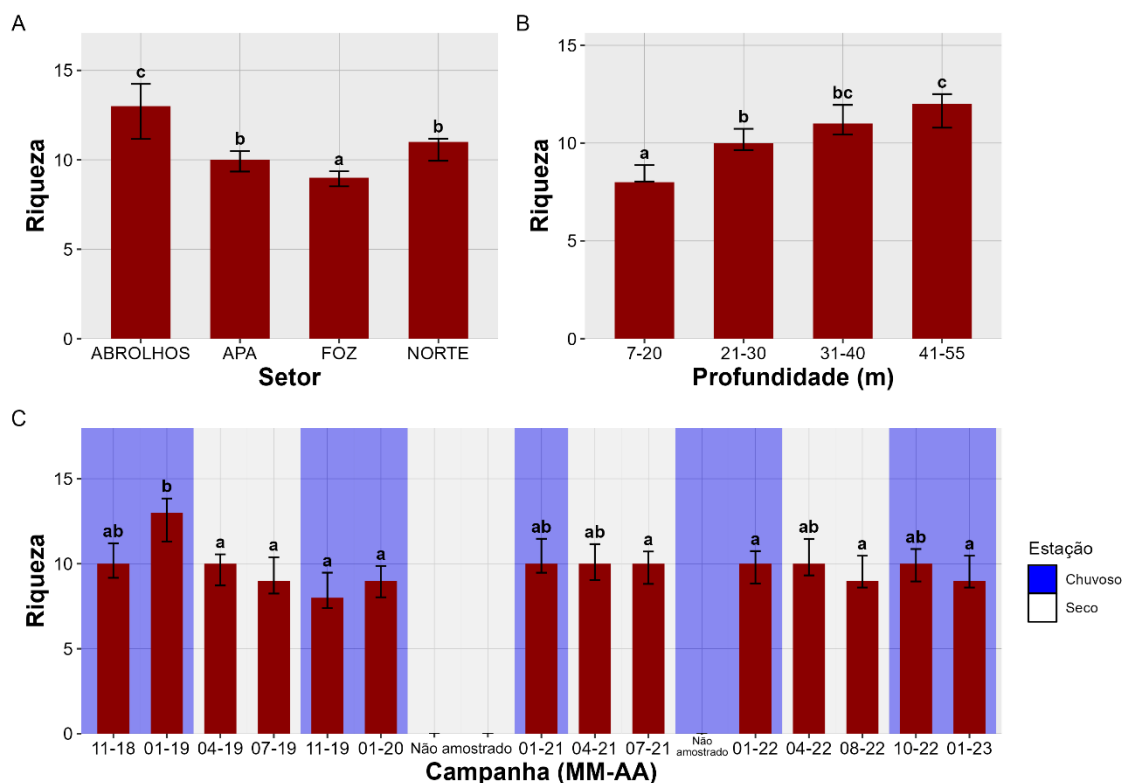
A figura 2 ilustra os principais grupos taxonômicos da macrofauna bentônica, excluindo os vestígios, e suas contribuições para o total de organismos registrados durante todo o período amostral (Geral) e em cada ano de monitoramento. Os táxons cuja frequência relativa na comunidade foi menor ou igual a um por cento em todos os anos de monitoramento foram somados e agrupados em uma categoria única chamada “Outros”. Entre os 14 filos identificados até o momento, considerando-se apenas os organismos com partes moles, observa-se que a abundância expressiva de Mollusca é totalmente suprimida e Annelida, Classe Polychaeta, passa a ser o grupo mais abundante, seguido por Crustacea, Bryozoa e Nematoda. Temporalmente, é observada uma queda acentuada na abundância de Bryozoa com partes moles a partir do Ano 2 (out/19 a set/20) e um aumento considerável na quantidade de Nematoda registrado no último ano de monitoramento.

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.



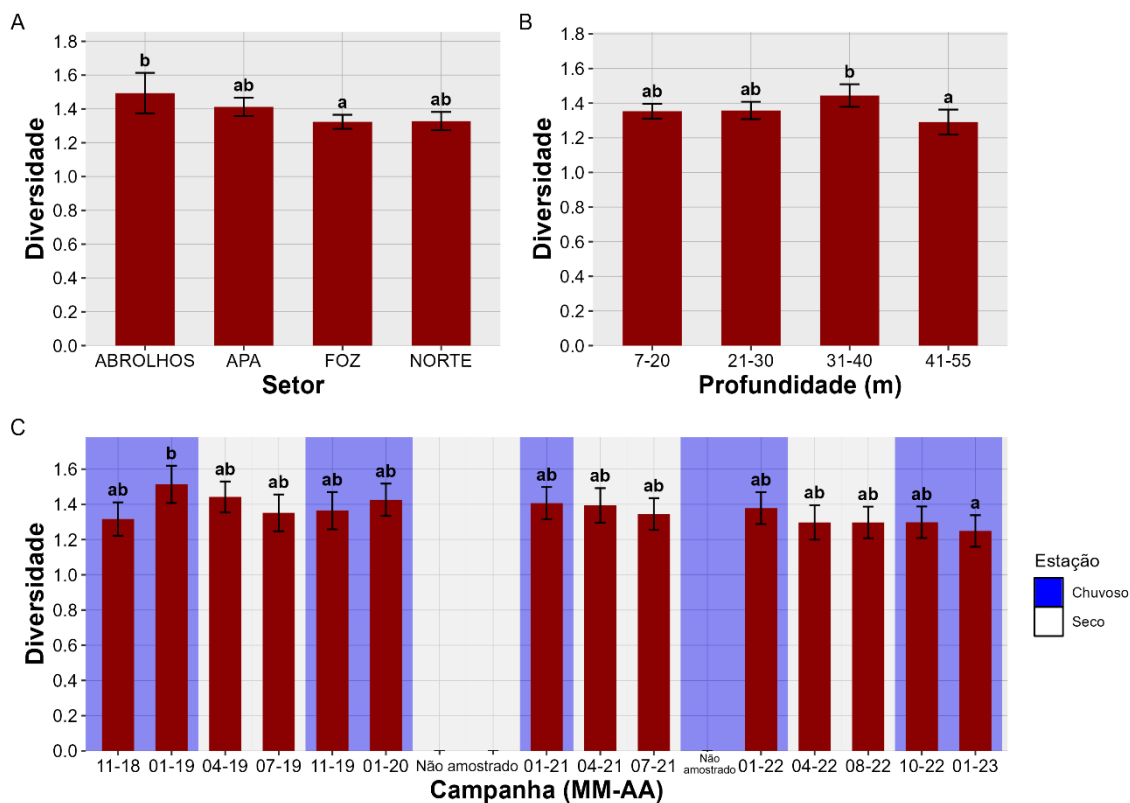
Os maiores valores absolutos de abundância (densidade) de organismos da macrofauna foram registrados para o setor Abrolhos (vide amplitude do intervalo de confiança do valor médio), seguido da Foz e APA e os menores valores no setor Norte, entretanto, não foram encontradas diferenças significativas entre os setores. Quanto à profundidade, as amostras mais rasas (entre 7-20 m) apresentaram os menores valores médios de densidade e se diferenciam significativamente das demais categorias. Entre as campanhas, os menores valores médios de densidade observados em 01-22 mostraram diferença significativa em relação à campanha de 01-23, que apresentou os maiores valores. O contínuo aumento dos valores de abundância registrado a partir da campanha de 08-22 esteve associado a alta representatividade de vestígios de Mollusca (que será apresentado posteriormente), não indicando recuperação da macrofauna e sim uma tendência de aumento na mortandade de organismo

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.



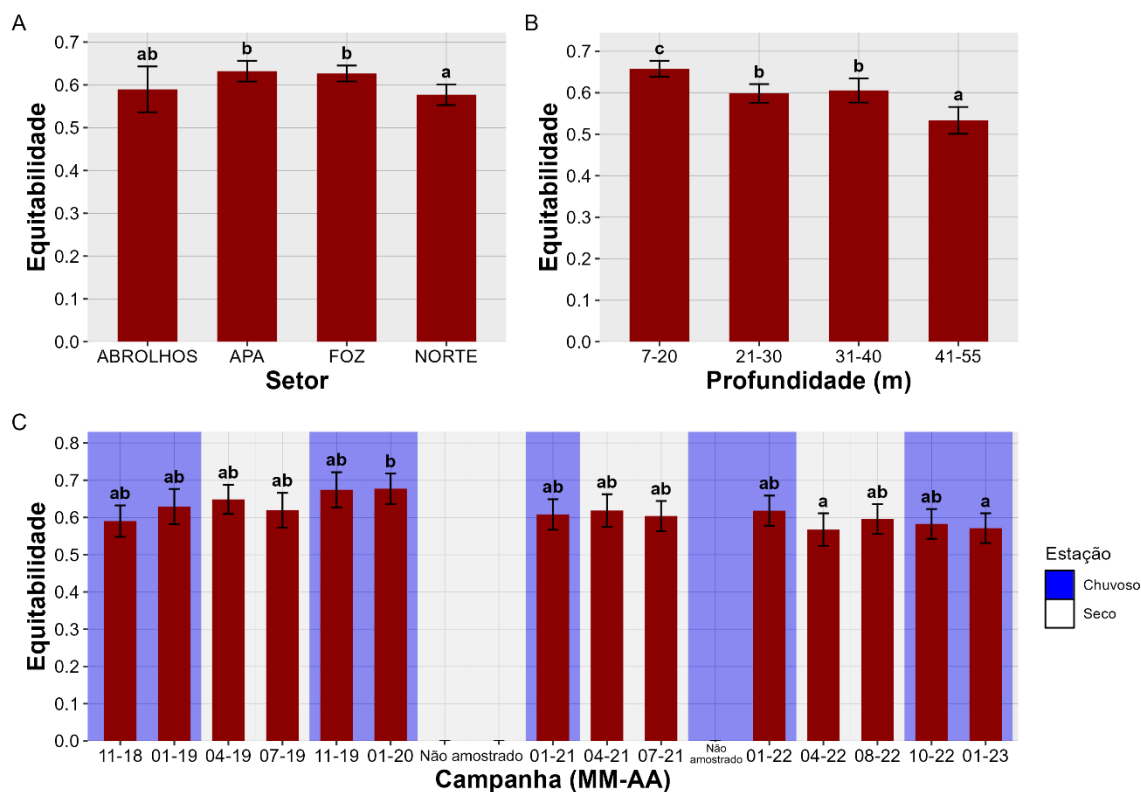
Para os valores médios de riqueza de organismos da macrofauna, o setor da Foz apresentou o menor número de táxons, enquanto que no setor Abrolhos foi registrado o maior valor, sendo estes significativamente diferentes dos demais setores. As amostras de profundidade 7-20 m apresentaram riqueza significativamente menor em relação às demais. Ao longo do monitoramento, poucas variações foram registradas para a riqueza, com valores significativamente maiores para 01-19 em relação a maioria das demais campanhas, e os menores valores para 11-19.

Figura 5: Índice de diversidade de Shannon-Wiener 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.



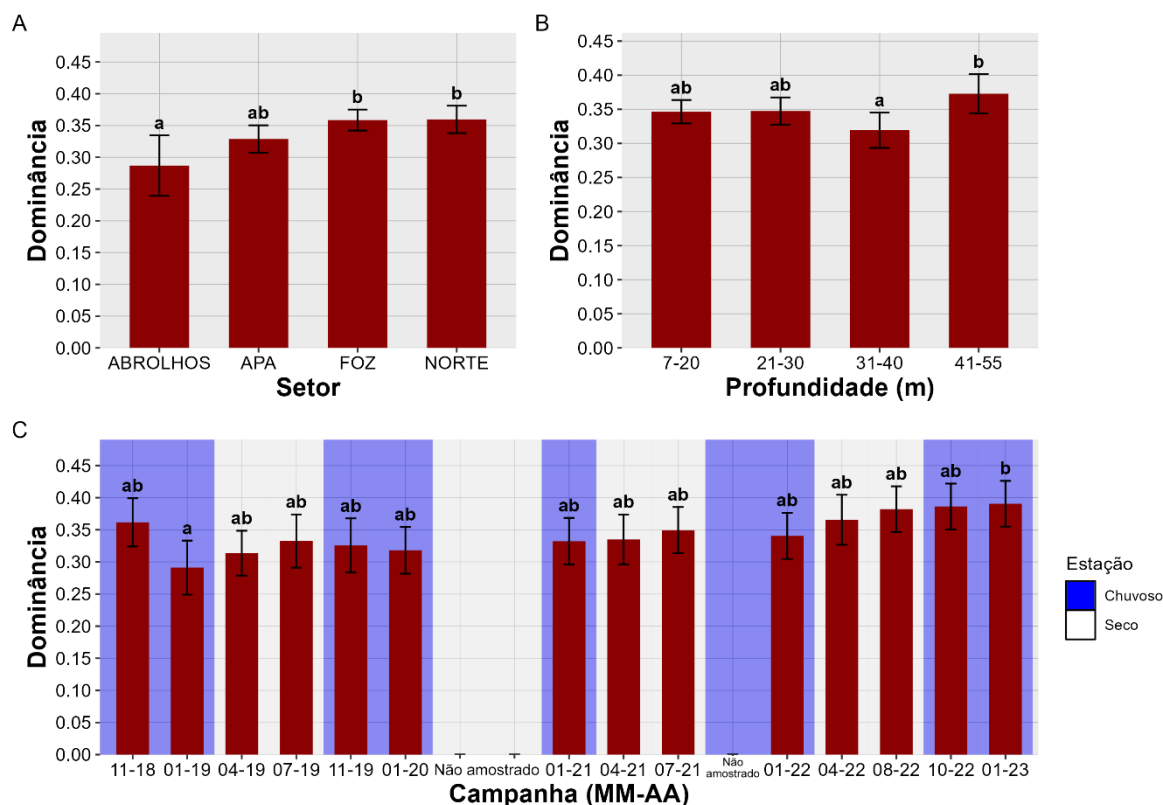
A pouca variação da riqueza e os episódios de aumento na abundância (densidade) (tratado anteriormente) refletiram nos valores de diversidade de Shannon-Wiener para a macrofauna, que apresentaram diferenças significativas apenas entre o setor Foz (menor valor de diversidade) e Abrolhos (maior valor de diversidade) e entre as profundidades de 31-40 m (maior valor de diversidade) e 41-55m (menor valor de diversidade). Ao longo do monitoramento foram registrados menor valor de diversidade na campanha 01-23 e maior valor na campanha 01-19, com diferenças significativas entre elas.

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.



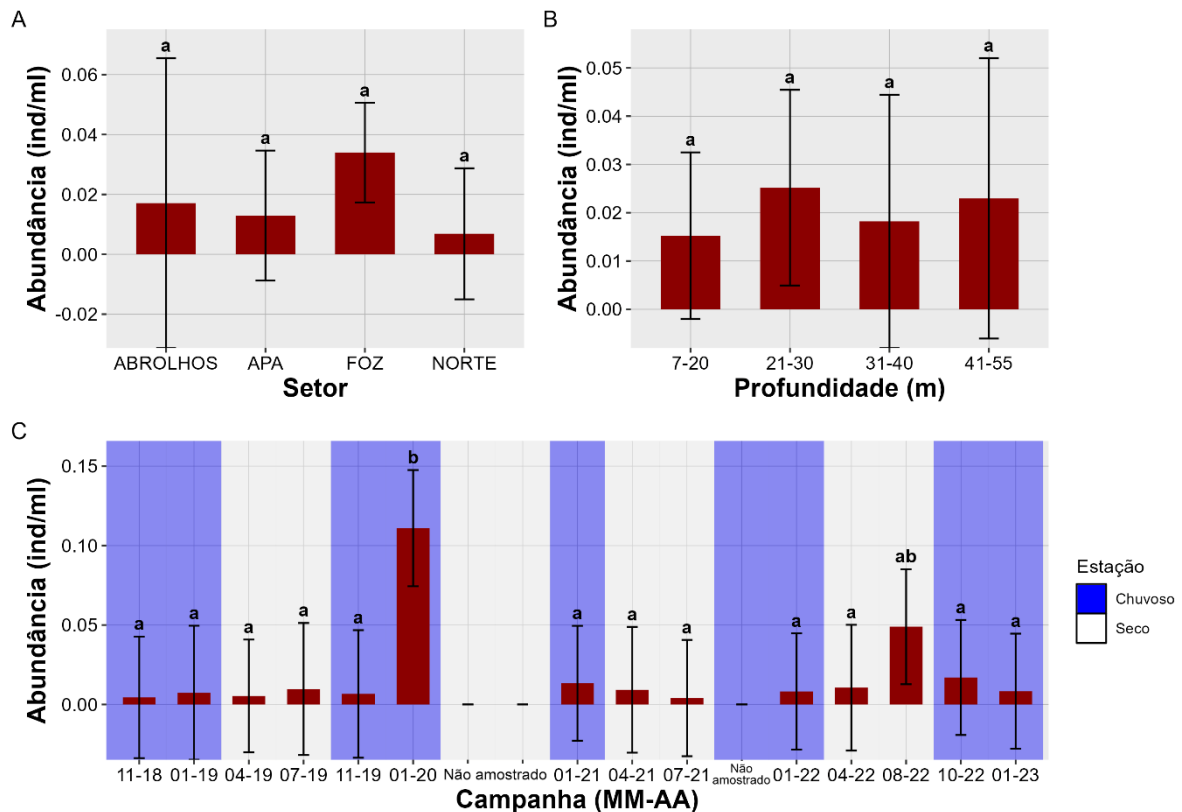
O menor valor do índice de equitabilidade de Pielou foi observado no setor Norte que diferiu significativamente dos setores APA e Foz. Entre as profundidades há uma tendência de diminuição dos valores, com as categorias mais rasa (07-20 m) e mais profundas (41-55 m) apresentando, respectivamente, maiores e menores valores de equitabilidade, diferindo significativamente entre elas e das demais categorias. Para as campanhas, os valores mostraram pouca variação, com destaque para as campanhas 04-22 e 01-23, que apresentaram os menores valores e diferiram significativamente apenas da campanha 01-20.

Figura 7: Índice de dominância de Simpson 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.



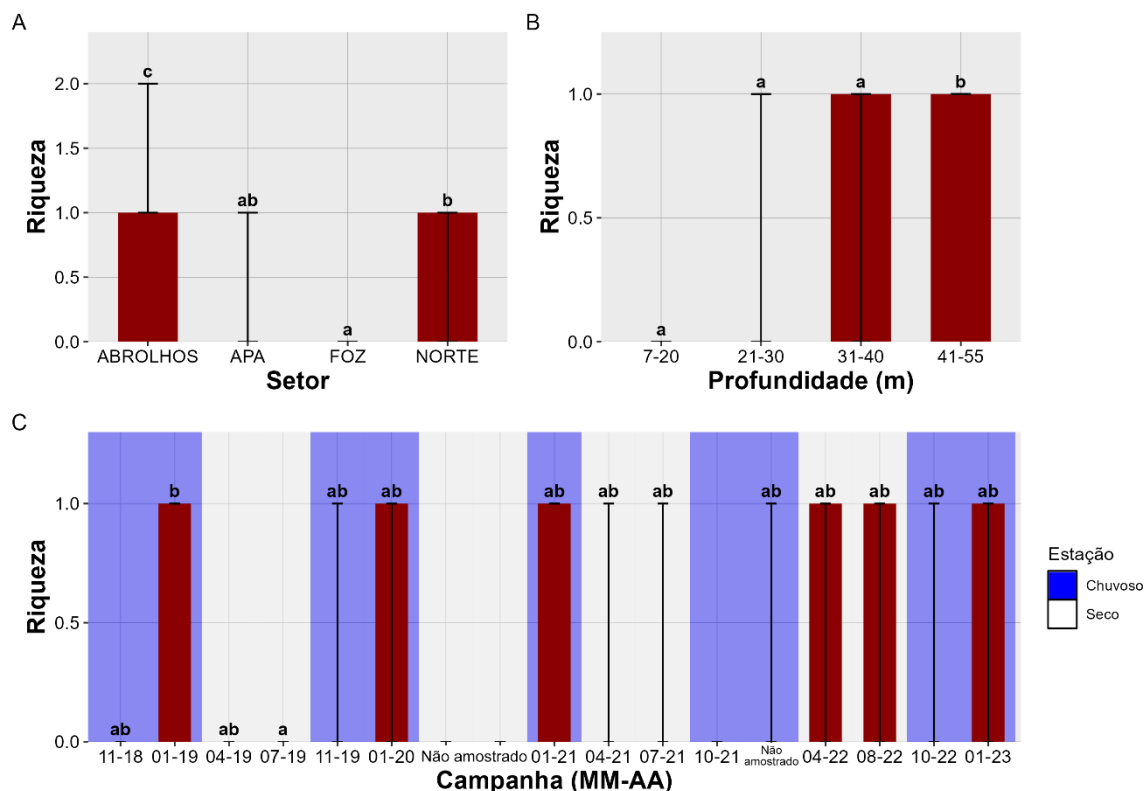
O setor Foz e Norte apresentaram os maiores valores do índice de dominância da comunidade macrobentônica, sendo significativamente diferente do setor Abrolhos. Entre as profundidades foi registrado o menor valor de dominância na categoria de 31-40m que diferiu significativamente da categoria 41-55m onde foi apontado o maior valor. Para as campanhas, os valores de dominância mostraram pouca variação, com destaque apenas para a campanha 01-23 que apresentou valor significativamente superior à campanha 01-19.

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.



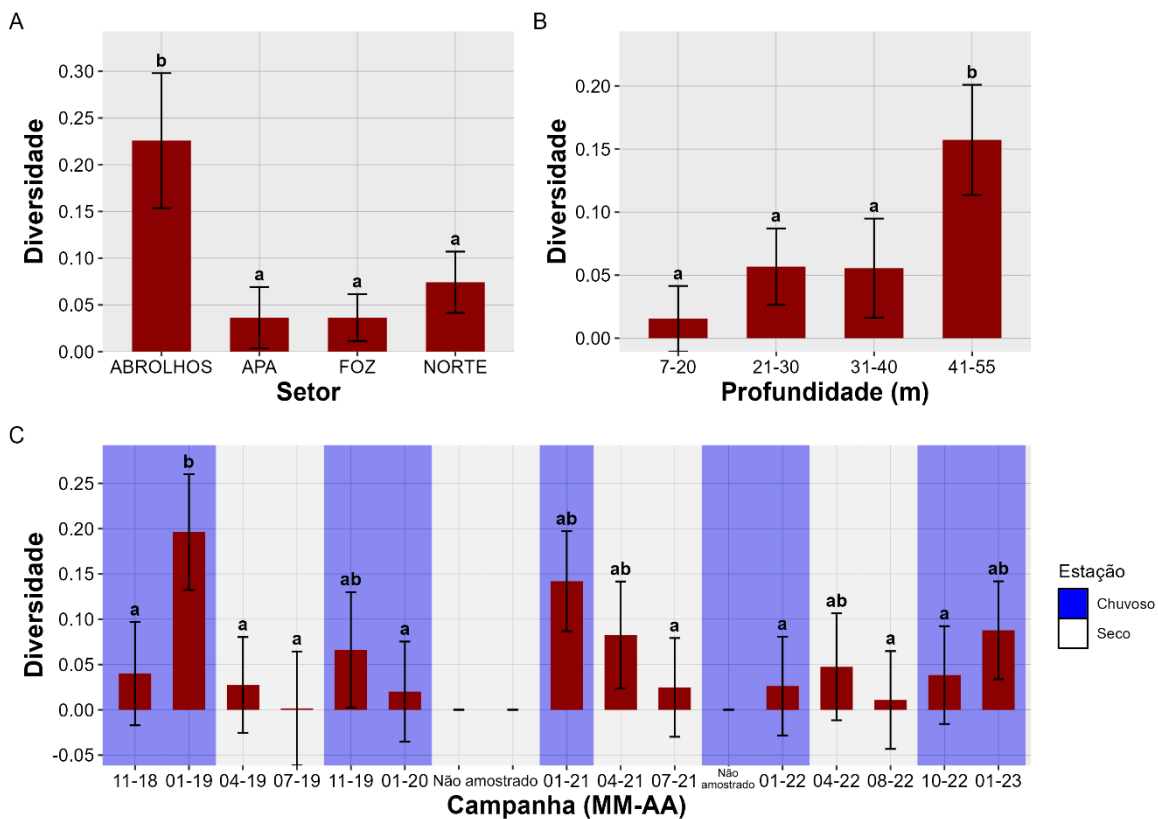
Os maiores valores de abundância (densidade) de Mollusca com partes moles foram observados para os setores Abrolhos e Foz, e os menores valores foram registrados no setor Norte, entretanto, não foram encontradas diferenças significativas entre os setores. Entre as categorias de profundidade, não foi observada diferença estatística entre elas, mas, apesar disso, é observado uma tendência no aumento da abundância (densidade) de Mollusca com partes moles, com as maiores profundidades (41-55 m). 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 rodólitos, conhecidos por fornecerem maior número de microhabitats para organismos bentônicos. Entre as campanhas, os maiores valores de abundância foram registrados na campanha de 01-20 (período seco) seguido da campanha de 08-22 (período chuvoso).

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.



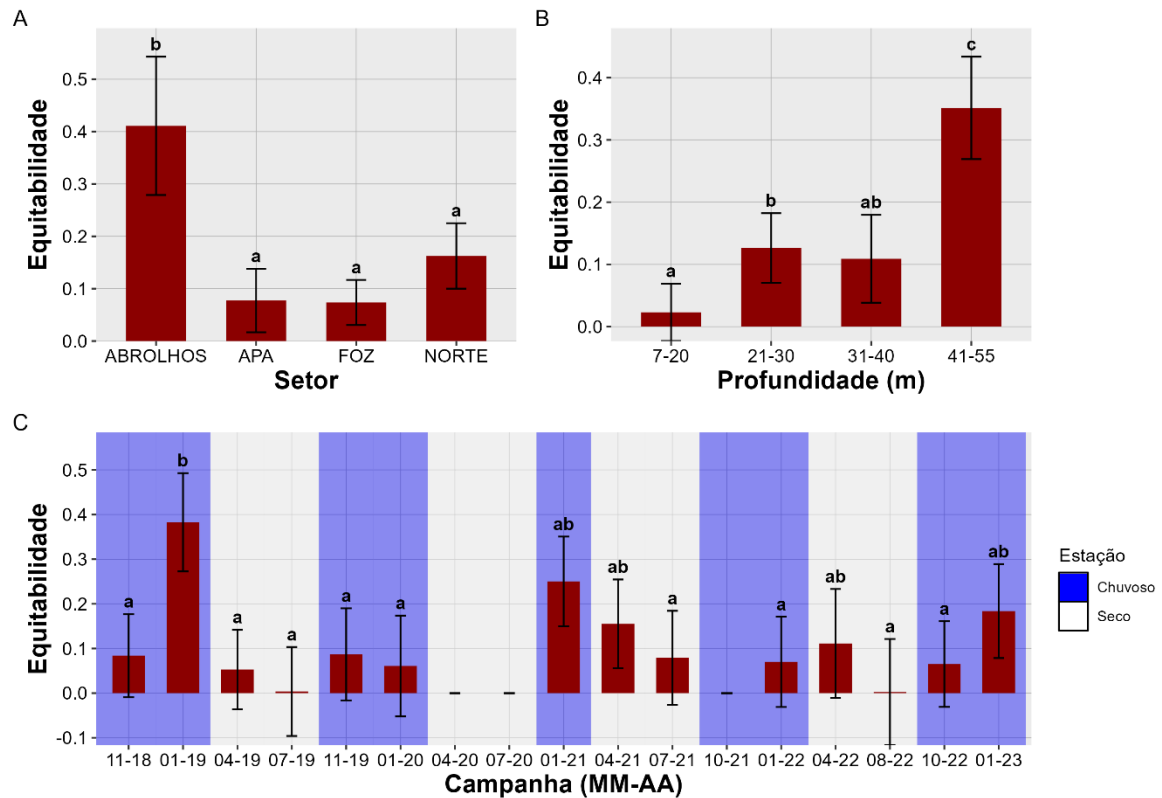
Para a riqueza de Mollusca com partes moles os maiores valores foram observados no setor de Abrolhos, significativamente diferente dos demais setores. Os menores valores de riqueza foram observados para o setor Foz e APA. Entre as profundidades, os maiores valores foram observados para as unidades amostrais mais profundas (41-55 m), com uma tendência de aumento nos valores conforme aumenta a profundidade. Entre as campanhas, não foram observadas variações significativas, sendo os maiores valores registrados no período chuvoso do Ano 1 (01-19).

Figura 10: Índice de diversidade de Shannon-Wiener 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.



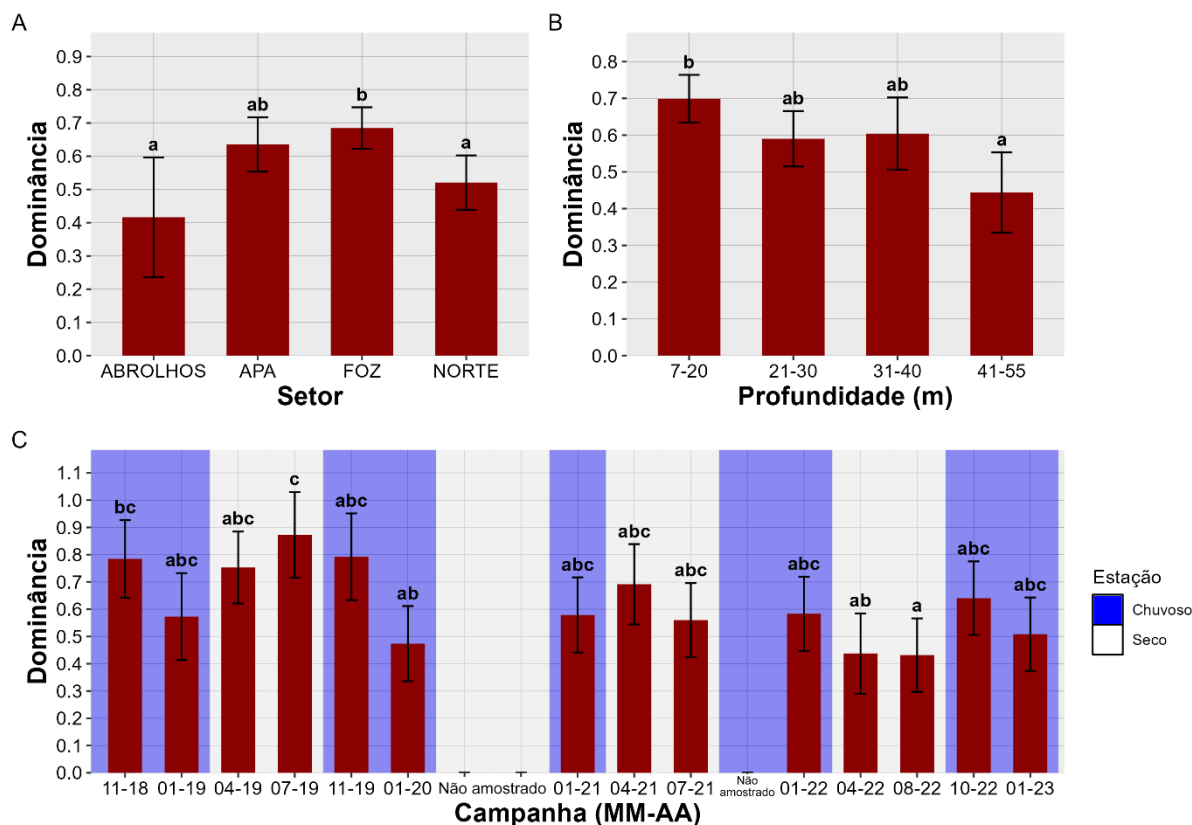
Quanto ao índice de diversidade para Mollusca com partes moles, Abrolhos foi o setor que apresentou os maiores valores, significativamente maior que os demais setores. Não houve diferenças significantes entre a APA, Foz e Norte. Entre as profundidades, os maiores valores de diversidade foram observados para 41-55 m, diferindo estatisticamente das demais, que apresentaram os menores valores. Entre as campanhas, os maiores valores de diversidade foram registrados nos períodos chuvosos, especialmente na campanha de 01-19 que apresentou os maiores valores para esse índice.

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.



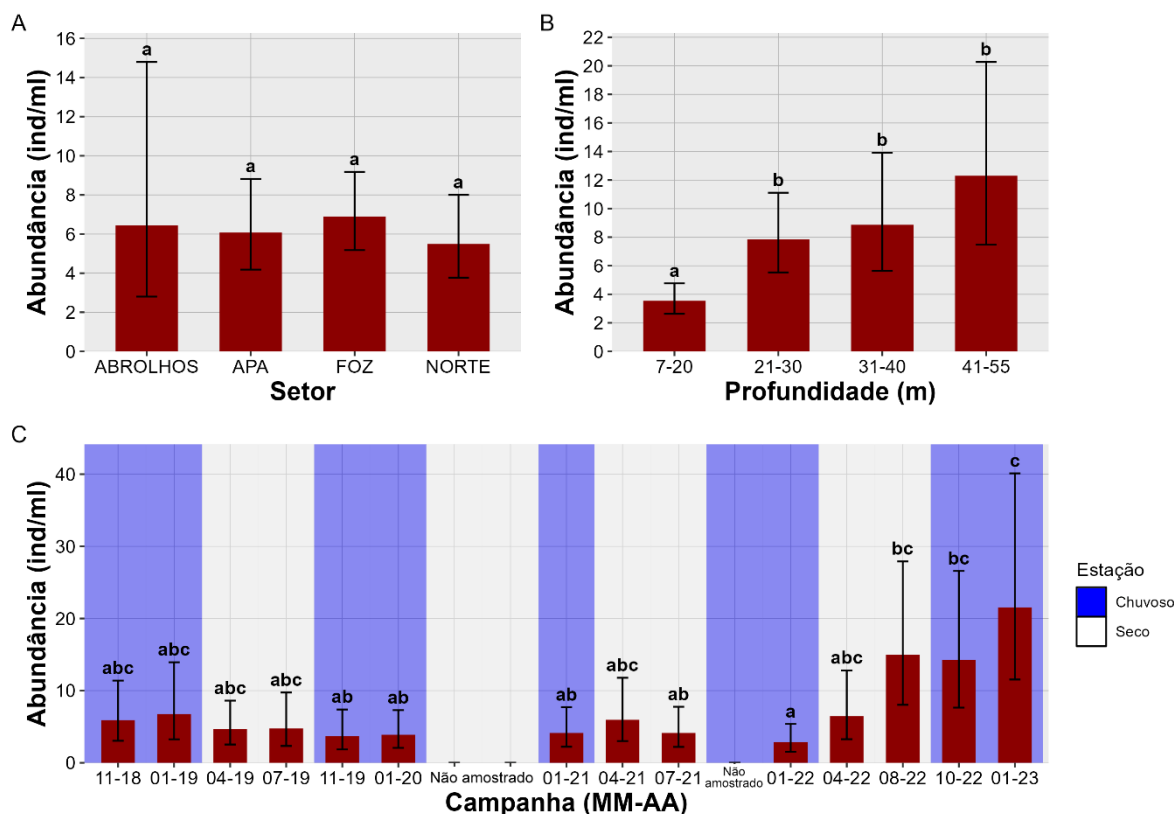
Abrolhos foi o setor que apresentou os maiores valores de equitabilidade, significativamente maior que os demais setores. Não houve diferenças significativas entre a APA, Foz e Norte. Entre as profundidades, os menores valores de equitabilidade foram assinalados para as unidades amostrais mais rasas (7-20 m), com tendência de aumento da equitabilidade com o aumento da profundidade, com as unidades de maior profundidade (41-55 m) apresentando os maiores valores para esse índice. Para as campanhas, não houve variações significativas entre as campanhas, exceto para a campanha de 01-19 que apresentou os maiores valores de equitabilidade e diferiu estatisticamente da maioria das demais campanhas.

Figura 12: Índice de dominância 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.



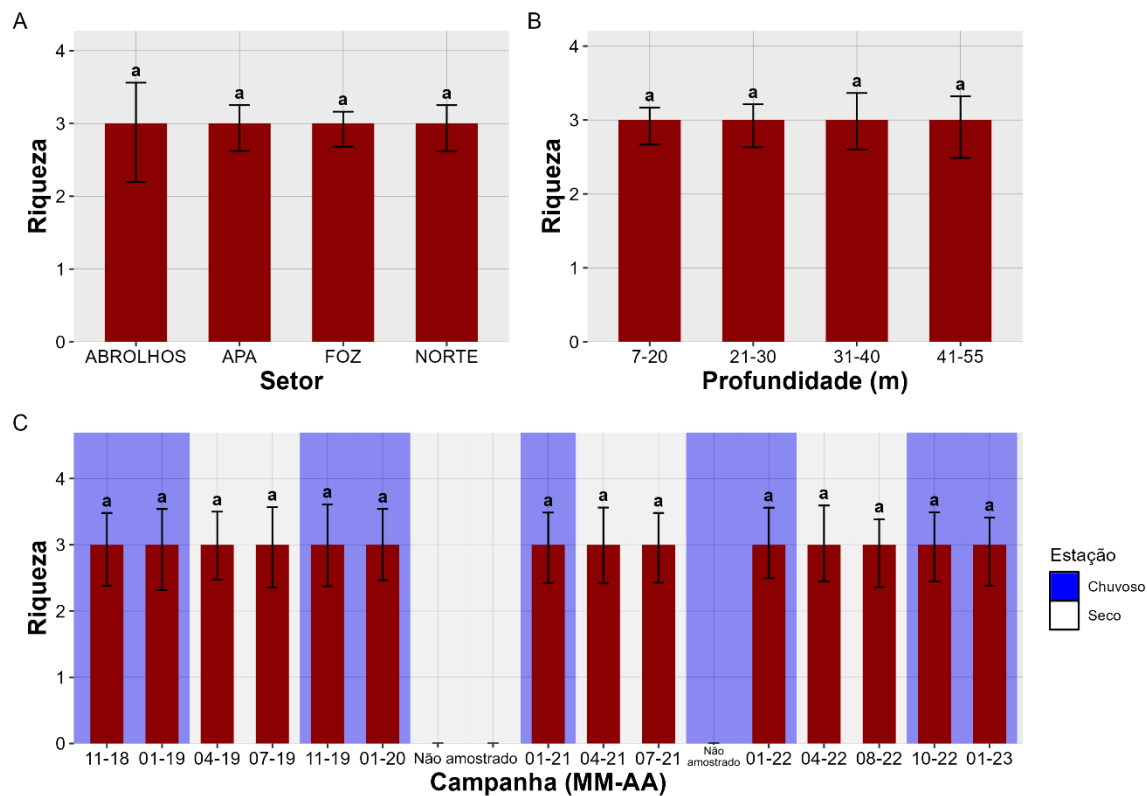
Quanto ao índice de dominância de Simpson para a comunidade de Mollusca com partes moles, o setor Abrolhos mostrou valores inferiores ao de todos os outros setores, mas não diferiu estatisticamente da APA e Norte. O setor Foz apresentou os maiores valores de dominância, significativamente superior ao setor Norte e Abrolhos. De forma contrária aos resultados de equitabilidade, observou-se uma tendência na diminuição dos valores de dominância com o aumento da profundidade, sendo os maiores valores desse índice encontrados nas estações amostrais mais rasas (7-20 m) e os menores, nas mais profundas (41-55 m). Entre as campanhas, não houve grandes variações ao longo do tempo, porém as campanhas de 08-22 e 04-22 se destacaram por apresentarem os menores valores de dominância.

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.



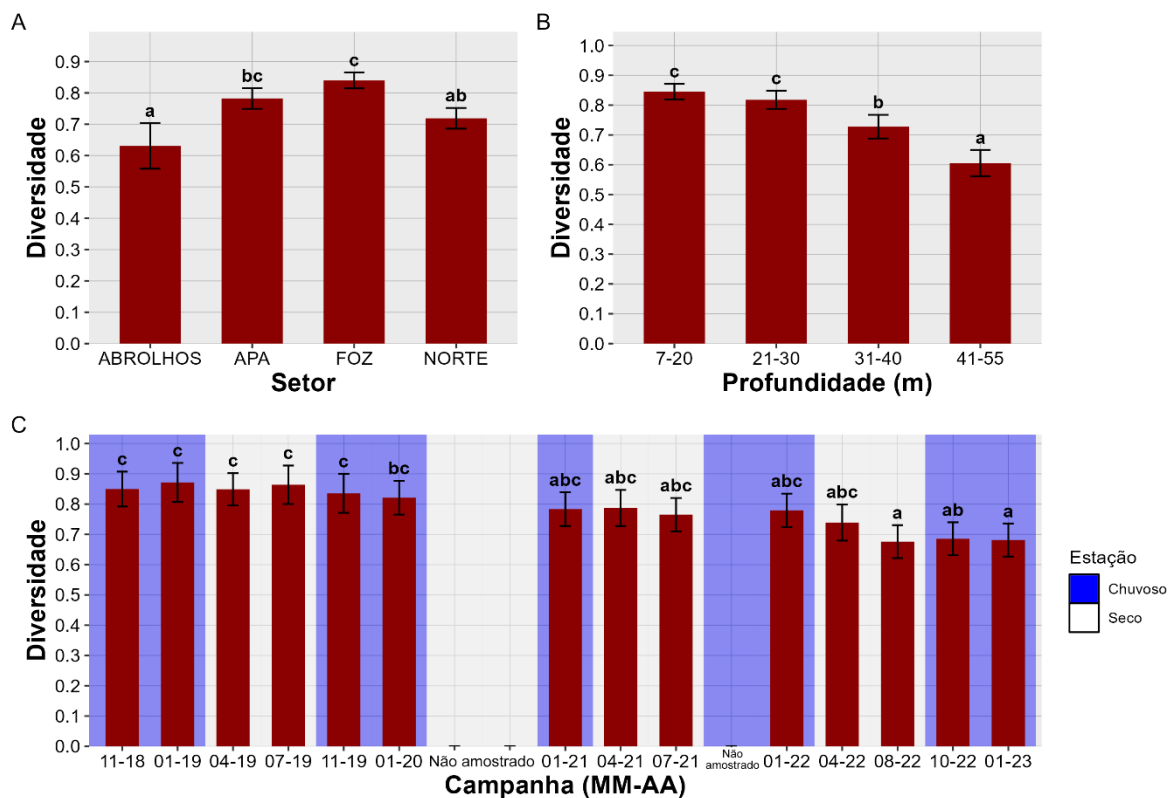
Os setores não apresentaram efeito significativo na abundância (densidade) de vestígios de Mollusca. Entre as profundidades, esse índice foi significativamente mais baixo para as amostras mais rasas (entre 7-20 m), com tendência de aumento no registro de vestígios com o aumento da profundidade. Entre as campanhas, não foram observadas variações significativas ao longo do tempo até a campanha de 08-22, a partir da qual passou a ser registrado um aumento significativo no número de vestígios. Os maiores valores médios foram registrados para a campanha do período chuvoso de 01-23. A campanha de 08-22 e a campanha de 01-23 ocorreram após intenso período de chuvas, com consequente aumento da vazão do Rio Doce e aumento no aporte de rejeito para a plataforma, o que, possivelmente, pode estar relacionado com o aumento observado 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.



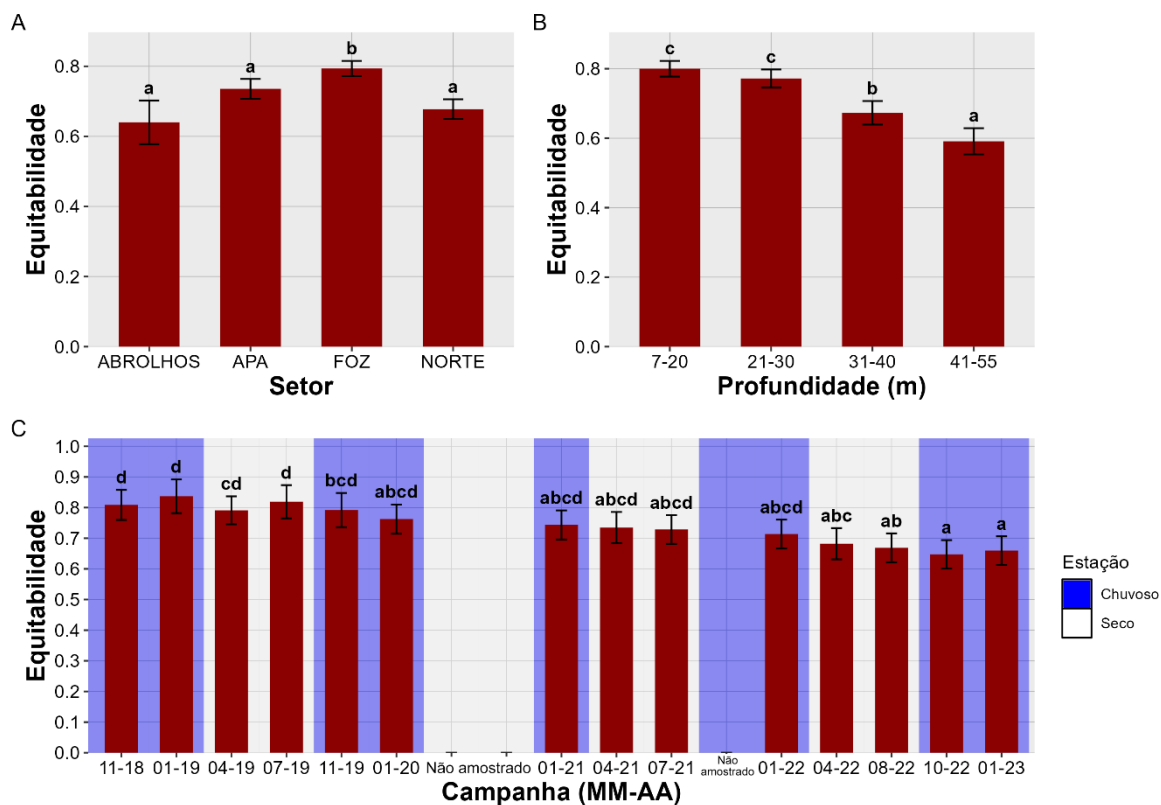
Para a riqueza dos vestígios de Mollusca, os valores foram constantes ao longo do monitoramento, sem efeito significativo entre os setores, profundidades e campanhas.

Figura 15: Índice de diversidade de Shannon-Wiener 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.



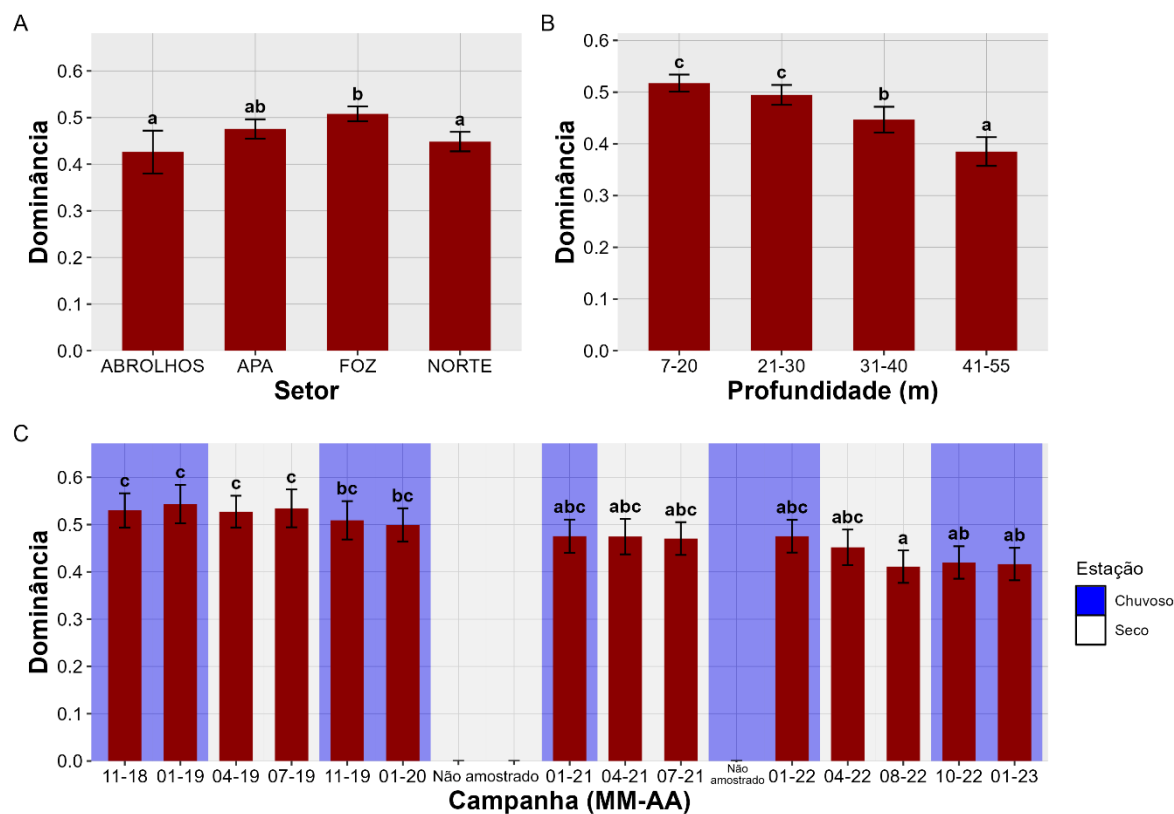
Os valores de diversidade para os vestígios de Mollusca refletiram o cenário identificado para densidade e riqueza, evidenciando as unidades amostrais com maior morte de organismos. Entre os setores, a Foz e APA apresentaram os maiores valores, enquanto Abrolhos apresentou significativamente os menores valores. Esse índice reflete uma intensa mortandade de organismos nos setores Foz e APA, do que o observado em Abrolhos. Entre as profundidades, os maiores valores de diversidade foram registrados para as profundidades mais rasas (7-20 m e 21-30 m), significativamente diferentes das unidades de 31-40 m e 41-55 m. Há uma tendência a diminuição dos valores de diversidade com o aumento da profundidade. Para as campanhas, não houve variações significativas ao longo do tempo até a campanha de 08-22, onde os valores de diversidade dos vestígios apresentaram diminuição significativa em relação às campanhas do primeiro e segundo ano de monitoramento.

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.



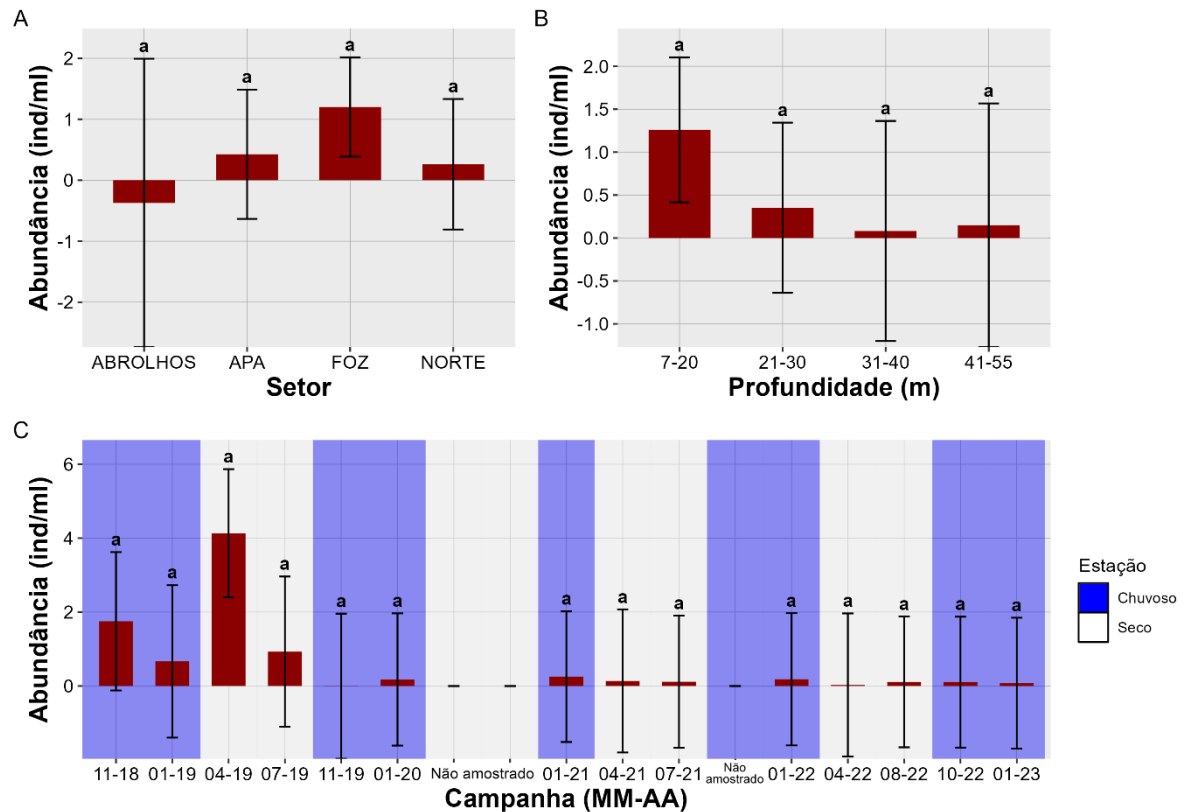
Quanto ao índice de equitabilidade de Pielou para vestígios de Mollusca, repetiu-se o mesmo padrão observado para o índice de diversidade, com maior valor do índice para vestígios observada no setor Foz, tendência a diminuição da equitabilidade com o aumento da profundidade e diminuição dos valores observados a partir da campanha de 08-22.

Figura 17: Índice de dominância de Simpson 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.



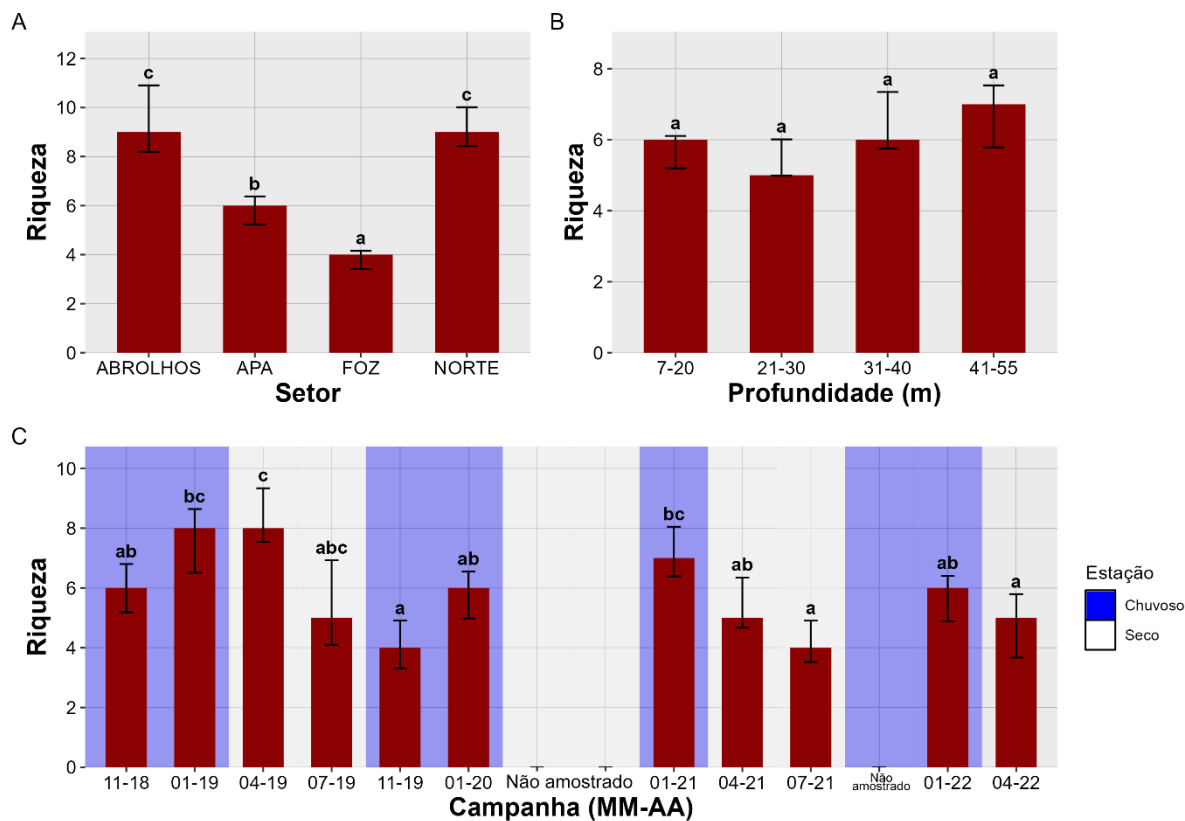
A dominância para vestígios de moluscos mostrou padrões bastante semelhantes aos de equitabilidade. O setor Foz apresentou valores significativamente superiores aos dos outros, exceto pelo resultado setor APA. Para as profundidades, as mais rasas (07-20m e 21-30m) apresentaram valores significativamente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

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.



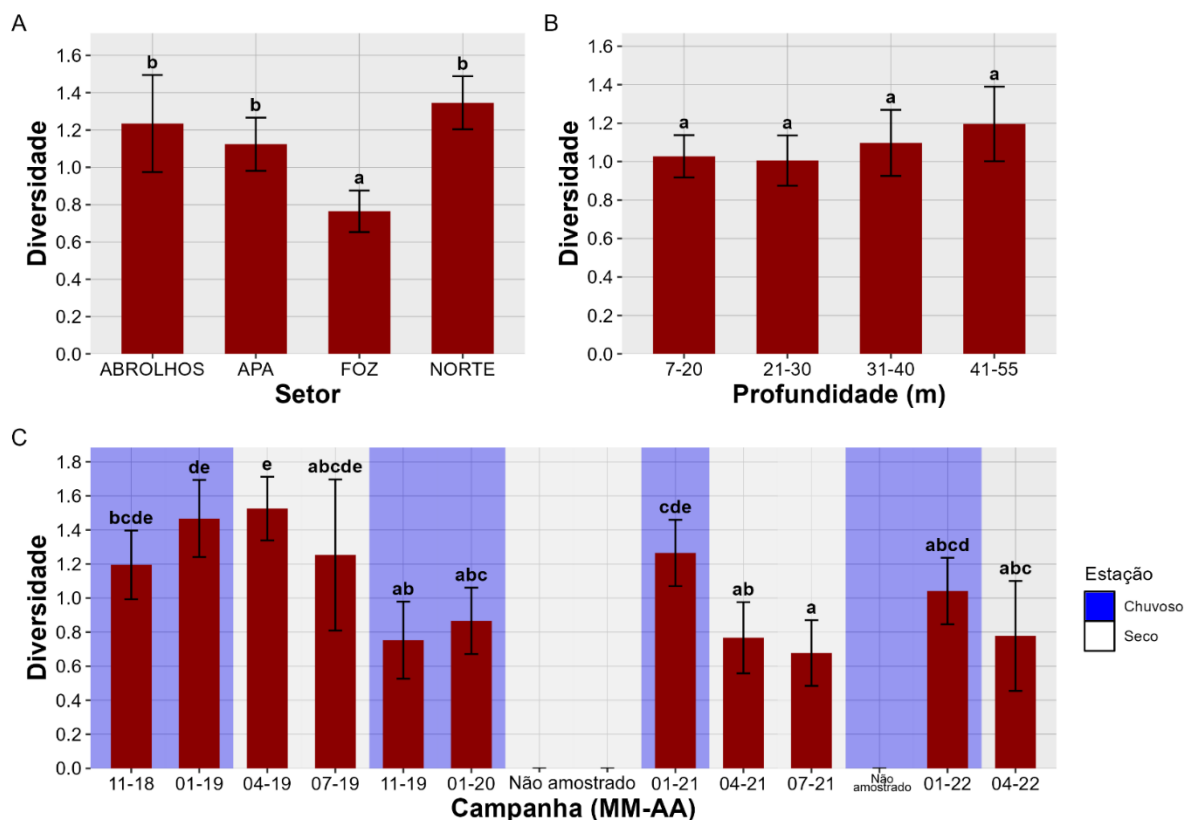
Embora as maiores abundâncias (densidade) de Polychaeta tenham sido registradas no setor Foz, não houve variação significativa entre os setores. Entre as profundidades, as estações amostrais mais rasas (07-20 m) foram as que concentraram os maiores valores de abundância enquanto que as de profundidade entre 31-40 m foram as que registraram os menores valores de abundância, entretanto, não foi observado diferença estatística entre as categorias de profundidades. Entre as campanhas, os maiores valores de abundância (densidade) de Polychaeta foram registrados na campanha de 04-19. A partir da campanha de 07-19, houve flutuações na abundância de Polychaeta mas sem formar um padrão consistente temporalmente e com valores mais baixos do que os observados no início do monitoramento.

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.



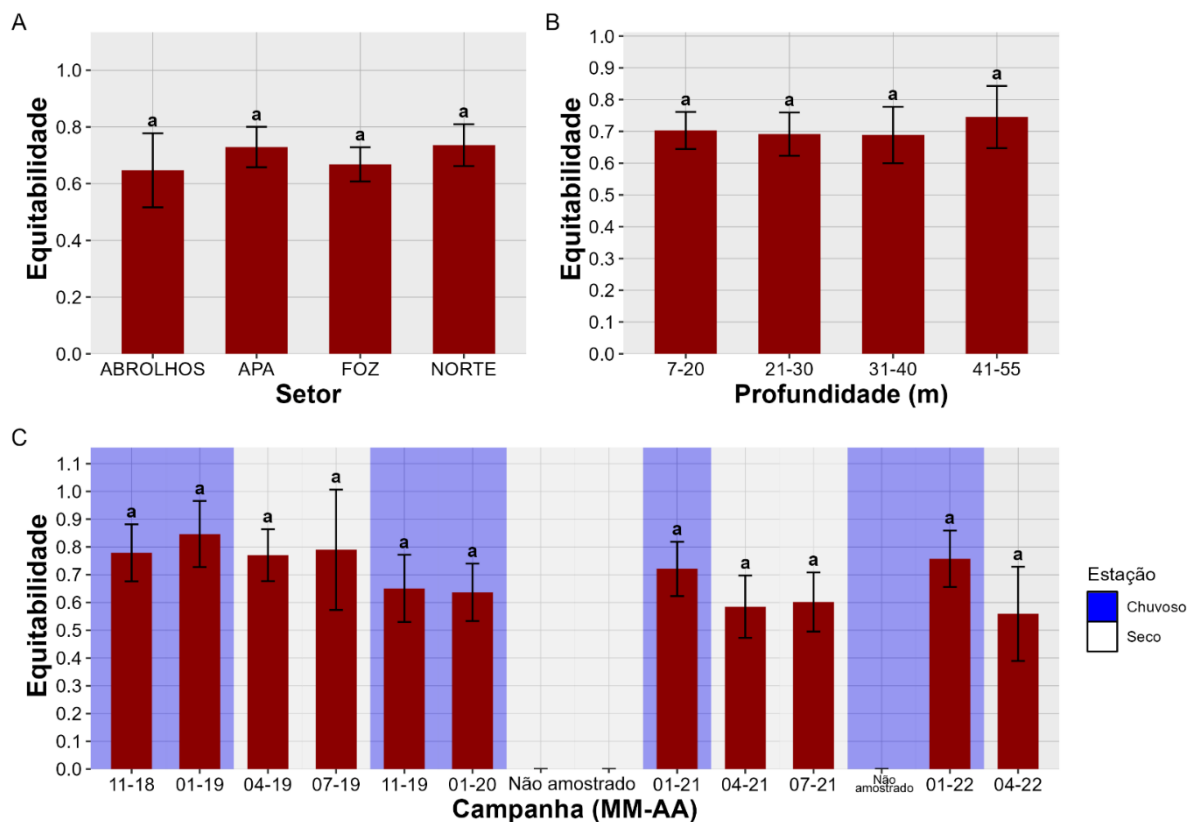
O setor Foz apresentou o menor valor de riqueza de Polychaeta, com diferença significativa entre os demais setores, seguida pela APA, também significativamente diferente dos setores Norte e Abrolhos. Para as profundidades, as amostras não apresentaram diferenças significativas. Entre as campanhas, observou-se 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-Wiener 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.



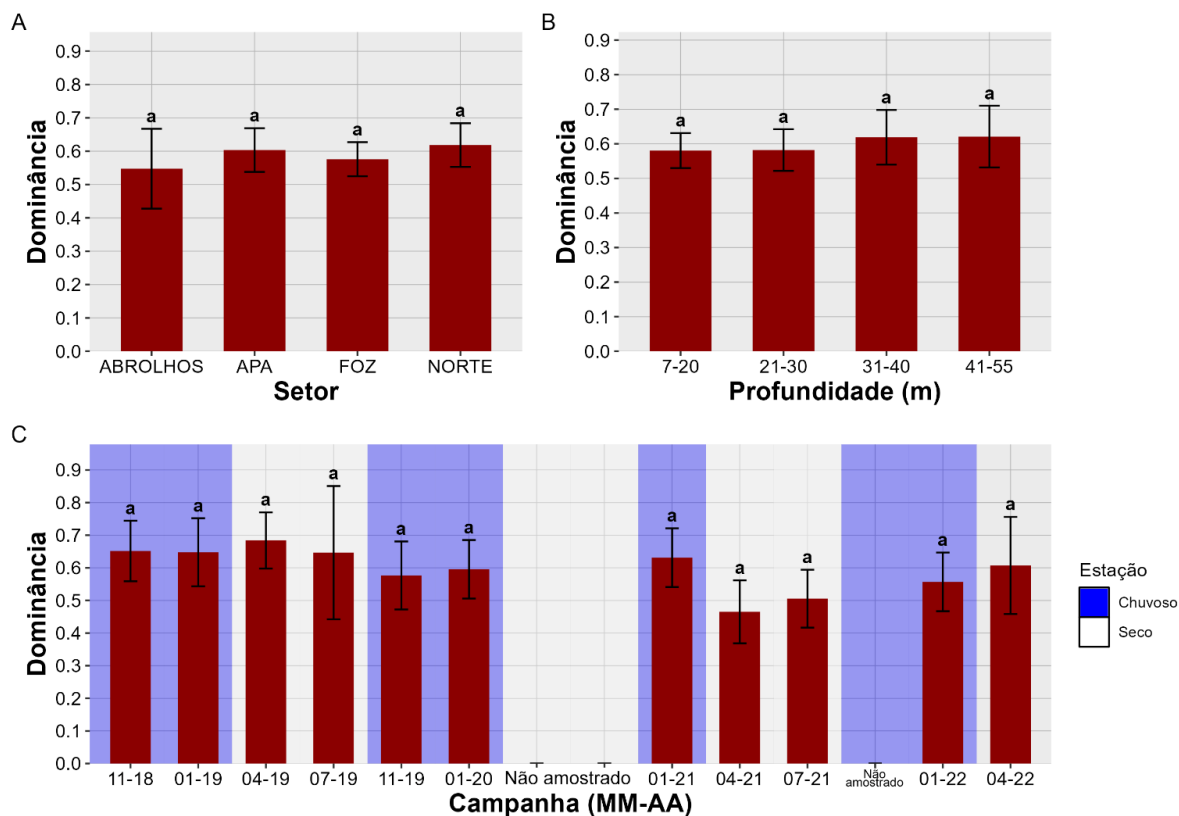
Para o índice de diversidade de Shannon-Wiener da comunidade de Polychaeta, a Foz apresentou os menores valores, com diferença significativa entre os demais setores. Entre as profundidades, observou-se a tendência a um aumento discreto da diversidade nas profundidades de 31-40 m e 41-55 m, entretanto sem diferenças significativas entre as categorias. Para as campanhas, a diversidade teve um padrão mais claro do que o observado para a riqueza (descrito anteriormente), com valores mais altos no período chuvoso do que no período seco, exceto na campanha 04-19 (período seco), que apresentou o maior valor de diversidade e a campanha 07-21 o menor.

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.



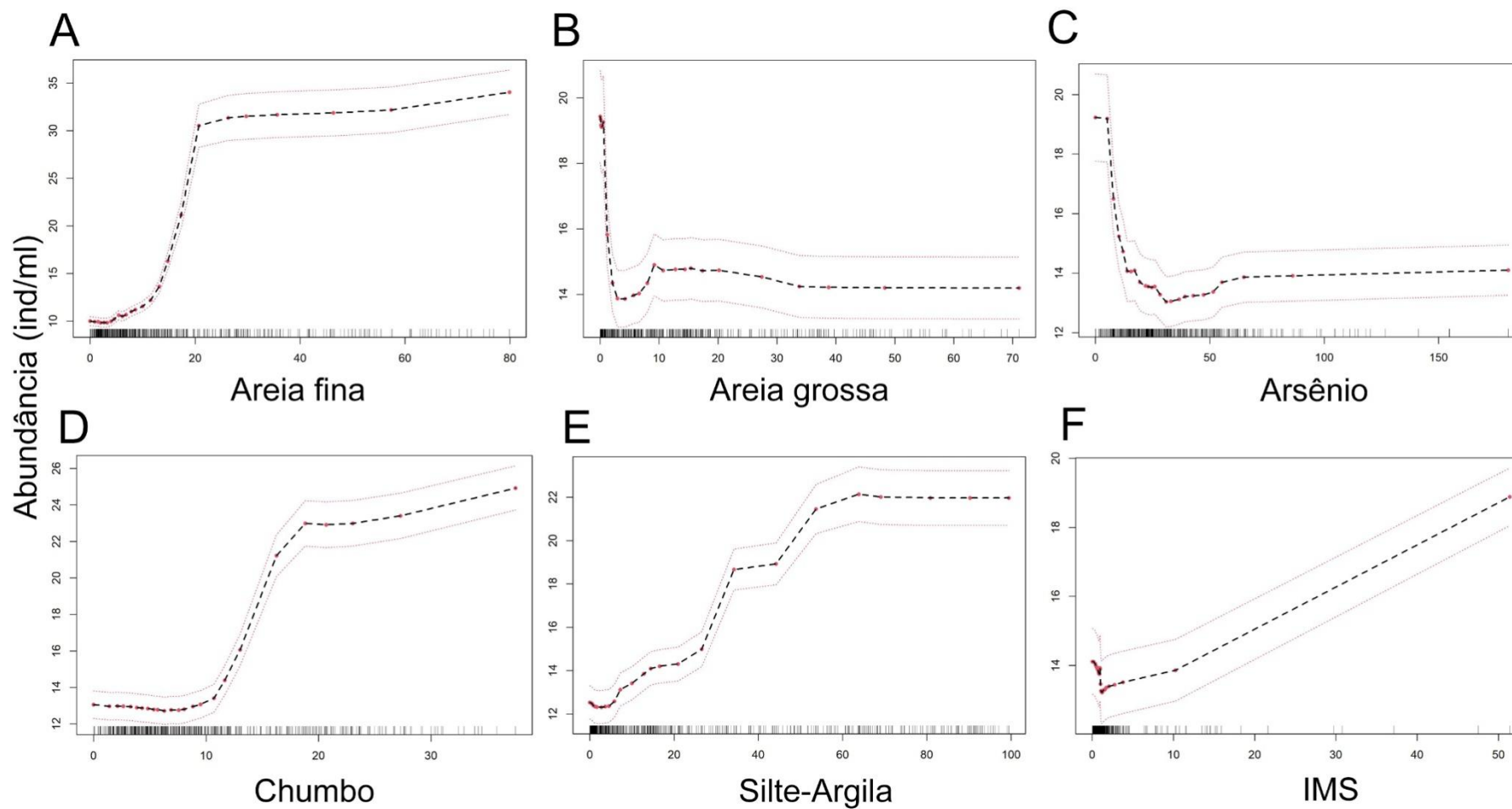
Os resultados não mostraram diferenças significativas para índice de equitabilidade de Pielou da comunidade de Polychaeta entre nenhuma das categorias de Setores, Profundidade ou Campanhas.

Figura 22: Índice de dominância de Simpson 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.



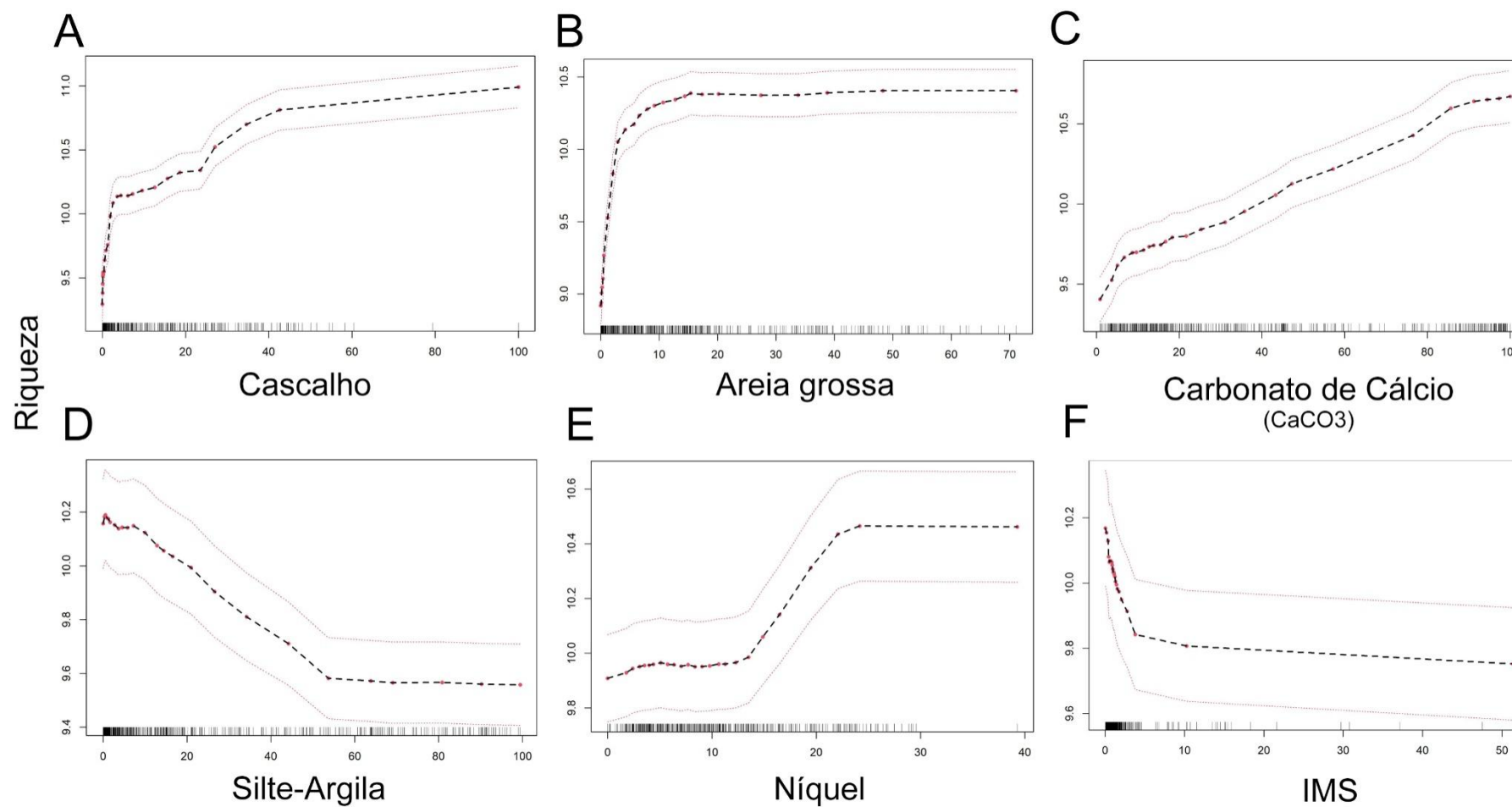
Os resultados não mostraram diferenças significativas para o índice de dominância de Simpson da comunidade de Polychaeta entre nenhuma das categorias de Setores, Profundidade e Campanhas.

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.



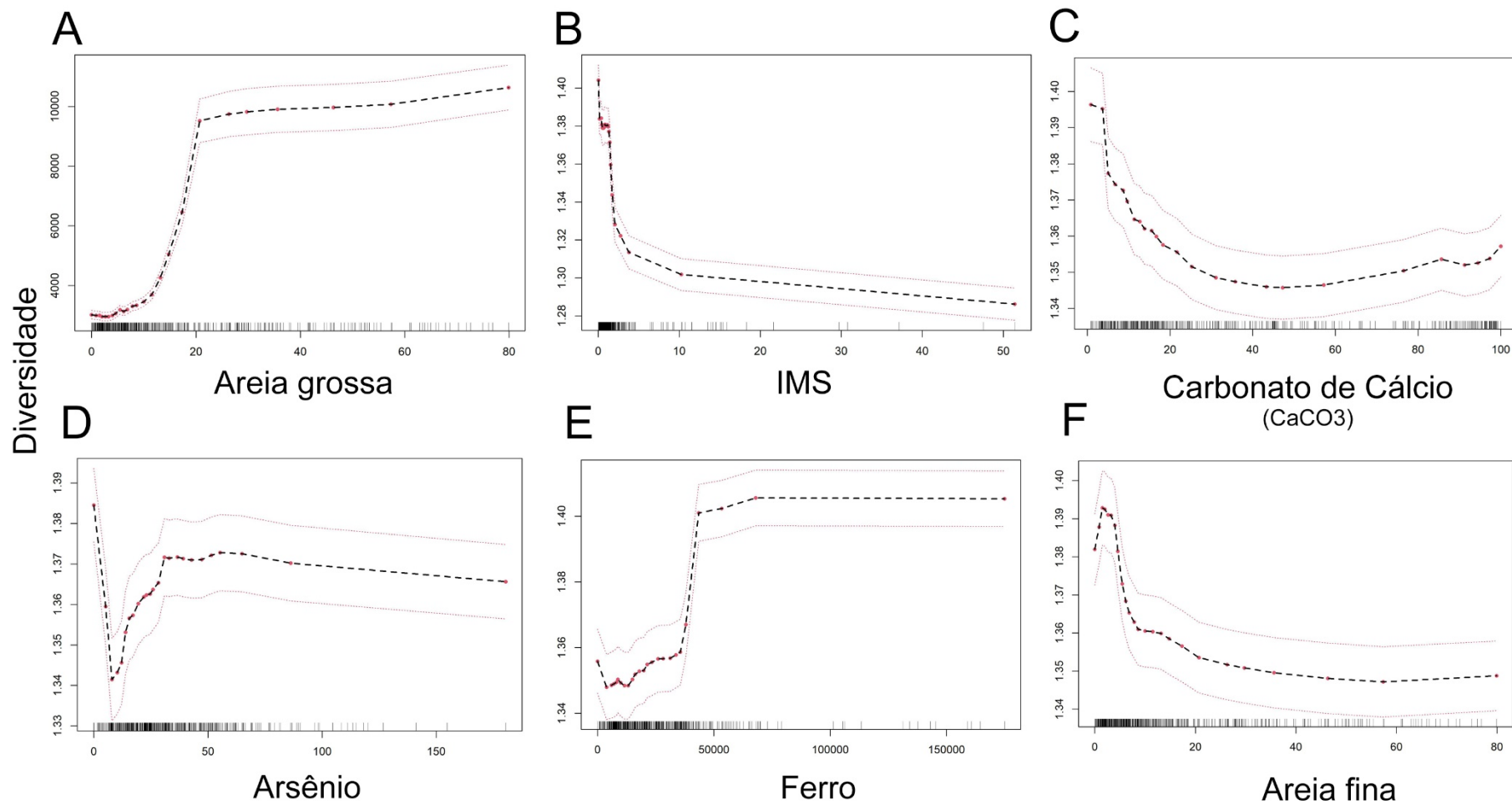
Entre as variáveis ambientais analisadas, os diferentes tipos de sedimento, como cascalho (relacionado aos maiores teores de carbonato de cálcio), areias grossas e areia mais fina foram as que mais influenciaram (positivamente correlacionados) na variação dos indicadores. Embora estes tipos de substrato 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, ressaltando o aumento na mortandade de organismos, discutido anteriormente como o aumento agudo na densidade de vestígios.

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.



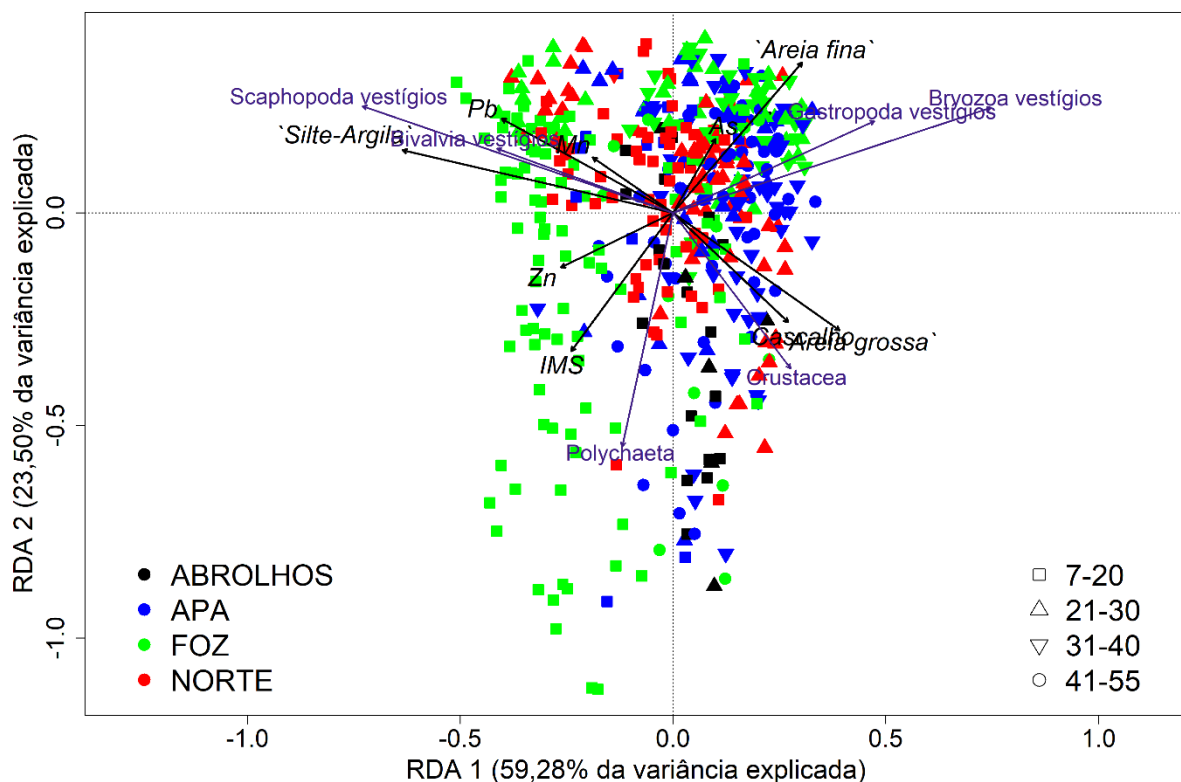
O cascalho, areia grossa e carbonato de cálcio refletiram uma correlação positiva com a riqueza, sendo as variáveis ambientais com maior importância para explicar sua variação. O Índice Mineralógico do Ferro - IMS mostrou uma correlação negativa com a riqueza, embora menos intensa quando comparado com 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-Wiener 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.



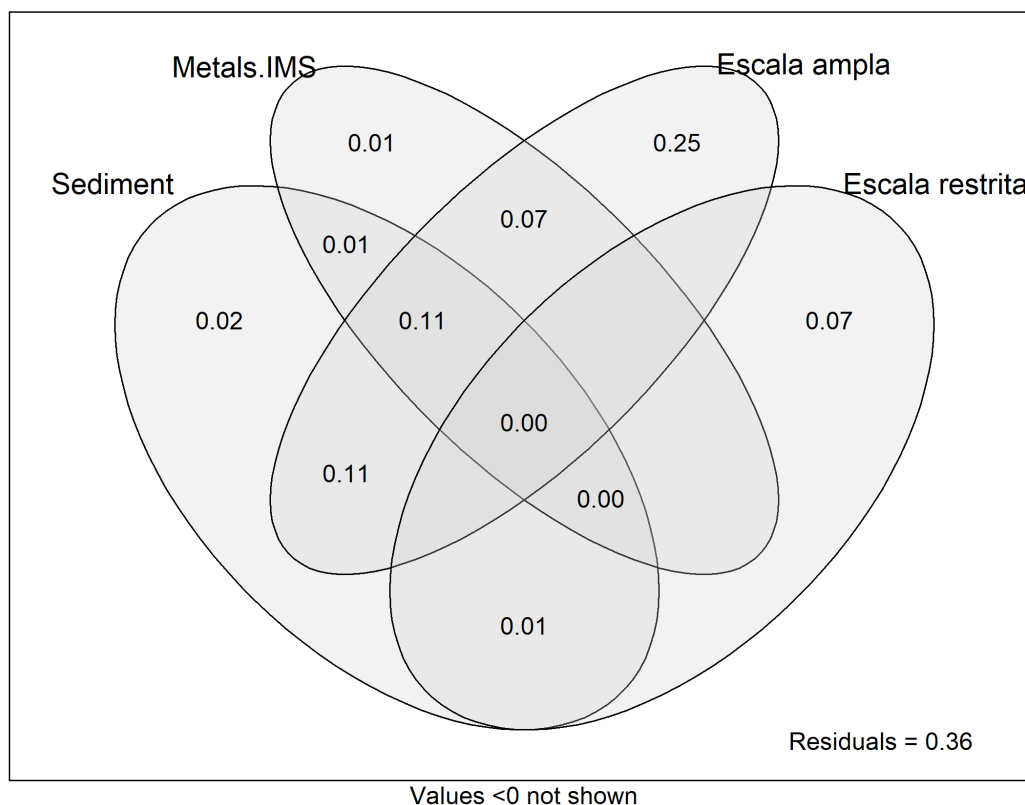
Para o índice de diversidade, o Índice Mineralógico do Ferro - IMS mostrou uma correlação negativa com a diversidade, sendo uma das variáveis com maior poder explicativo sobre a variação desse índice. Esses resultados mostram que a diversidade dos organismos, especialmente os táxons mais raros, diminuem drasticamente nas amostras com presença do rejeito, apontada pelo IMS. Esse resultado reforça a contribuição dos efeitos da presença de lama na estruturação das comunidades, fato que tem sido demonstrado ao longo de todo o monitoramento. Das variáveis mais importantes, três são consideradas ambientais: Carbonato de Cálcio (CaCO_3), percentual de areia grossa e percentual de areia fina, evidenciando diferentes naturezas de efeito. Os substratos com maior granulometria 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, 4 e 5 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 cinco 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 IMS 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 identificado 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 Zinco, sobre a estrutura das comunidades bentônicas nas 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 *Polychaeta*, 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, 2% é explicada pela matriz ambiental (sedimento), e 1% explicada pela matriz Metals-IMS. A maior contribuição para a explicação é dada pela matriz espacial em larga escala com 25%, 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 7% de explicação, além de mais 11% 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 a presença do rejeito proveniente do rompimento da barragem de Fundão e a estrutura da macrofauna bentônica marinha.

3 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.