

Universidade Estadual de Santa Cruz
Programa de pós-graduação em Ecologia e Conservação da
Biodiversidade
Tese de Doutorado

Inaiara Sousa Siqueira da Silva

**Como as estruturas que compõem a paisagem marinha
contribuem para a conservação dos peixes?**



2023

Universidade Estadual de Santa Cruz
Programa de pós-graduação em Ecologia e Conservação da
Biodiversidade

Inaiara Sousa Siqueira da Silva

Orientador: Dr. Carlos Werner Hackradt

Co-orientador: Dr. Alexandre Schiavetti

Co-orientador: Dr. Simon Pittman

Como as estruturas que compõem a paisagem marinha de
Abrolhos contribuem para a conservação dos peixes?



Tese de doutorado apresentada para a Universidade Estadual de Santa Cruz, como etapa final para conclusão e obtenção de título de Doutor em Ecologia e Conservação da biodiversidade.

Nesta tese, exploramos o papel fundamental da paisagem marinha na conservação da biodiversidade de peixes, oferecendo uma visão espacial da importância dos habitats marinhos adjacentes na resiliência e saúde dos ecossistemas.

2023

**Como as estruturas que compõem a paisagem marinha de
Abrolhos contribuem para a conservação dos peixes?**

Ilhéus, 31 de julho de 2023

**Cesar Cordeiro
UENF**

**Cleverson Zapelini dos Santos
UESC**

**João Lucas Feitosa
UFPE**

**Thiago Costa Mendes
UFF**

**Dr. Carlos Werner Hackradt
(Orientador)**

Eu dedico essa tese de doutorado e todo meu tempo na área acadêmica ao meu pai, em memória Carlos Antônio da Silva, que foi meu maior incentivador para conquistar os meus sonhos, que sempre acreditou no meu potencial e nunca poupou esforços para me proporcionar as melhores oportunidades.

Agradecimentos

Sou grata a Deus por toda por me guiar através da minha conexão espiritual e me ajudar a ter sabedoria e força de vontade para a manifestação dos meus sonhos.

Agradeço a minha mãe, Zulnice Sousa Siqueira Santos, que sempre esteve ao meu lado me encorajando, facilitando todo esse processo com os seus cuidados e amor.

Minha irmã, Patrícia Sousa que me apoia em todas as etapas da minha vida. À toda minha família que torce pelo meu sucesso, pois representa o sucesso dela também.

Aos anjos que trouxeram leveza para a minha vida, em especial a Marina, Leonardo, Ícaro. E também Thaise, Gledson, Bel, Layse e Vanessa que me trazem paz e me incentivam a ser sempre melhor. E a tantas outras amizades que contribuíram nessa jornada.

Expresso meus sinceros agradecimentos ao meu orientador Carlos Hackradt, pelas oportunidades de aprendizado na área de ecologia marinha e suporte para me desenvolver como pesquisadora.

Agradeço também ao meu co-orientador Alexandre Schiavetti, pelo apoio durante a trajetória de pós-graduação. Seus conselhos foram de extrema importância para me passar a segurança que precisava.

Agradeço a professora Fabiana Felix-Hackradt pelas portas abertas e por ser uma inspiração feminina na área da pesquisa científica.

Aos meus colegas de pesquisa que me auxiliaram de forma direta ou indireta na jornada acadêmica, em especial ao Pavel, André, Gil Marcelo, Déborah, Letícia Jorinha, Natália e Linda pelas trocas construtivas e a todos os colegas do LECOMAR que auxiliaram durante a coleta de dados.

Agradeço imensamente a Universidade Estadual de Santa Cruz, em especial membros da secretaria e professores do programa de pós-graduação por todos os conhecimentos compartilhados e compreensão na resolução dos desafios enfrentados.

Agradeço também aos membros da banca examinadora, por suas contribuições fundamentais e críticas construtivas que irão enriquecer o desenvolvimento da minha tese e a publicação dos artigos.

Por fim, agradeço às instituições de financiamento e apoio à pesquisa ao projeto Budiões do Instituto Nautilus de Pesquisa e Conservação da Biodiversidade, e à Rede Rio Doce Mar, pela viabilização das coletas de campo.

Gratidão a todos!

Esse epíteto te convida a refletir sobre a complexidade intrincada e a interconexão de todos os seres vivos no planeta. Cada organismo, não importa quão pequeno ou aparentemente insignificante, tem um papel a desempenhar na sustentação da vida na Terra.

Em uma teia, cada fio está conectado, e o movimento de um fio reverbera através de toda a estrutura. Da mesma forma, em nossos ecossistemas, cada espécie está ligada à outra por meio de uma complexa rede de interações. A perda de uma única espécie pode ter consequências em cascata, afetando toda a teia da vida.

Sensibilizar para uma visão holística da Conservação da Biodiversidade é lembrar da importância de olhar para o quadro completo quando se trata de conservação. Concentrar-se em uma única espécie ou ecossistema pode não ser suficiente quando todo o sistema está interligado.

Em vez disso, é preciso uma abordagem da paisagem que considere todos os aspectos da biodiversidade, incluindo a diversidade genética e funcional dentro das espécies e a diversidade dos ecossistemas.

Ao encerrar esse ciclo quero trazer a ideia de que cada vida tem valor e que a saúde de nosso planeta depende da conservação de toda a sua biodiversidade. Convidando a todos que lerem essa tese a repensar nossas ações e considerar como podemos fazer nossa parte para proteger a teia da vida. Cada pequeno esforço pode ter um impacto significativo na preservação do equilíbrio da vida - planeta Terra.

Teia de vidas: uma visão holística da conservação da biodiversidade marinha"

Sumário

| | |
|---|----|
| Introdução | 9 |
| Diversidade de Peixes Marinhos na Costa Brasileira: Uma Análise dos Principais Habitats e Suas Características | 13 |
| Diversidade e Distribuição de Peixes na Paisagem do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos: Implicações para a Conservação | 14 |
| Resumo | 15 |
| 1. Introdução | 16 |
| 2. Materiais e métodos | 18 |
| 3. Resultados | 24 |
| 4. Discussão | 38 |
| 5. Conclusão | 43 |
| 6. Referências | 44 |
| A Importância dos Bancos de Rodolitos para a Biodiversidade de Peixes no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos | 50 |
| Resumo | 51 |
| 1. Introdução | 52 |
| 2. Materiais e métodos | 54 |
| 3. Resultados | 58 |
| 4. Discussão | 67 |
| 5. Conclusão | 70 |
| 6. Referências | 71 |
| Considerações finais | 76 |

Resumo

Este estudo abordou a diversidade e distribuição de peixes em diversos habitats marinhos do Parque Nacional Marinho de Abrolhos, utilizando análises multivariadas para compreender as relações entre as espécies e os diferentes ambientes. Foram identificadas diferenças na composição de espécies entre chapeirões, costões rochosos, recifes de corais, fundos arenosos, rodolitos e bancos de algas marinhas, sendo influenciadas por variáveis ambientais como temperatura, profundidade e rugosidade do substrato. Espécies como *Halichoeres poeyi* e *Cryptotomus roseus* foram destacadas como determinantes na caracterização de habitats com predominância de macroalgas. Paralelamente, o estudo explorou a importância dos bancos de rodolitos na biodiversidade de peixes em Abrolhos, considerando-os como megahabitat intermediário entre fundos consolidados e inconsolidados. Apesar de megahabitats consolidados apresentarem a maior diversidade alfa, os bancos de rodolitos revelaram uma biomassa significativamente superior, indicando adaptações específicas dos peixes a esses ambientes. Variáveis como temperatura, visibilidade, profundidade e tipos de substrato foram identificadas como cruciais na distribuição das espécies. Esses resultados enfatizam a necessidade de estratégias de conservação holísticas, que considerem não apenas espécies específicas, mas também a diversidade de habitats. Propõe-se a implementação de áreas marinhas protegidas mais abrangentes, inserção de corredores para garantir conectividade entre habitats e a promoção de práticas de pesca sustentável como medidas cruciais para a proteção efetiva desses ambientes heterogêneos. Além disso, o estudo destaca a importância da divulgação dessas descobertas para a comunidade científica, gestores e a sociedade em geral. A compreensão aprofundada das complexas interações ecológicas fornecidas por este estudo é uma ferramenta para orientar políticas de conservação adaptativas e sustentáveis. Visando preservar a biodiversidade única e promover a resiliência dos ecossistemas marinhos, é essencial disseminar essas informações para incentivar uma abordagem coletiva na conservação desses habitats e as espécies presentes.

Palavras-chave: Conservação marinha, biodiversidade de peixes, ecologia da paisagem, Conectividade, Parque Nacional Marinho de Abrolhos.

Abstract

This study addressed the diversity and distribution of fish in various marine habitats of the Abrolhos Marine National Park, utilizing multivariate analyses to comprehend the relationships between species and different environments. Differences in species composition were identified among pinnacle reefs, rocky shores, coral reefs, sandy bottoms, rhodolith beds, and seaweed banks, influenced by environmental variables such as temperature, depth, and substrate roughness. Species like *Halichoeres poeyi* and *Cryptotomus roseus* were highlighted as determinants in characterizing habitats predominantly featuring macroalgae. Simultaneously, the study explored the significance of rhodolith beds in the fish biodiversity of Abrolhos, considering them as an intermediate megahabitat between consolidated and unconsolidated substrates. Despite consolidated megahabitats exhibiting the highest alpha diversity, rhodolith beds revealed significantly higher biomass, indicating specific fish adaptations to these environments. Variables like temperature, visibility, depth, and substrate types were identified as crucial in species distribution. These results underscore the need for holistic conservation strategies, considering not only specific species but also the diversity of habitats. Proposed measures include the implementation of more comprehensive marine protected areas, the establishment of corridors to ensure connectivity between habitats, and the promotion of sustainable fishing practices as crucial steps for the effective protection of these heterogeneous environments. Additionally, the study highlights the importance of disseminating these findings to the scientific community, managers, and society at large. The in-depth understanding of complex ecological interactions provided by this study serves as a tool to guide adaptive and sustainable conservation policies. To preserve the unique biodiversity and enhance the resilience of marine ecosystems, it is essential to disseminate this information, encouraging a collective approach to the conservation of these habitats and the species within them.

Keywords: Marine conservation, fish biodiversity, landscape ecology, Connectivity, Abrolhos Marine National Park.

Introdução

A paisagem marinha tropical é um ambiente dinâmico e espacialmente heterogêneo, influenciado por diversos processos em diferentes escalas que afetam a qualidade do habitat para espécies marinhas (Boström et al., 2011; Pittman et al., 2021). A compreensão dos padrões e processos que moldam a distribuição e dinâmica das assembleias de peixes é necessária para a conservação da biodiversidade marinha (Gillis et al., 2017). Nesse contexto, a diversidade de habitat emerge como uma perspectiva integrada, medindo a variedade e a cobertura percentual de diferentes habitats em uma determinada área (Fauth et al., 1996; Cardinale et al., 2012).

Este estudo se propõe a explorar a relação entre as estruturas que compõem a paisagem marinha e a conservação dos peixes, focando principalmente região do Parque Marinho de Abrolhos, unidade de conservação que abriga uma diversidade de habitats marinhos cruciais para a sobrevivência e reprodução das espécies (Francini-Filho et al., 2020). A pesquisa visa não apenas a preservação das espécies individualmente, mas também a manutenção dos processos ecológicos que sustentam essas populações (Teixeira, Silva e Costa, 2019), como os recursos disponíveis.

Considerando que diferentes espécies de peixes apresentam preferências por habitats específicos, a análise da diversidade de habitat se torna essencial, uma vez que uma maior variedade de habitat contribui para a disponibilidade de recursos, mantendo a biodiversidade e a estabilidade das populações (Hughes et al., 2018). A conectividade entre habitats, especialmente em ambientes recifais, desempenha um papel vital na migração e interação comportamental entre espécies (Perry et al., 2010; Cowen et al., 2000). No entanto, perturbações causadas por atividades humanas, como a mineração de carbonatos, exploração de petróleo e pesca de arrasto, podem representar ameaças significativas para habitats similares que possam estar sofrendo esses tipos de interferências (Grigg, 2006; Teichert, 2014).

A região de Abrolhos é rica em megahabitats, como os recifais e bancos de rodolitos, que desempenham um papel crucial na produção de carbonato de cálcio e na estabilização dos sedimentos (Foster, 2001). Estes habitats são fundamentais para a biodiversidade da região pois estão associados, atraindo diversas espécies de peixes devido à disponibilidade de abrigo e alimento (Araújo, 2016).

Diante das crescentes ameaças decorrentes das atividades humanas e das mudanças climáticas, este estudo tem como objetivo analisar o papel dos diferentes habitats, na conservação dos peixes marinhos. No qual visamos responder questões fundamentais sobre a diversidade e abundância de peixes, o papel trófico das espécies e a descrição da paisagem desses habitats. A compreensão desses aspectos é vital para o desenvolvimento de estratégias eficazes de conservação, contribuindo para a proteção dos ecossistemas marinhos e do patrimônio natural da região (Dias et al., 2021).

Capítulo 1

Diversidade de Peixes Marinhos na Costa Brasileira: Uma Análise dos Principais Habitats e Suas Características



Autores: Inaiara Sousa Siqueira da Silva, Alexandre Schiavetti, Carlos Werner Hackradt

Publicação de cartilha – ANEXO PDF

Capítulo 2

Diversidade e Distribuição de Peixes na Paisagem do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos: Implicações para a Conservação



Autores: Inaiara Sousa Siqueira da Silva, Alexandre Schiavetti, Carlos Werner Hackradt

Revista: Fish and Fisheries

Fator de impacto: 7.401

Qualis CAPES: A1

Diversidade e Distribuição de Peixes na Paisagem do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos: Implicações para a Conservação

Resumo

Este estudo investigou a composição e distribuição de peixes em diversos habitats marinhos no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. Utilizando análises multivariadas, identificamos diferenças significativas na composição de espécies entre chapeirões, costões rochosos, recifes de corais, fundos arenosos e bancos de algas marinhas. Variáveis ambientais, como temperatura, profundidade e rugosidade, influenciaram a distribuição das espécies. Como *Halichoeres poeyi* e *Cryptotomus roseus* que foram identificadas como determinantes para caracterizar habitats específicos. A análise de diversidade funcional revelou diferentes grupos tróficos, evidenciando a complexidade das redes alimentares, especialmente entre fundos consolidados e inconsolidados, é crucial para a circulação de organismos garantindo conectividade ecológica. A partir desses resultados, destacamos a necessidade de estratégias de conservação abrangentes, considerando não apenas espécies, mas também a diversidade de habitats. A implementação de áreas marinhas protegidas mais abrangentes, inserção de corredores afim de garantir maior conectividade entre habitats e incentivos de pesca sustentável são medidas cruciais para a proteção eficaz desses ambientes.

Palavras-chave: Conservação marinha, biodiversidade de peixes, ecologia da paisagem, Conectividade, Parque Nacional Marinho de Abrolhos.

Abstract

Diversity and Distribution of Fish in the Seascape of Abrolhos Marine National Park: Implications for Conservation

This study investigated the composition and distribution of fish in diverse marine habitats within the Abrolhos Marine National Park. Employing multivariate analyses, we identified significant differences in species composition among bommies, rocky shores, coral reefs, sandy bottoms, and marine algal banks. Environmental variables such as temperature, depth, and rugosity influenced species distribution, with *Halichoeres poeyi* and *Cryptotomus roseus* identified as key determinants characterizing specific habitats. Functional diversity analysis unveiled distinct trophic groups, highlighting the complexity of food webs. The ecological connectivity between consolidated and unconsolidated substrates emerged as crucial for organism circulation, ensuring ecological connectivity. Based on these findings, we emphasize the necessity for comprehensive conservation strategies, addressing not only species but also habitat diversity. Implementation of more extensive marine protected areas, establishment of corridors to enhance habitat connectivity, and promotion of

sustainable fishing practices are pivotal measures for the effective protection of these environments.

Keywords: Marine conservation, fish biodiversity, landscape ecology, Connectivity, Abrolhos Marine National Park.

1. Introdução

A paisagem marinha tropical é constituída por áreas dinâmicas e espacialmente heterogêneas que são moldadas por múltiplos processos em diferentes escalas que influenciam a qualidade do habitat para espécies marinhas e seus estágios de vida (Boström et al., 2011; Pittman et al., 2021). Assim, a análise da diversidade de peixes em relação à paisagem marinha é fundamental para elucidar os padrões e processos que influenciam a distribuição e dinâmica das assembleias de peixes marinhos (Gillis et al., 2017). Uma métrica amplamente utilizada nesse contexto é a diversidade de habitat, que mede a variedade de tipos de habitat presentes em uma determinada área e seu percentual de cobertura (Fauth et al., 1996; Cardinale et al., 2012).

Como diferentes espécies têm preferências distintas por habitats específicos, quanto maior a diversidade de habitat, maior a variedade de recursos disponíveis para os peixes, contribuindo para a manutenção da biodiversidade e a estabilidade das populações (Hughes et al., 2018) e equilíbrio funcional nas assembleias. Apesar de os ambientes recifais concentrarem alta biodiversidade, muitas espécies desempenham funções vitais durante seu desenvolvimento em habitats adjacentes para alimentação e desova (Perry et al., 2010; Cowen et al., 2000). Esses movimentos ontogenéticos permitem a conectividade entre assembleias (Thompson et al., 2018) e possibilita uma maior distribuição além das áreas conservadas, pois são habitats que oferecem recursos funcionam como trampolins para diversas espécies (Nagelkerken et al., 2000; Beck et al., 2001).

Perturbações ocasionadas por atividades humanas estão entre os principais impulsionadores da perda de habitat e distúrbios nos serviços ecossistêmicos

nas paisagens marinhas (Halpern et al., 2019). Essas alterações geralmente têm um impacto em cascata na interação e migração de organismos, na transferência de nutrientes e energia entre diferentes habitats, ecossistemas e regiões geográficas (Carr et al., 2017). Portanto, é crucial adotar estratégias de conservação que promovam a proteção integral de habitats capazes de abrigar comunidades diversas e resilientes, facilitando a continuidade e o equilíbrio dos ecossistemas (Olds et al., 2012).

A riqueza e biomassa de peixes herbívoros nos recifes podem ser até 4 vezes maiores em locais onde existe conectividade estrutural entre os habitats de manguezais e recifes, como afirmado por Olds et al. (2012). Esses efeitos têm um impacto direto nas atividades de herbivoria realizadas por espécies-chave, que ajudam a controlar as algas competidoras nos recifes (Feitosa et al., 2023). Esse padrão tem sido cada vez mais investigado por estudos em ambientes marinhos costeiros.

Em determinadas regiões do Atlântico, foi observado que áreas com a presença de pradarias marinhas sustentam maiores densidades de peixes e recursos alimentares em comparação com locais que possuem apenas fundo arenoso dentro do mesmo padrão de paisagem marinha (Grabowski et al., 2022). Em contrapartida, a preservação de áreas de movimentação, que possibilitam às espécies de peixes migrarem entre habitats com maior disponibilidade de recursos, tem influência significativa nas interações comportamentais e tróficas predador-presa, como no caso de fundos arenosos (Irlandi, 1994).

Tais estudos acima supracitados sugerem que é possível compreender os padrões espaciais de riqueza de espécies de peixes e como a restauração costeira é particularmente urgente em paisagens marinhas tropicais próximas à costa. Entretanto, uma revisão realizada por Gilby et al. (2018) constatou que menos de 20% de iniciativas de restauração e conservação marinha consideraram em seus escopos critérios em escala de paisagem. Desta forma, torna-se necessária uma perspectiva mais holística para a compreensão da distribuição de espécies.

A região de Abrolhos abriga uma grande diversidade de habitats marinhos, como recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e bancos de algas marinhas, desempenhando papéis cruciais na sobrevivência e reprodução das espécies de peixes (Francini-Filho et al., 2020). A conservação desses peixes não se limita apenas à preservação das espécies individualmente, mas também à manutenção dos processos ecológicos que sustentam essas populações (Teixeira, Silva e Costa, 2019).

Este estudo tem como objetivo principal analisar o papel dos diferentes habitats do fundo marinho de Abrolhos na conservação dos peixes marinhos. Para atingir esse objetivo, propomos responder as seguintes questões: (1) Como a diversidade e a abundância de peixes marinhos variam entre os diferentes habitats do fundo marinho de Abrolhos, incluindo recifes de corais, costões rochosos, chapeirões, fundos arenosos e bancos de algas marinhas? (2) Qual é o papel trófico das espécies de peixes nos diferentes habitats do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos? (3) Como pode ser descrita a paisagem dos diferentes habitats do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos?

Para isso, foram analisados os padrões de distribuição dos peixes marinhos em relação aos diferentes habitats do fundo marinho de Abrolhos, incluindo recifes de corais, costões rochosos, chapeirões, fundos arenosos e bancos de algas marinhas. A análise focou no nível de habitat, considerando a relação entre a presença desses habitats e a diversidade, abundância e funcionalidade das assembleias de peixes. Compreender esses aspectos é crucial para desenvolver estratégias eficazes de conservação dos peixes em Abrolhos, contribuindo assim para a proteção dos ecossistemas marinhos e do patrimônio natural da região (Dias et al., 2021).

2. Materiais e métodos

2.1 Área de estudo

O Parque Marinho de Abrolhos é uma área de proteção integral, criado em 1983, que está localizado na costa da Bahia, Brasil, onde é reconhecido como o maior parque marinho do Atlântico Sul (Figura 1 A). O Parque Nacional Marinho dos Abrolhos compreende duas porções distintas e descontínuas: o arquipélago e a região de Timbebas. O arquipélago é constituído por cinco

ilhas principais - Ilha de Santa Bárbara, Redonda, Siriba, Sueste e Guarita. Estas ilhas destacam-se como formações rochosas, apresentando costões e recifes de coral em uma área total de aproximadamente 913 quilômetros quadrados. A diversidade ecológica do Parque é evidenciada pela presença dessas características geológicas, proporcionando um habitat único para diversas espécies marinhas. Esse parque marinho tem sido objeto de muitas pesquisas devido à sua singularidade ecológica e à diversidade de seus ecossistemas (Moura et al. 2013; Cavalcanti et al. 2013).

Como área de estudo, o Parque é reconhecido por abrigar uma grande diversidade de organismos marinhos, incluindo recifes de coral, algas, tartarugas marinhas, aves marinhas e peixes, das quais são estimadas cerca de 280 espécies (Sampaio, 2009; Previero e Gasalla 2018). As principais estruturas que compõem a paisagem marinha são de macroalgas, recifes de chapeirões e recifes de franjas, banco de rodolitos, costão rochoso, buracas, fundo arenoso, manguezais e bancos de areia com grama marinha (Leão et al. 2003; Moura et al. 2013; Bastos et al. 2013).

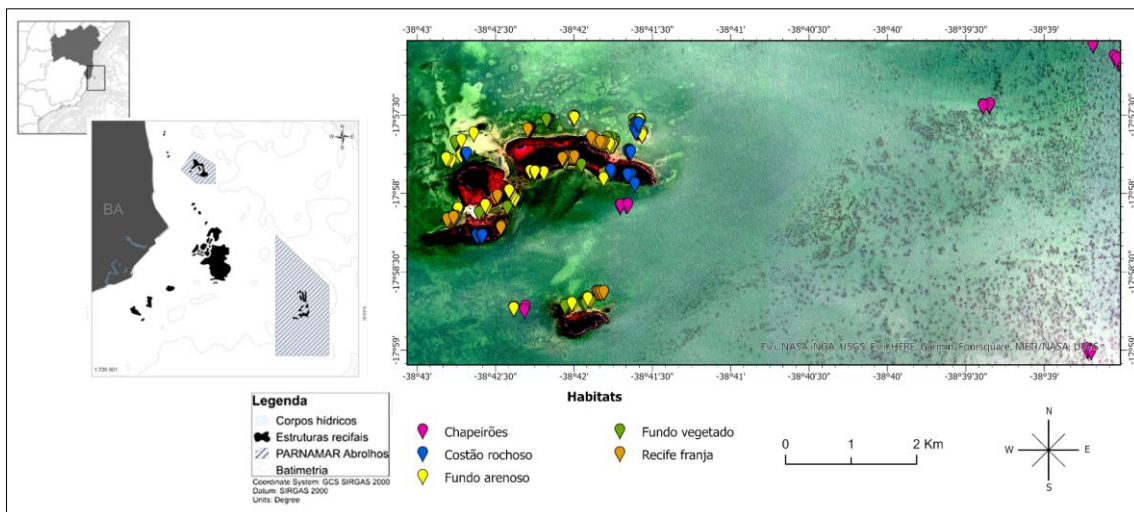


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. (a) Região de Abrolhos próximo ao estado da Bahia, costa leste do Brasil, com destaque (em listras) das Áreas Marinhas Protegidas (AMP's) e maior concentração de estruturas recifais (em preto). (b) Pontos de amostragens.

2.2 Coleta de dados

Os dados foram coletados ao redor do arquipélago contemplando os principais habitats do fundo marinho do Parque Marinho de Abrolhos, incluindo

recifes em chapeirões, recifes em franja, costões rochosos, bancos de algas marinhas e fundos arenosos (Figura 1 B). As coletas de dados foram realizadas entre os anos de 2019 e 2021, por meio de mergulho autônomo (SCUBA), realizando censo visual subaquático (UVC) para caracterização das assembleias de peixes. Foi usado o método estacionário de ponto fixo com observância em um raio de 2 metros (peixes < 20cm) e 4 metros (peixes > 20cm) (Minte-Vera et al., 2008) onde cada setor conteve a amostragem de seis pontos fixos (Figura 2).

Foram realizados fotoquadrados para avaliar a porcentagem de cobertura bentônica, onde 30 fotografias de 15 x 17 cm realizados dentro do raio do UVC para serem estimados em porcentagem. Devido a formação distinta dos chapeirões, foram considerados o cabeço e as bordas para obtenção das fotografias de cobertura bentônica.

Também foram registradas as condições ambientais, tais como: a) Heterogeneidade – Tipo de substrato (estimando visualmente a porcentagem de recifes, rocha, areia e cascalho); b) Complexidade com estimativa visual da rugosidade (1 a 4, sendo 1 o terreno liso, e 4 o mais rugoso e alto possível); c) inclinação do terreno (em escala visual: 0° - 30°, 30° - 60°, 60° - 90°) (Félix-Hackradt et al. 2014); d) profundidade e temperatura da água do fundo; e) Os pontos de coleta foram georreferenciados através de GPS acoplados em pranchas.

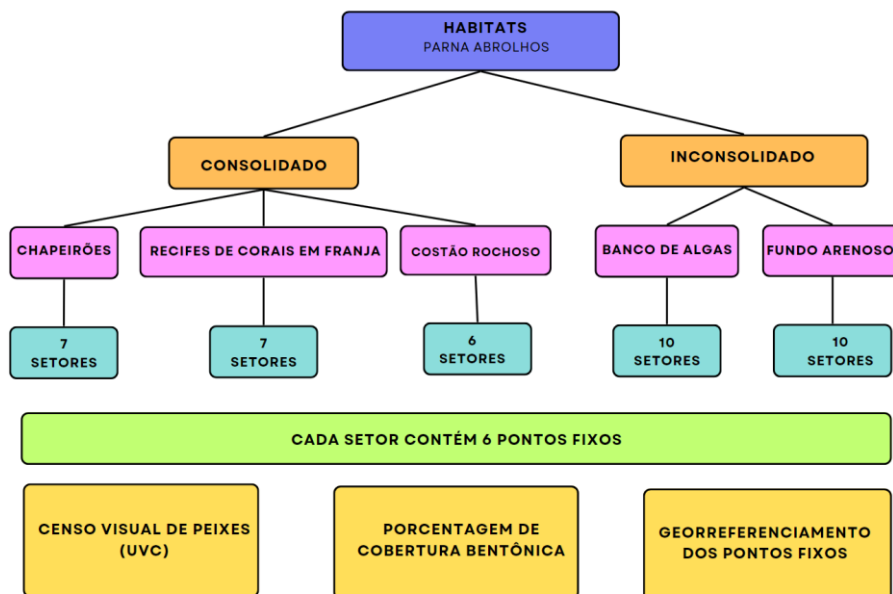


Figura 2: Desenho amostral das coletas por censo visual subaquático (UVC), fotoquadrado para estimativa de cobertura bentônica e georreferenciamento no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos.

2.3 Mapas e métricas da paisagem

Para visualizar a disponibilidade dos habitats em uma escala de paisagem, utilizamos uma imagem Worldview-2 com resolução espacial de 50 cm e radiometria de 11 bits por pixel em oito bandas. Combinamos técnicas de processamento de imagem e amostragem em regiões de maior profundidade para minimizar interferências causadas pela radiação refletida pelo fundo ou pelos sedimentos em suspensão na coluna d'água (Portela, 2020). Realizamos uma regressão linear entre a radiância da banda NIR (Near Infrared - infravermelho próximo) e a radiância da banda do comprimento de onda visível para caracterizar diferentes propriedades espectrais dos objetos presentes na cena.

A classificação dos habitats foi feita usando o método de Máxima Verossimilhança no software ArcGIS 10.3 (ESRI, 2014), baseando-se na distribuição de probabilidade dos valores de pixels em cada banda para atribuir a classe mais provável a cada pixel da imagem (Portela, 2020). A acurácia da classificação foi avaliada pelo coeficiente de concordância Kappa (Kappa Index), que quantifica a concordância entre as classes atribuídas e as classes reais do terreno. Além disso, realizamos a correção atmosférica e o

processamento de glint, utilizando o método de Lyzenga et al. (1981) conhecido como Depth Invariant Index (DII) com a ferramenta Band Math no software SNAP (ESA, 2017).

Amostras representativas de cada classe de habitat foram geradas no formato shapefile, permitindo a visualização espacial dos resultados da classificação. Quatro classes de habitats foram consideradas: Pradarias, fundo pradarias, fundo inconsolidado e fundo consolidado (representando recifes de corais e costões rochosos) e chapeirões. Essas classes foram diferenciadas com base nas propriedades espectrais dos objetos presentes na imagem e nas características específicas dos diferentes habitats marinhos. Os pontos amostrais de coleta foram plotados no mapa para visualização da sua distribuição.

2.4 Análise de dados

Para avaliar os agrupamentos e variabilidade da composição de espécies em relação aos tipos de habitats (chapeirões, recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas), empregou-se o Escalonamento Multidimensional Não-Métrico (nMDS), utilizando o coeficiente de similaridade de Bray-Curtis. Em seguida, foi aplicado o teste ANOSIM (Análise de Similaridades) para verificar as diferenças entre os tipos de habitats. Para gerar os gráficos, foi utilizado o pacote ggplot2 (Wickham, 2016).

Para entender como as variáveis abióticas e as características ambientais influenciaram na composição de espécies nos habitats, foi utilizada a Análise de Redundância (RDA). Posteriormente, foi aplicada a Análise de Variância da Correspondência Canônica para identificar a significância dos eixos na representação da relação entre as variáveis ambientais preditoras e a composição de espécies. Adicionalmente, essa análise foi empregada para identificar as variáveis ambientais que mais contribuíram na composição de espécies. Os pacotes utilizados para a análise RDA e para elaboração dos gráficos foram vegan (Oksanen et al., 2022) e ggord (Beck, 2022), respectivamente. Os valores do R^2 e R^2 ajustado foram calculados para saber a

porcentagem de influência das variáveis ambientais na variabilidade da composição de espécies.

Para avaliar a riqueza de espécies e as diversidades de Shannon e Simpson em cada habitat, utilizou-se o pacote `vegan` (Oksanen et al., 2022). A fim de verificar as diferenças na diversidade de Shannon e Simpson entre os habitats, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis. Para avaliar como os habitats se diferenciaram em relação à riqueza e à abundância de espécies, empregou-se o Modelo Linear Generalizado (GLM). Antes das aplicações das análises GLMs, foram feitos diagnósticos dos dados, incluindo análises dos resíduos, análises de dispersão e análises de inflação de zeros. Os pacotes utilizados nessas análises foram o `DHARMA` (Hartig, 2022) e o `performance` (Lüdtke et al., 2021). A seleção dos modelos foi feita com o pacote `MASS` (Venables e Ripley, 2002). Para melhor compreensão dos ajustes dos modelos gerados, foram calculados o Akaike Information Criterion (AIC) e o Bayesian Information Criterion (BIC).

As análises da diversidade beta, que englobam a diversidade beta por substituição, por aninhamento e total, foram conduzidas utilizando-se os pacotes `vegan` (Oksanen et al., 2022) e `betapart` (Baselga et al., 2023). Para avaliar a diversidade funcional dos grupos tróficos e verificar a diferença no número de grupos tróficos entre os habitats, foi utilizado o teste de Kruskal-Wallis, sendo realizada a comparação par a par de amostras por meio do teste de Wilcoxon.

Para descrever os habitats com as variáveis ambientais como rugosidade, inclinação, temperatura, profundidade, porcentagem de fundo e cobertura bentônica, e compreender como cada variável influencia a formação desses grupos de habitats, empregou-se a Análise dos Componentes Principais (PCA). Essa análise foi conduzida com os pacotes `FactoMineR` (Lê, Josse e Husson, 2008) e `factoextra` (Kassambara e Mundt, 2020). Para verificar a contribuição das espécies e das variáveis ambientais mais importantes na diferenciação entre os habitats e na formação dos grupos, foi utilizada a análise SIMPER (Análise de Porcentagens de Similaridades). O pacote utilizado para essas análises foi o `vegan` (Oksanen et al., 2022). Adicionalmente, o pacote

ggordiplots (Quensen, Simpson e Oksanen 2023) foi utilizado para gerar os gráficos.

Os gráficos foram gerados com os pacotes ggplot2 (Wickham, 2016) e gridExtra (Auguie, 2017). Os pacotes tidyverse (Wickham et al., 2019) e visdat (Tierney, 2017) foram utilizados para organização e manipulação dados antes de aplicar as análises estatísticas.

3 Resultados

3.1 Riqueza, Abundância e Composição de Peixes entre Habitats

Os habitats de fundos arenosos e banco de algas marinhas apresentaram maiores similaridades entre si, e maiores dissimilaridades com os grupos de chapeirões, costões rochosos e recifes de corais (Figura 1), que por sua vez apresentaram maiores semelhanças entre si. Portanto, de acordo com o teste ANOSIM, esses habitats apresentaram diferenças na composição de espécies ($p = 0,001$ e $R = 0,384$; Figura 2).

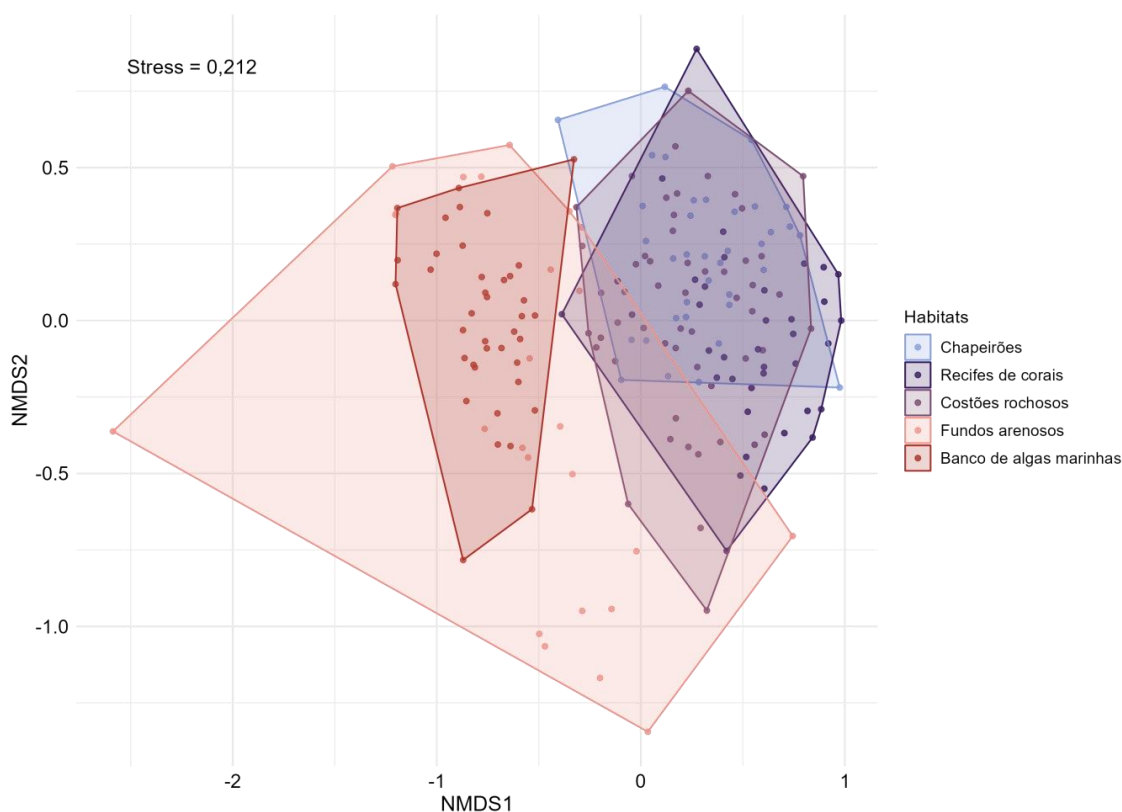


Figura 1. Gráfico do Escalonamento Multidimensional Não-Métrico (nMDS) para os habitats chapeirões, recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas. O gráfico apresenta o valor de 0,212 representando o stress da análise.

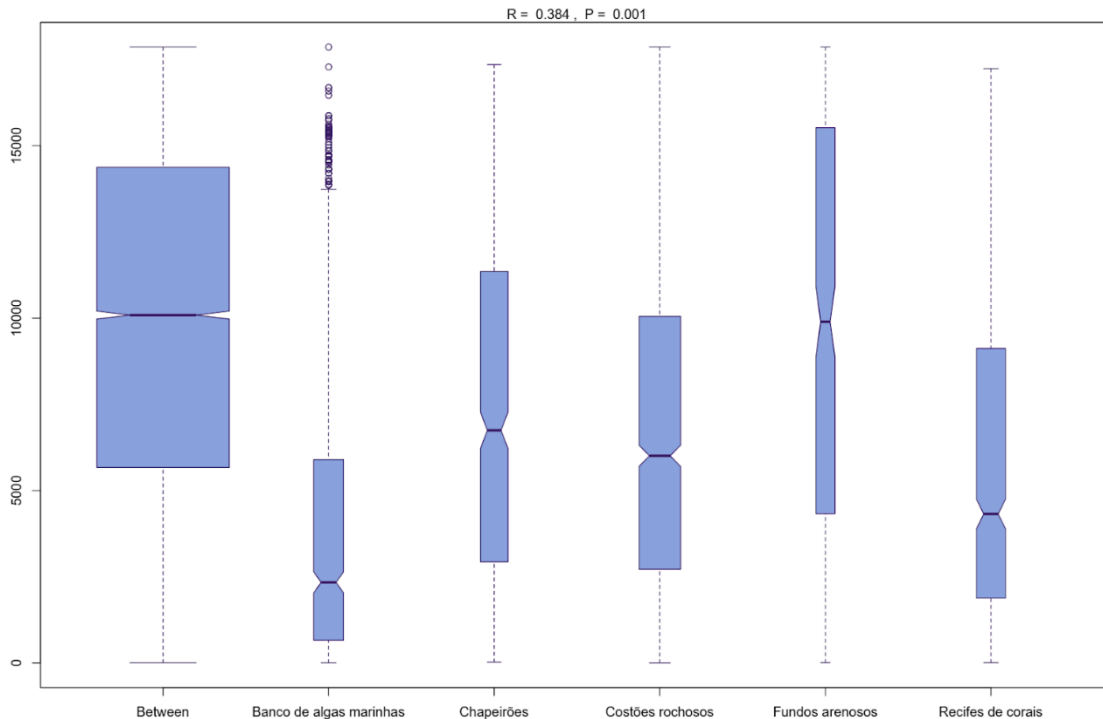


Figura 2. Teste da Análise de Similaridades (ANOSIM) com o ranking de dissimilaridade entre os habitats banco de algas marinhas, chapeirões, costões rochosos, fundos arenosos e recifes de corais. Acima do gráfico estão os valores de R e p a nível de significância de 0,05.

Algumas espécies de peixes foram significativas na determinação para diferenças entre os grupos de habitats, ou seja, apresentaram vetores significativos na formação dos grupos. Por exemplo, as espécies *Halichoeres poeyi*, *Cryptotomus roseus*, *Sparisoma radians*, *Sphoeroides spengleri* foram responsáveis por caracterizar os habitats banco de algas marinhas e fundos arenosos, e as espécies *Stegastes fuscus*, *Malacoctenus zaluari*, *Holacanthus ciliaris*, *Ocyurus chrysurus* e *Epinephelus morio* são algumas das espécies que caracterizam os habitats chapeirões, costões rochosos e recifes de corais (Figura 3). A espécie *Acanthurus chirurgus* apresentou a maior porcentagem de contribuição, seguido da espécie *Acanthurus coeruleus* e *Scarus trispinosus* para os habitats de chapeirões, costões rochosos e recifes de corais. As espécies *Cryptotomus roseus* e *Halichoeres poeyi* foram as que mais contribuíram para os habitats banco de algas marinhas e fundos arenosos com porcentagens de 45% e 27%, respectivamente.

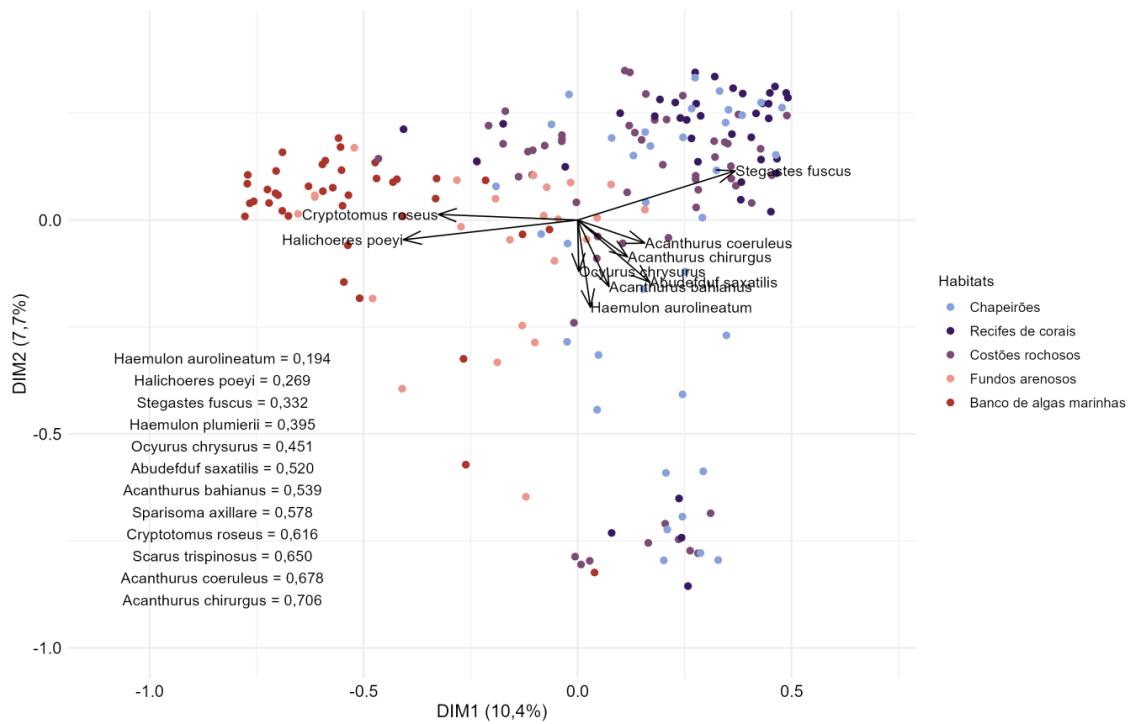


Figura 3. Gráfico da análise Análise de Porcentagens de Similaridades (SIMPER) com as contribuições de cada espécie para formação dos grupos de habitats chapeirões, recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas.

As variáveis ambientais influenciaram na distribuição e na variabilidade de espécies entre os habitats, com os habitats de fundos arenosos e banco de algas marinhas apresentando maior semelhança nas condições ambientais e composição de espécies e maior diferença entre os habitats de chapeirões, costões rochosos e recifes de corais (Figura 4). As coordenadas 1 e 2 apresentaram significância estatística e explicaram 54,46% e 11,54% da variabilidade, respectivamente (Tabela1).

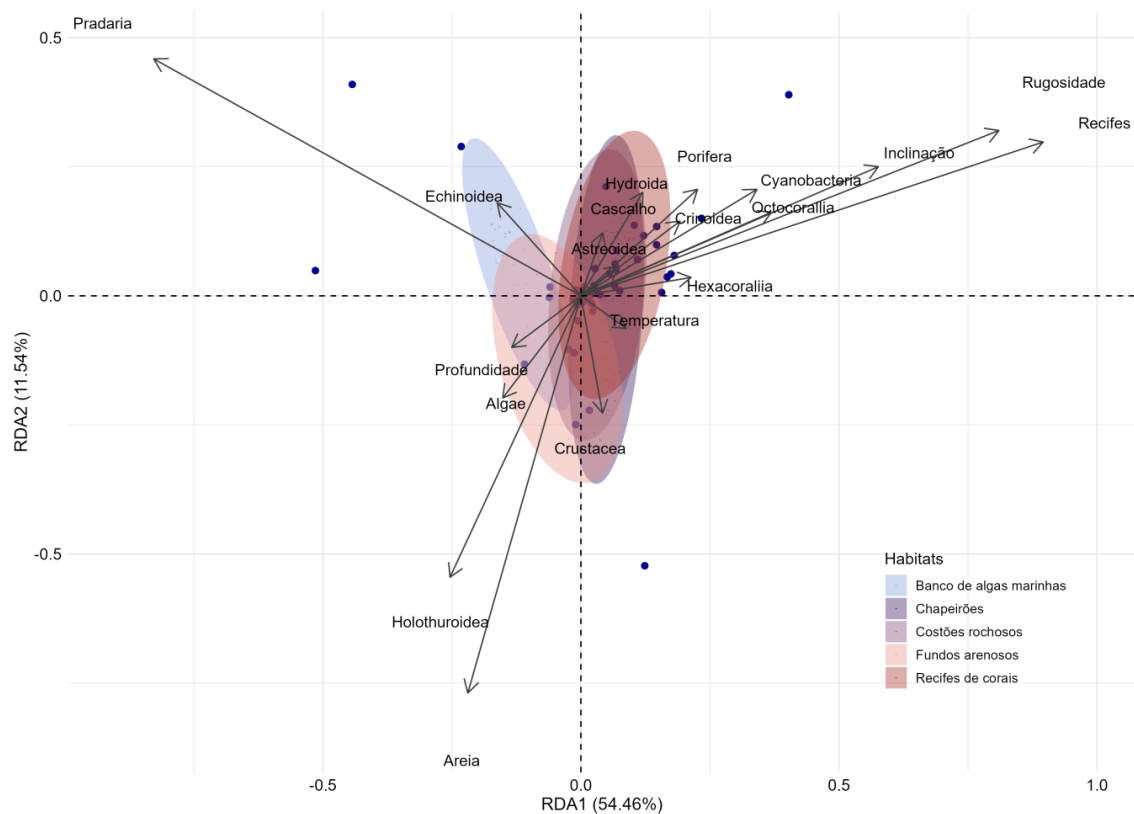


Figura 4. Gráfico da Análise de Redundância (RDA) apresentando a influência das variáveis ambientais na composição de espécies de peixes entre os habitats de banco de algas marinhas, chapeirões, costões rochosos, fundos arenosos e recifes de corais.

Tabela 1. Resultado do teste de permutação da Análise de Variância (ANOVA) para as coordenadas da Análise de Redundância (RDA) considerando o modelo da influência dessas variáveis preditoras sobre a composição de espécies. A tabela apresenta as variáveis ambientais do modelo, os graus de liberdade (gl), as variâncias do modelo, os valores de F e os valores de p. Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Coordenadas | gl | Variância | F | p |
|-------------|----|-----------|-------|--------------|
| RDA1 | 1 | 0,098 | 34,06 | 0,001 |

| Coordenadas | gl | Variância | F | p |
|-------------|-----|-----------|-------|--------------|
| RDA2 | 1 | 0,021 | 7,216 | 0,003 |
| RDA3 | 1 | 0,015 | 5,221 | 0,064 |
| RDA4 | 1 | 0,012 | 4,087 | 0,249 |
| RDA5 | 1 | 0,007 | 2,464 | 0,955 |
| RDA6 | 1 | 0,006 | 2,016 | 0,992 |
| RDA7 | 1 | 0,005 | 1,637 | 0,999 |
| RDA8 | 1 | 0,004 | 1,271 | 1 |
| RDA9 | 1 | 0,003 | 1,059 | 1 |
| RDA10 | 1 | 0,002 | 0,818 | 1 |
| RDA11 | 1 | 0,002 | 0,679 | 1 |
| RDA12 | 1 | 0,001 | 0,503 | 1 |
| RDA13 | 1 | 0,001 | 0,437 | 1 |
| RDA14 | 1 | 0,001 | 0,301 | 1 |
| RDA15 | 1 | 0,001 | 0,257 | 1 |
| RDA16 | 1 | 0,001 | 0,199 | 1 |
| RDA17 | 1 | 0 | 0,161 | 1 |
| RDA18 | 1 | 0 | 0,116 | 1 |
| RDA19 | 1 | 0 | 0,044 | 1 |
| Residual | 172 | 0,493 | — | — |

As variáveis ambientais que apresentaram maior influência na variabilidade da composição de espécies entre os habitats foram temperatura, profundidade, rugosidade, inclinação, recifes, areia, cascalho, pradaria e porifera (Tabela 2). Os valores de R^2 e R^2 ajustado para o modelo da análise RDA foram 0,267 e 0,186.

Tabela 2. Resultado do teste de permutação da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis ambientais da Análise de Redundância (RDA) considerando o modelo da influência dessas variáveis preditoras sobre a composição de espécies. A tabela apresenta as variáveis ambientais do modelo, os graus de liberdade (gl), as variâncias do modelo, os valores de F e os valores de p. Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Variáveis | gl | Variância | F | p |
|-----------|----|-----------|---|---|
|-----------|----|-----------|---|---|

| Variáveis | gl | Variância | <i>F</i> | <i>p</i> |
|---------------|-----|-----------|----------|--------------|
| Temperatura | 1 | 0,008 | 2,656 | 0,003 |
| Profundidade | 1 | 0,008 | 2,675 | 0,001 |
| Rugosidade | 1 | 0,066 | 23,010 | 0,001 |
| Inclinação | 1 | 0,006 | 2,120 | 0,013 |
| Recifes | 1 | 0,019 | 6,510 | 0,001 |
| Areia | 1 | 0,022 | 7,612 | 0,001 |
| Cascalho | 1 | 0,005 | 1,801 | 0,020 |
| Pradaria | 1 | 0,012 | 4,346 | 0,001 |
| Algae | 1 | 0,004 | 1,419 | 0,142 |
| Holothuroidea | 1 | 0,004 | 1,539 | 0,083 |
| Crustacea | 1 | 0,003 | 1,176 | 0,198 |
| Asteroidea | 1 | 0,003 | 0,929 | 0,571 |
| Echinoidea | 1 | 0,002 | 0,558 | 0,996 |
| Crinoidea | 1 | 0,003 | 1,084 | 0,347 |
| Porifera | 1 | 0,005 | 1,705 | 0,048 |
| Cyanobacteria | 1 | 0,003 | 0,875 | 0,586 |
| Octocorallia | 1 | 0,002 | 0,665 | 0,820 |
| Hexacorallia | 1 | 0,002 | 0,542 | 0,930 |
| Hydroida | 1 | 0,004 | 1,329 | 0,165 |
| Residual | 172 | 0,493 | — | — |

Os habitats chapeirões, recifes de corais e costões rochosos apresentaram maior riqueza de espécies e maiores diversidades comparado aos habitats fundos arenosos e banco de algas marinhas (Figura 5). Os habitats apresentaram diferenças nos valores de diversidade de Shannon ($X^2 = 93,008$; gl = 4; $p < 0,001$) e de Simpson ($X^2 = 66,86$; gl = 4; $p = < 0,001$). Os habitats de fundos arenosos e banco de algas marinhas apresentaram riquezas e diversidades mais baixas.

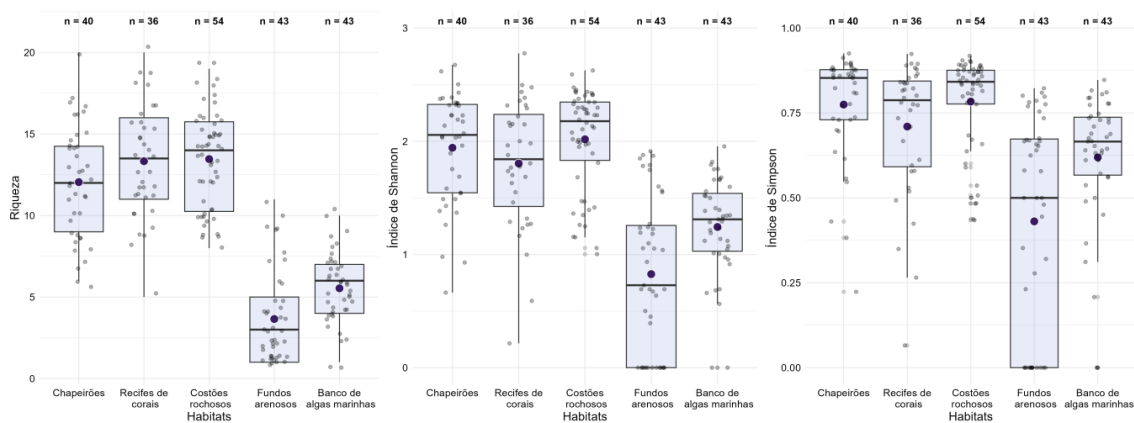


Figura 5. Riqueza, índice de Shannon e índice de Simpson para os habitats de chapeirões, recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas. O boxplot apresenta os valores máximos e mínimos, os quartis, os pontos de dispersão dos dados e os valores das médias indicadas pelo ponto azul. Acima do gráfico estão descritos os valores dos tamanhos amostrais.

Considerando o habitat de referência chapeirões, o qual apresentou uma das maiores riquezas, apenas os habitats de fundos arenosos e banco de algas marinhas apresentaram diferenças no número de riqueza de espécies, ou seja, os habitats recifes de corais e costões rochosos foram semelhantes em termos de riqueza de espécies com o habitat de referência chapeirões (Tabela 3). O R^2 de Nagelkerke e R^2 de Nagelkerke ajustado foram de 0,665 e 0,659, respectivamente.

Tabela 3. Resultados do Modelo Linear Generalizado para a riqueza de espécies entre os habitats. A tabela apresenta o habitat de referência Chapeirões indicado pelo intercepto e os habitats recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas, os valores da estimativa, os erros-padrão, a estatística t e os valores de p. Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Habitats | Estimativa | Erro-padrão | t | p |
|-------------------------|------------|-------------|---------|-------------------|
| Intercepto - Chapeirões | 2,489 | 0,046 | 54,646 | < 0,001 |
| Recifes de corais | 0,101 | 0,064 | 1,569 | 0,117 |
| Costões rochosos | 0,111 | 0,059 | 1,888 | 0,059 |
| Fundos arenosos | -1,194 | 0,092 | -12,994 | < 0,001 |
| Banco de algas marinhas | -0,778 | 0,079 | -9,820 | < 0,001 |

O habitat banco de algas marinhas seguido do habitat de fundos arenosos foram os que apresentaram menores abundâncias de peixes. Os habitats com as maiores abundâncias de peixes foram costões rochosos e chapeirões (Figura 6). Considerando o habitat de referência chapeirões,

apenas o habitat banco de algas marinhas foi diferente em termos de abundância de peixes (Tabela 4). O R^2 de Nagelkerke e R^2 de Nagelkerke ajustado foram de 0,034 e 0,017, respectivamente.

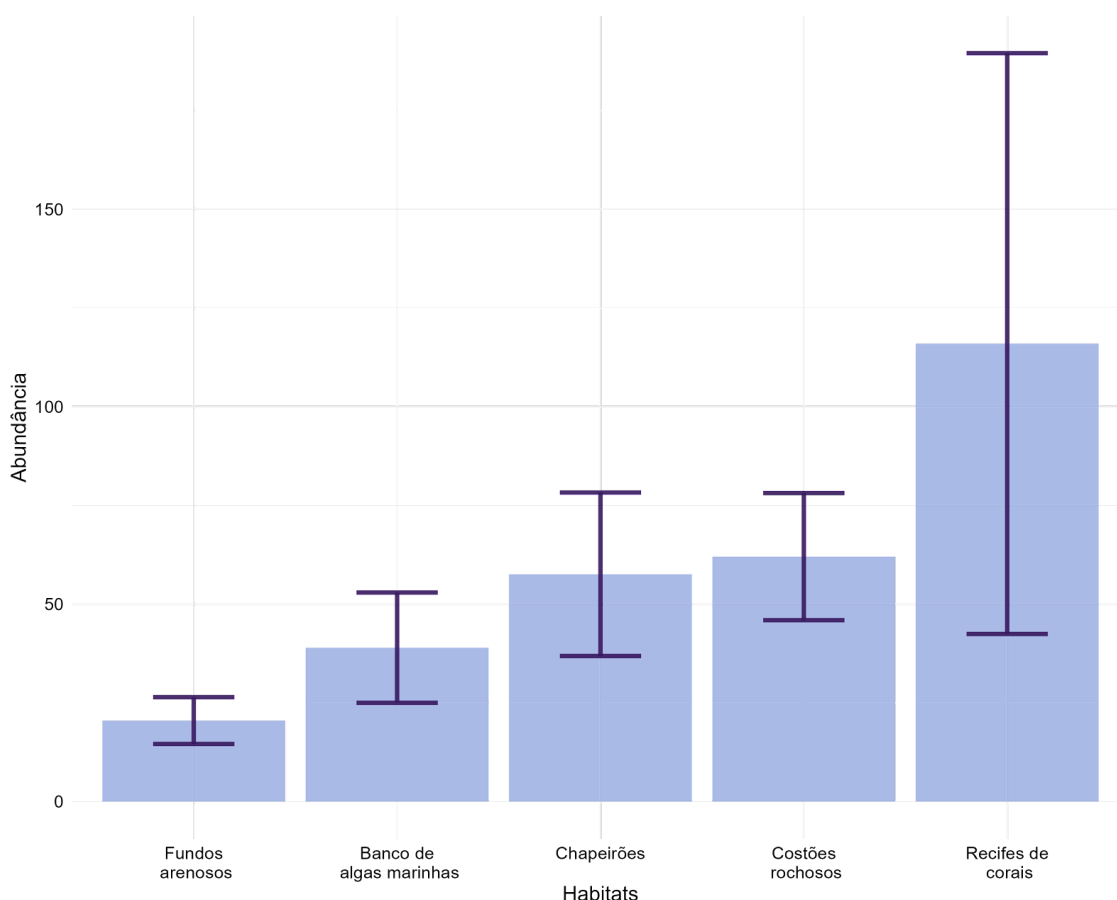


Figura 6. Abundância média por grupos de habitats (fundos arenosos, banco de algas marinhas, chapeirões, costões rochosos e recifes de corais). As barras representam os valores médios das abundância em cada grupos e seus respectivos erros-padrão.

Tabela 4. Resultados do Modelo Linear Generalizado para a abundância de peixes entre os habitats. A tabela apresenta o habitat de referência Chapeirões indicado pelo intercepto e os habitats recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas, os valores da estimativa, os erros-padrão, a estatística t e os valores de p . Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Habitats | Estimativa | Erro-padrão | t | p |
|-------------------------|------------|-------------|--------|--------------|
| Intercepto - Chapeirões | 0,946 | 0,117 | 8,061 | < 0,001 |
| Recifes de corais | -0,042 | 0,164 | -0,258 | 0,796 |
| Costões rochosos | 0,013 | 0,156 | 0,083 | 0,934 |
| Fundos arenosos | -0,322 | 0,192 | -1,676 | 0,094 |
| Banco de algas marinhas | -0,414 | 0,192 | -2,150 | 0,032 |

3.2 Diversidades Alfa, Beta e Funcional de Peixes

A diversidade beta total apresentou maior índice entre os habitats banco de algas marinhas e chapeirões, seguido dos habitats costões rochosos e recifes de corais. A diversidade beta total mais baixa ocorreu entre os habitats costões rochosos e recifes de corais e entre os habitats recifes de corais e chapeirões (Figura 7). De forma geral, as maiores diversidades betas total ocorreram na comparação dos habitats banco de algas marinhas e fundos arenosos com os habitats costões rochosos, chapeirões e recifes de corais. Esses resultados condizem com os valores das diversidades de Shannon e Simpson verificadas nesses habitats, onde os fundos arenosos e banco de algas marinhas apresentam mais baixa diversidade (Figura 8).

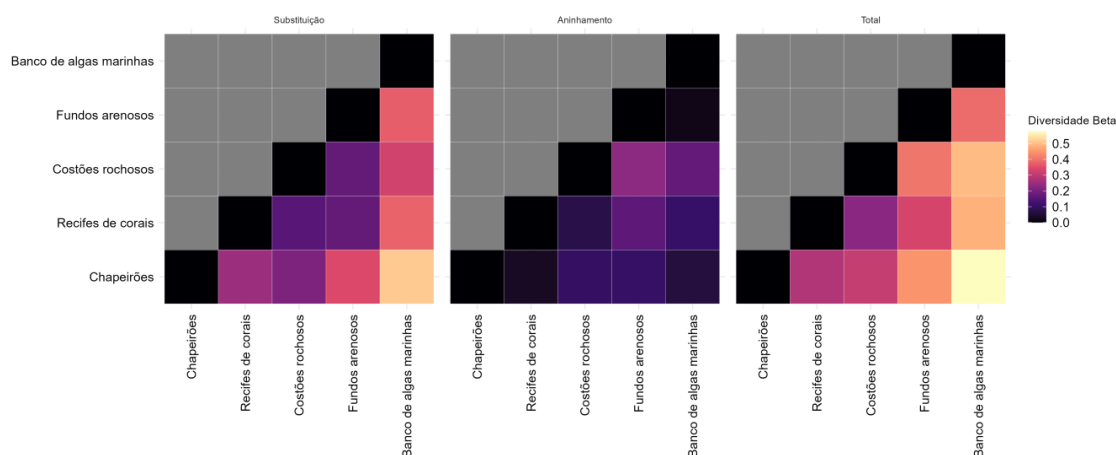


Figura 7. Diversidade beta por substituição, por aninhamento e total entre os habitats banco de algas marinhas, fundos arenosos, costões rochosos, recifes de corais e chapeirões. Valores mais altos de diversidade estão representados por ladrilhos em tons de rosa claro e diversidades beta mais baixas por ladrilhos em tons de roxo e preto.

As maiores diversidades beta por substituição ocorreram entre os habitats banco de algas marinhas e chapeirões, banco de algas marinhas e recifes de corais e banco de algas marinhas e fundos arenosos. A menor diversidade beta por substituição ocorreu entre os habitats costões rochosos e recifes de corais (Figura 7), corroborando com as diversidades de Shannon e Simpson mais próximas entre esses habitats (Figura 8). A diversidade beta por aninhamento apresentaram valores homogêneos entre os habitats, entretanto,

a maior diversidade beta por aninhamento ocorreu entre os habitats de fundos arenosos e costões rochosos, e entre os habitats fundos arenosos e recifes de corais e banco de algas marinhas e costões rochosos (Figura 7).

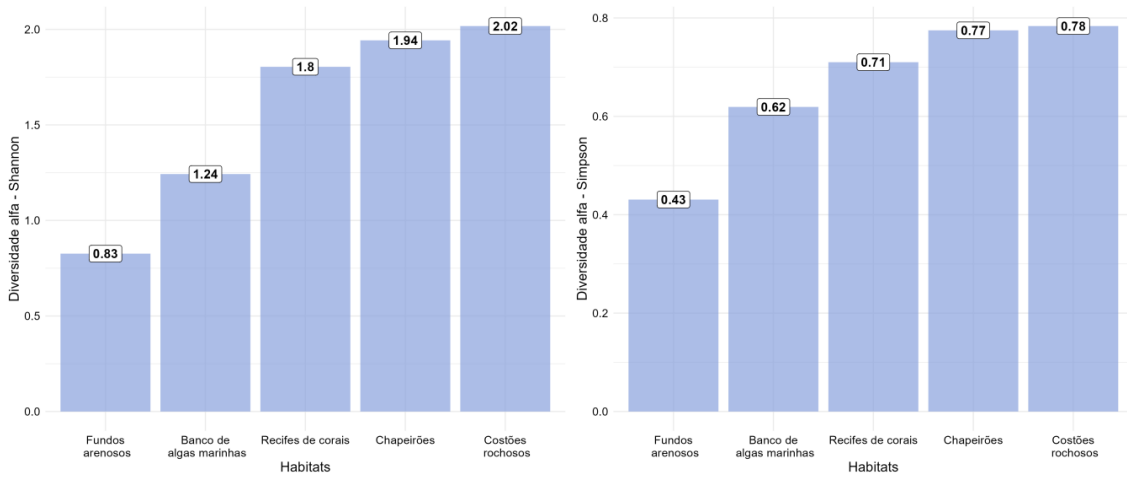


Figura 8. Valores médios das diversidades de Shannon e Simpson para cada tipo de habitat: fundos arenosos, banco de algas marinhas, recifes de corais, chapeirões e costões rochosos. Os valores no topo do gráfico indicam as médias das diversidades em cada grupo.

Diferentes grupos tróficos foram registrados nos habitats estudados. O grupo trófico mais representativo foi o de que se alimentam de invertebrados móveis, seguido do grupo herbívoro-detritívoro e do grupo de onívoros e planctívoros (Figura 9; $X^2 = 31,128$; $gl = 8$; $p < 0,001$). Entretanto, apesar da diferença na diversidade de peixes entre os habitats, o número total de grupos tróficos não variou de forma significativa, indicando uma diversidade funcional homogênea entre os ambientes (Figura 10; $X^2 = 4,187$; $gl = 4$; $p = 0,381$).

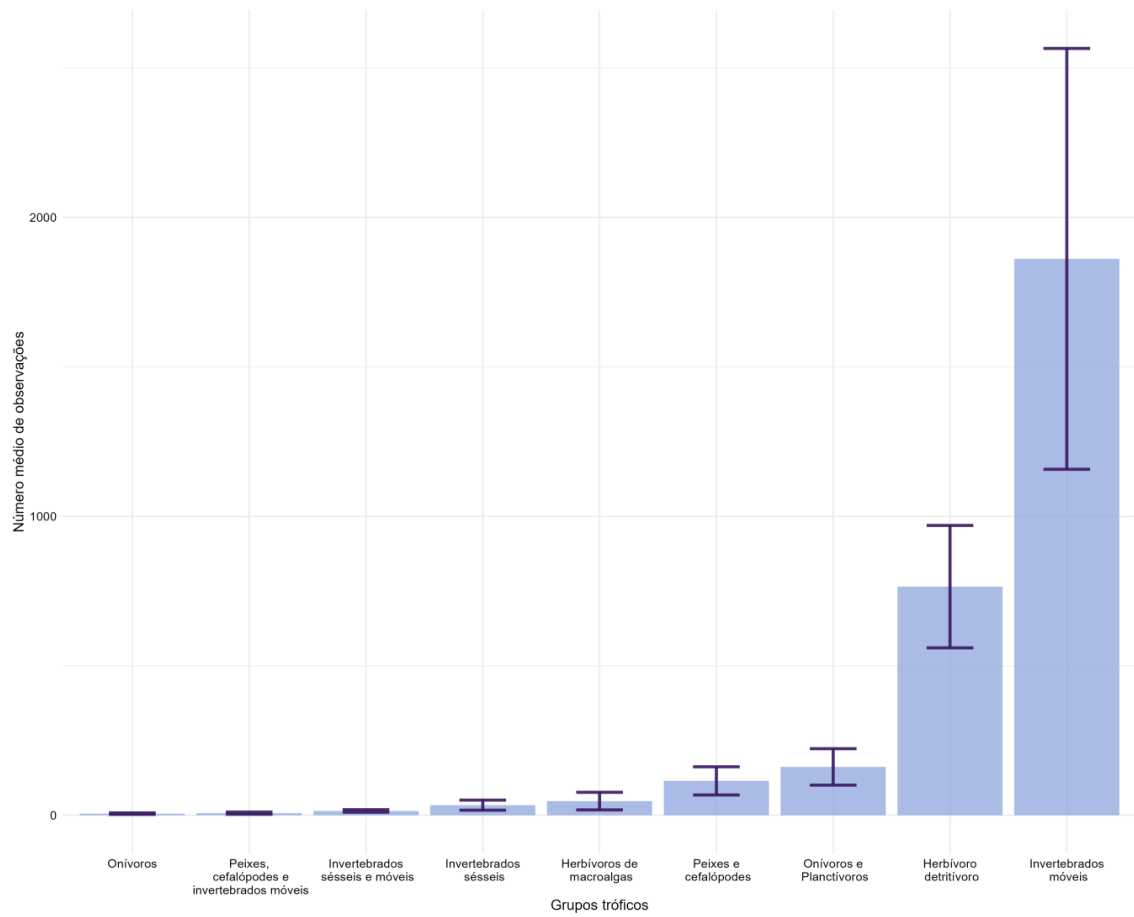


Figura 9. Número de observações por grupos tróficos. As barras representam os valores das médias das observações de cada grupo e os respectivos erros-padrão.

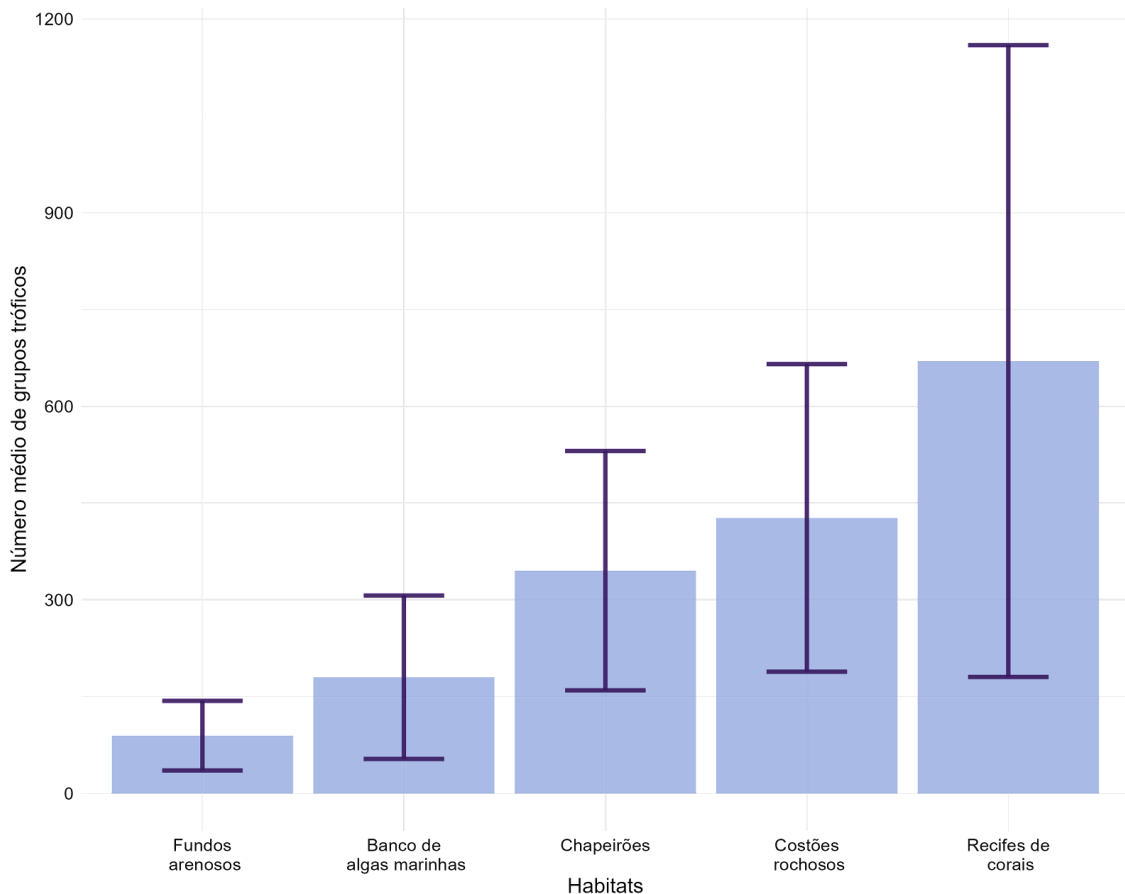


Figura 10. Número médio de grupos tróficos por tipo de habitat (fundos arenosos, banco de algas marinhas, chapeirões, costões rochosos e recifes de corais). As barras representam os valores das médias das observações do número de grupos tróficos e os respectivos erros-padrão.

3.3 Descrição Ambiental dos Habitats

Os habitats fundos arenosos e banco de algas marinhas apresentaram dissimilaridades em comparação com os habitats de costões rochosos, chapeirões e recifes de corais. Essas diferenças foram evidenciadas pelas características ambientais. Os fundos arenosos foram caracterizados pela presença de holothuroidea e areia, e os habitats de banco de algas marinhas foram caracterizados pelas pradarias, com maior presença de algas marinhas (Figura 11). Os recifes de corais foram caracterizados pela inclinação, rugosidade, recifes de corais e presença de cianobactérias. Todas essas variáveis citadas apresentaram alta contribuição na variabilidade ambiental (Figura 12). As dimensões 1 e 2 do gráfico apresentaram as maiores

porcentagens de variância explicada, com o eixo 1 apresentando porcentagem de 20,5% e o eixo 2 de 9% (Figura 13).

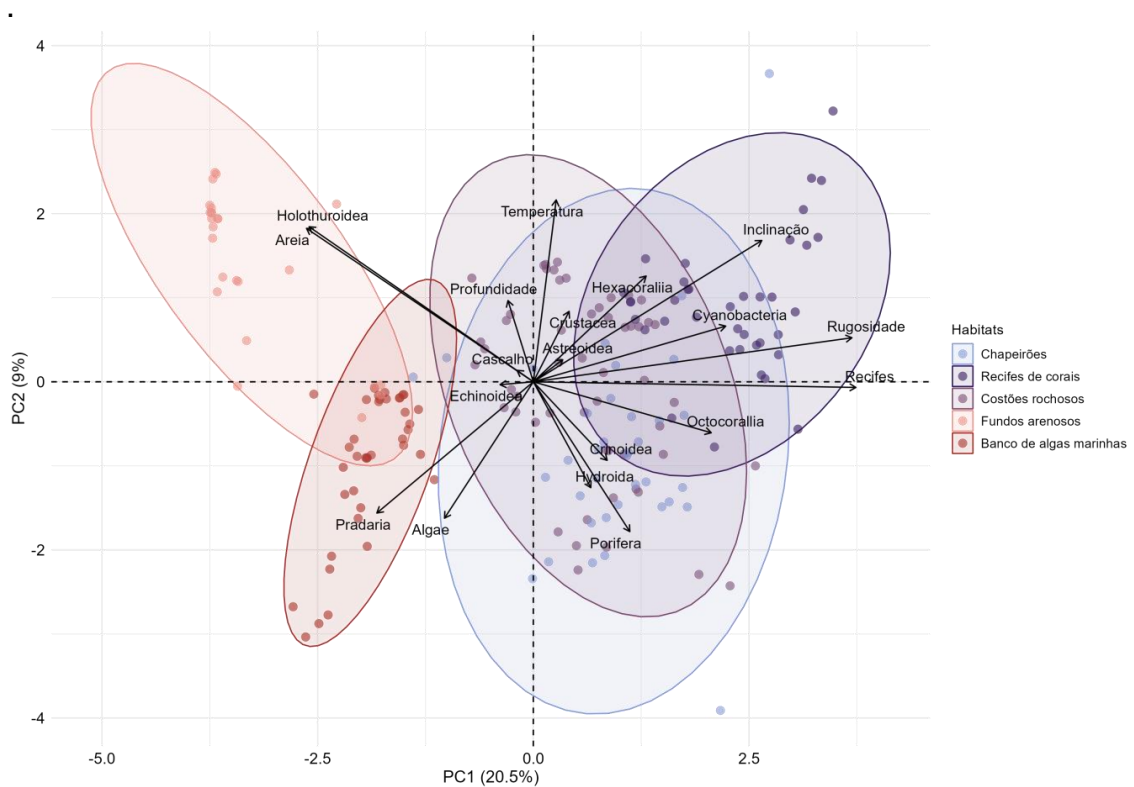


Figura 11. Gráfico da Análise de Componentes Principais (PCA) apresentando os grupos de habitats chapeirões, recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas e as variáveis ambientais que influenciam na caracterização cada habitat.

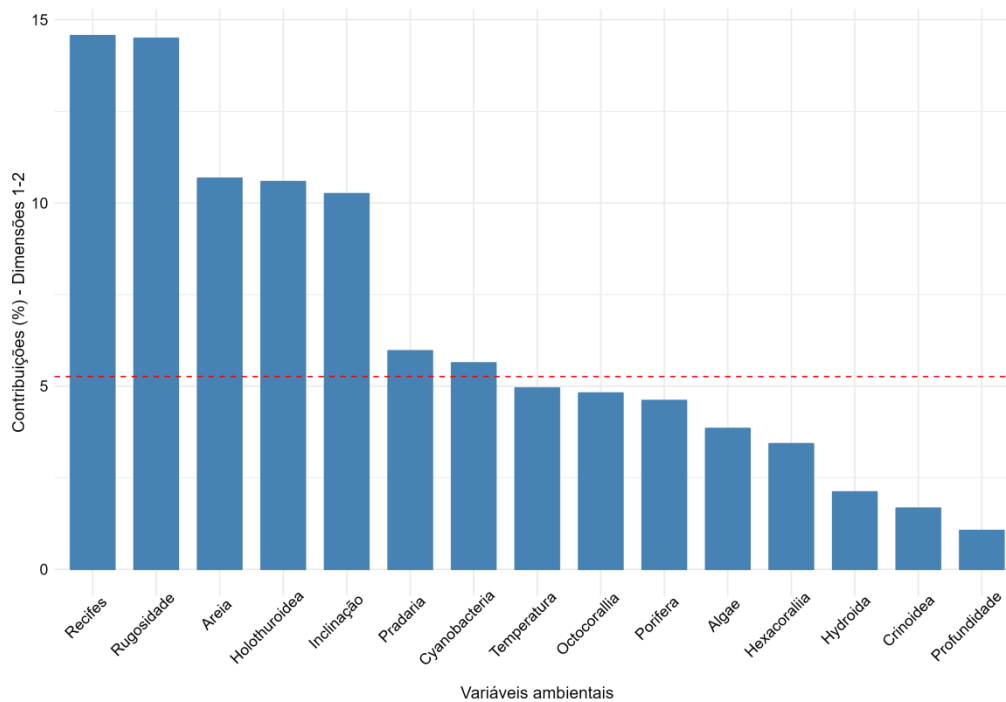


Figura 12. Porcentagens de contribuições de 15 variáveis ambientais para os eixos 1 e 2 da Análise de Componentes Principais (PCA).

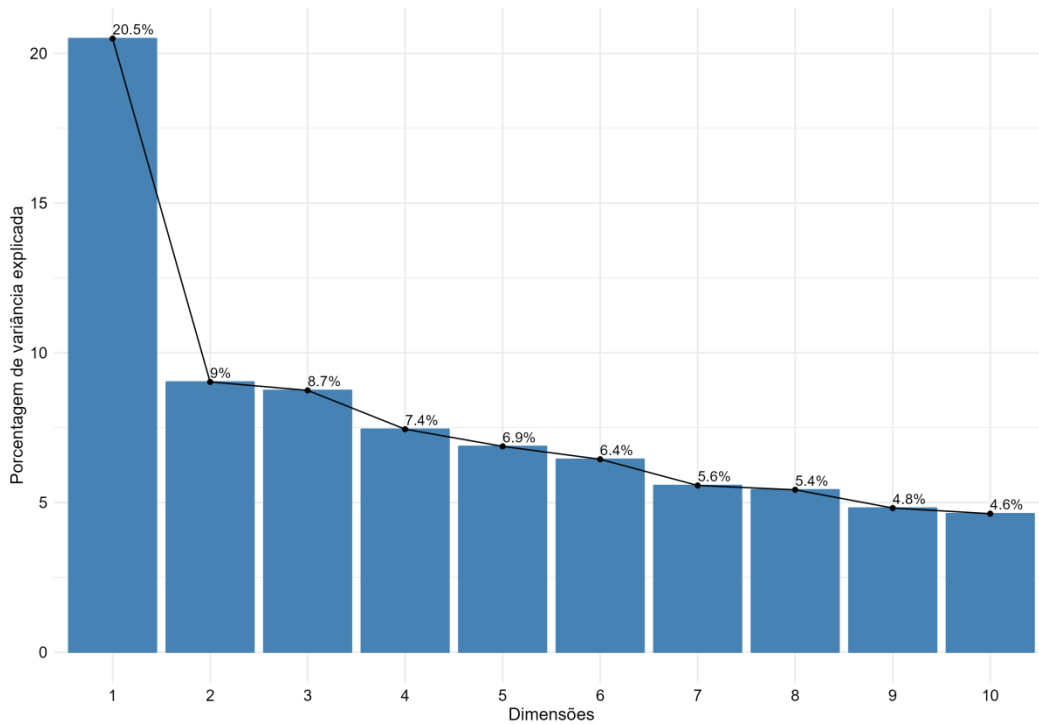


Figura 13. Dimensões (eixos) e porcentagem de variância explicada por cada um dos eixos para a Análise de Componentes Principais (PCA).

As variáveis ambientais que mais contribuíram na determinação para diferenças entre os grupos de habitats foram areia, pradarias, poríferas, inclinação e recifes de corais. As maiores contribuições foram das variáveis inclinação (74%), areia (63%) e pradaria (50%). A areia foi a variável que mais contribuiu na caracterização dos habitats de fundos arenosos, inclinação contribuiu para os habitats de chapeirões, costões rochosos e recifes de corais e a variável pradaria contribuiu na caracterização dos habitats de banco de algas marinhas (Figura 14).

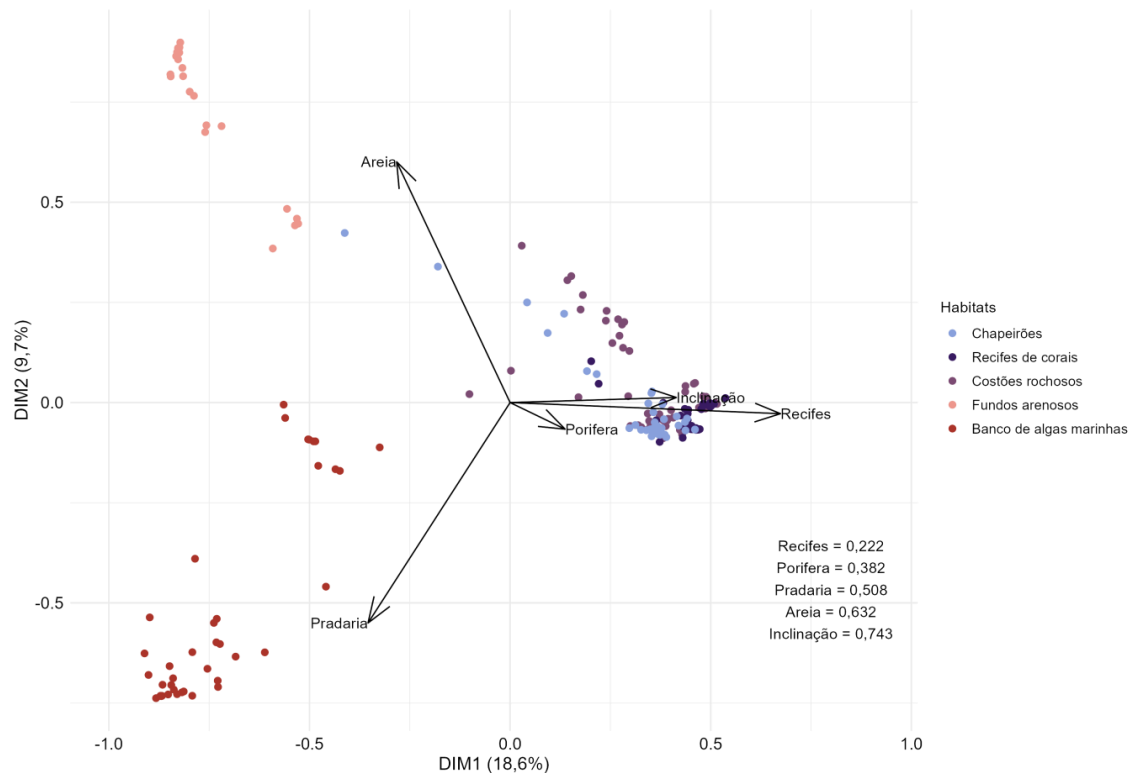


Figura 14. Gráfico da análise Análise de Porcentagens de Similaridades (SIMPER) com as contribuições de cada variável ambiental para formação dos grupos de habitats chapeirões, recifes de corais, costões rochosos, fundos arenosos e banco de algas marinhas.

4 Discussão

4.1 Diversidade de Habitats e Conectividade Ecológica

Neste estudo pioneiro, exploramos detalhadamente a paisagem marinha de Abrolhos em uma escala mais refinada. A área de estudo é de proteção integral dentro da unidade de conservação, revelou padrões intrigantes de distribuição, riqueza e diversidade em todos os habitats investigados. Embora os ecossistemas recifais se destaquem pela sua diversidade e papel fundamental na estruturação desses ambientes marinhos (Francini-Filho e Moura, 2008), nossas descobertas mostram que os habitats adjacentes desempenham um papel vital ao fornecer recursos essenciais para diversas espécies de peixes em várias fases de desenvolvimento. Estudos recentes têm ampliado essa compreensão, oferecendo análises valiosas sobre as complexas

interações entre espécies, populações e comunidades de peixes nos diversos habitats da região (Luiz et al., 2012; Moura et al., 2013).

O uso diversificado de habitats por diferentes espécies de peixes é um componente crítico para a manutenção da biodiversidade e o funcionamento dos ecossistemas marinhos (Nagelkerken et al., 2015). As famílias de peixes presentes em Abrolhos, como Pomacentridae, Acanthuridae, Haemulidae, Labridae, Lutjanidae e Serranidae, exploram uma variedade de habitats - desde os aqui estudados no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, como também manguezais e estuários - que utilizam essencialmente no desenvolvimento em diferentes fases de vida (Amaral, Jablonki e Costa, 2016; Asp, Fernandes e Costa, 2016).

A conectividade ecológica entre ambientes de fundo consolidado e fundo inconsolidado promove a circulação de organismos e a troca de indivíduos entre essas áreas, aumentando a diversidade e a resiliência das populações de peixes (Alves et al., 2017). Habitats em regiões mais afastadas, como os recifes de chapeirões, apresentam importante conectividade e contribuem em recursos para as assembleias de peixes comumente encontradas nos recifes em franja e costões rochosos do arquipélago (Mumby e Harborne, 1999). Com essa abordagem, é possível identificar áreas que são particularmente importantes para a biodiversidade dos peixes e, portanto, devem ser priorizadas para a conservação, podendo ainda ser utilizado como um parâmetro de ambiente saudável (Mumby e Harborne, 1999).

Os habitats de fundos arenosos, banco de algas marinhas, chapeirões, costões rochosos e recifes de corais, apresentaram diferenças significativas na composição de espécies. Essas diferenças de colonização de espécies também foram observadas por Bellwood et al. (2004), revelando o papel trófico da diversidade dos peixes marinhos e sua influência na estruturação das comunidades em diferentes habitats, destacando a importância dessas para ecologia marinha.

4.2 Dinâmica de Composição e Contribuição de Espécies nos Diferentes Habitats

As espécies *Halichoeres poeyi* e *Cryptotomus roseus*, foram os indivíduos mais frequentes nos habitats banco de algas marinhas e fundos arenoso. A identificação abundante de *Halichoeres poeyi* em Abrolhos é particularmente relevante, considerando que Ferreira et al. (2004) destacou essa espécie como uma das mais frequentes com ocorrência desde os Recifes Manuel Luiz (Maranhão) até Arvoredo (Santa Catarina). Com os resultados observados desta espécie é verificada a sua área de abrangência além dos limites inicialmente documentados por Ferreira et al. (2004). Essa nova abrangência destaca a importância de Abrolhos como um habitat propício para a espécie, mostrando a necessidade contínua de estudos aprofundados em ecossistemas recifais como este. Já *Cryptotomus roseus* possui ampla distribuição ao longo da costa brasileira corroborando com os achados (Gasparini et al., 2003). Ainda desempenha papel na cadeia alimentar como herbívoro, se alimentando de algas marinhas (Ferry-Graham et al., 2003), aumentando a resistência dos recifes de coral e servindo como fonte de alimento para os peixes quando estes estão sob estresse (Mumby et al., 2008).

Enquanto para os habitats de chapeirões, costões rochosos e recifes de corais o *Acanthurus chirurgus* apresentou a maior porcentagem de contribuição para descrição do habitat, seguido da espécie *Acanthurus coeruleus* e *Scarus trispinosus*. *Acanthurus chirurgus* e *Acanthurus coeruleus* de acordo Langeneck Langeneck, Marcelli e Simak (2012) e Weitzmann et al. (2015), está muito provavelmente relacionada com o comércio de peixes para aquarismo, o que torna uma provável explicação para a presença dessas espécies na costa brasileira. Em contrapartida o *Scarus trispinosus*, enfrentou declínios populacionais significativos em locais como Tamandaré, Guarapari e Arraial do Cabo devido à pressão humana através da pesca submarina (Ferreira et al., 2004).

As variáveis ambientais influenciaram na variabilidade da composição de espécies entre os habitats, principalmente a temperatura, profundidade, rugosidade e inclinação, assim como verificado no estudo Fernandes (2022)

cujas variáveis influenciaram em suma a estrutura das assembleias de peixes. Em relação aos chapeirões, recifes de corais e costões rochosos foi verificada uma maior diversidade e riqueza de espécies, enquanto nos bancos de algas marinhas seguido do habitat de fundos arenosos foi menor. Em outro trabalho foi verificada também a maior riqueza e abundância de peixes em áreas de habitats com fundo consolidado, como recifes de corais em franja, chapeirões e costões rochosos, onde há uma maior disponibilidade de habitats e recursos (Francini-Filho et al., 2020). Isto ocorre principalmente por esses ambientes oferecerem áreas de alimentação e reprodução, além de servirem como refúgio para os peixes durante períodos de alta turbulência e predação (Floeter et al., 2018), destacando-se a influência positiva desses ecossistemas na diversidade e na abundância de espécies de peixes associadas a esses habitats (Pereira et al., 2020).

4.3 Importância dos Fundos Submersos e a Complexidade da Conservação Marinha

Os dados obtidos neste estudo corroboram com as informações fornecidas por Silva et al. (2019), destacando o papel complementar dos fundos submersos vegetados por bancos de algas e dos fundos arenosos na composição das assembleias de peixes em Abrolhos. Estes habitats desempenham um papel fundamental, pois são frequentados por espécies bentônicas que servem como fonte de alimento para os peixes (Johansen, Bellwood e Fulton, 2008). Além disso, esses ambientes estão associados a espaços para os movimentos ontogenéticos das espécies de peixes, promovendo uma maior conectividade entre elas (Johansen, Bellwood e Fulton, 2008). Assim como na região de Abrolhos, que a presença e a diversidade desses habitats são essenciais para sustentar a riqueza e a estrutura das comunidades de peixes.

Entretanto, as diferenças observadas na composição e abundância das espécies em cada habitat destacam a necessidade de considerar a conservação e o manejo adequado de cada um desses habitats para garantir a preservação da biodiversidade e a sustentabilidade dos ecossistemas marinhos (Pauly et al., 2002; Estes et al., 2011).

As espécies ameaçadas pertencem a uma gama diversa de grupos tróficos, evidenciando a complexidade das redes alimentares marinhas e os efeitos em cascata que a perda de uma única espécie pode ter (IUCN, 2023; Estes et al., 2011). A pesca excessiva tem implicações diretas e indiretas na estrutura e função dos ecossistemas, afetando tanto as populações-alvo quanto as não-alvo (Jackson et al., 2001). Entre as espécies listadas, *Epinephelus itajara*, conhecida como mero, é um exemplo destacado. Como um grande predador de topo, a remoção da *E. itajara* de seus ecossistemas pode ter consequências de longo alcance na estrutura e função dos ecossistemas marinhos, uma vez que seu papel como um predador regulador é perdido (Heithaus et al., 2008).

Proteger a biodiversidade requer um enfoque multifacetado que vai além das listagens de conservação, sendo preciso proteger não apenas as espécies, mas também os habitats variados e intrincados que elas ocupam e que podem ser utilizados como trampolins. Muitas dessas espécies requerem uma variedade de habitats ao longo de suas vidas, tornando a proteção de diferentes habitats um elemento-chave da conservação (Mumby et al., 2004). Quando as populações de peixes em áreas protegidas crescem, elas podem transbordar, ou seja, indivíduos podem se mover para áreas adjacentes não protegidas, aumentando as possibilidades de recuperação dessas populações. Este "efeito de transbordamento" é um componente chave para a eficácia das áreas marinhas protegidas e para a gestão sustentável dos recursos pesqueiros (Halpern et al., 2010).

Com base nisso, é necessário promover um aumento de corredores de conservação entre os habitats recifais, considerando os habitats de banco de algas e fundos arenosos que fazem parte desse mosaico. Além disso, práticas de pesca sustentável com regulamentações, fiscalização e monitoramento adequados, incluindo tamanhos mínimos de captura, períodos de defeso e cotas de pesca são medidas importantes para proteger as populações de peixes, garantir a reprodução e promover o crescimento adequado das espécies (Moura et al., 2013).

Além de seu valor ecológico, muitas dessas espécies são comercialmente valiosas para o consumo humano e a aquariofilia. Isso pode levar a pressões de pesca adicionais, mas também pode fornecer um incentivo para a sua conservação que através da proteção de áreas críticas de reprodução e a regulamentação do comércio, pode ajudar a equilibrar os benefícios econômicos e a conservação (Pauly et al., 2002; Sadovy de Mitcheson & Liu, 2008).

5 Conclusão

Este estudo destaca a diversidade e complexidade dos habitats em Abrolhos e a importância de considerar diferentes ambientes na conservação marinha. Os resultados sugerem que a preservação de habitats como fundos arenosos e banco de algas marinhas é crucial para manter a conectividade ecológica e a diversidade de espécies. A influência das variáveis ambientais na composição de espécies destaca a sensibilidade dos peixes a fatores como as características do substrato e os principais recursos oferecidos.

A diversidade beta total ressalta a interdependência entre os habitats, indicando que medidas de conservação devem abranger uma variedade de ambientes para promover a sustentabilidade das populações de peixes. A diversidade de grupos tróficos revela a importância funcional dos diferentes habitats na manutenção das redes alimentares marinhas. Embora haja diferenças na composição de espécies, a diversidade funcional permanece relativamente consistente entre os habitats. A partir dessas análises é possível destacar características únicas de cada habitat, enfatizando a necessidade de uma abordagem integrada na gestão marinha. A criação de corredores de conservação e práticas de pesca sustentável são medidas cruciais para garantir a preservação da biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas marinhos em Abrolhos e áreas que apresentam diversidade de habitats distribuídas ao longo da paisagem marinha.

Agradecimentos

Os autores agradecem a Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado da Bahia (FAPESB) e ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pelo suporte financeiro para realização desse estudo pelas bolsas de

doutorado e de produtividade dos primeiro e últimos autores, respectivamente. Agradecimentos também ao programa de Pós-Graduação em Ecologia e Conservação da Biodiversidade (PPGECB) da Universidade Estadual de Santa Cruz (UESC), ao projeto Budiões do Instituto Nautilus de Pesquisa e Conservação da Biodiversidade (INPCB) e a Rede Rio Doce Mar (RRDM).

6 Referências

- Alves, N. M. S. et al. (2017). Mudanças no cotidiano das comunidades tradicionais pesqueiras de Brejo Grande–Sergipe, Brasil. *Revista Geo Nordeste*, 1(1), 187-202.
- Amaral, F. D., Jablonski, S., & Costa, M. F. (2016). Ecological connectivity between estuarine and marine habitats: Insights from tropical Brazil using otolith elemental fingerprints. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 173, 60-68.
- Asp, N. E., Fernandes, C. E., & Costa, M. F. (2016). Mangroves and seagrass beds in the Abrolhos Bank as an option for blue carbon. *Braz. J. Oceanogr*, 64(4), 381-394.
- Auguie, B. (2017). gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics. <https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>.
- Baselga, A. et al. (2023). Betapart: Partitioning Beta Diversity into Turnover and Nestedness Components. <https://CRAN.R-project.org/package=betapart>.
- Bastos, A. C. et al. (2013). Buracas: Novel and unusual sinkhole-like features in the Abrolhos Bank. *Continental Shelf Research*, 1-8. doi:10.1016/j.csr.2013.04.035
- Beck, M. W. et al. (2001). The identification, conservation, and management of estuarine and marine nurseries for fish and invertebrates. *Bioscience*, 51(8), 633-641.
- Beck, Marcus W. (2022). Ggord: Ordination Plots with Ggplot2.
- Bellwood, D. R. et al. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature*, 429(6994), 827-833.
- Boström, C., et al. (2011). Seascape ecology of coastal biogenic habitats: advances, gaps, and challenges. *Marine Ecology Progress Series*, 427, 191-217.
- Cardinale, B. J. et al. (2012). Biodiversity improves water quality through niche partitioning. *Nature*, 472(7341), 86-89.
- Carr, M. H. et al. (2017). Comparing marine and terrestrial ecosystems: implications for the design of coastal marine reserves. *Ecological Applications*, 10(2), 999-1019.

- Cavalcanti, G. S. et al. (2013). Sinkholes-like structures as bioproductivity hotspots in the Abrolhos Bank. *Continental Shelf Research*, 70(1), 126-134.
- Cowen, R. K. et al. (2000). Larval dispersal and marine population connectivity. *Annual Review of Marine Science*, 1, 443-466.
- Dias, G. M. et al. (2021). Conservation of Brazilian marine fishes: a review of the current status and challenges. *Biodiversity and Conservation*, 30(4), 1231-1250.
- Environmental Systems Research Institute (ESRI). (2014). "ArcGIS Desktop: Release 10.3." ESRI. <https://desktop.arcgis.com/en/system-requirements/latest/arcgis-desktop-system-requirements.htm>
- ESA - European Space Agency. Sentinel-2 Online. (2017). Sentinel-2 MSI Technical Guide. Disponível em: ESA - European Space Agency. Sentinel-2 Online. Sentinel-2 MSI Technical Guide. Disponível em: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/missions/sentinel-2>.
- Estes J. A. et al. (2011) Trophic Downgrading of Planet Earth. *Science*. 333(6040):301–306.
- Fauth, J. E. et al. (1996). Simplifying the jargon of community ecology: a conceptual approach. *The American Naturalist*, 147(2), 282-286.
- Feitosa, C. V. et al. (2023). The functional role of herbivorous fish in structuring benthic communities on tropical coral reefs. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 547, 151834.
- Félix-Hackradt, F.C. *et al.* (2014). Habitat use and ontogenetic shifts of fish life stages at rocky reefs in South-western Mediterranean Sea. *Journal Of Sea Research*, [S.L.], v. 88, p. 67-77, abr. 2014. Elsevier BV. <http://dx.doi.org/10.1016/j.seares.2013.12.018>.
- Fernandes, M. G. (2022). Estrutura das assembleias de peixes em recifes subtropicais do Atlântico Sudoeste: diferenças entre ecossistemas rasos e mesofóticos e a influência das características do habitat. Dissertação (Mestrado em Biodiversidade Marinha e Costeira) - Instituto do Mar, Universidade Federal de São Paulo, Santos, p.58.
- Ferreira, C. E. L. et al. (2004). Trophic Structure Patterns Of Brazilian Reef Fishes: A Latitudinal Comparison. *Journal of Biogeography*, 31(7), 1093–1106.
- Ferry-Graham, L.A. et al. (2003). Prey-capture behavior in two species of corallivorous fishes: intraspecific variation in pursuit of evasive prey. *Environmental Biology of Fishes*, 67(3), 295-303.
- Floeter, S. R. et al. (2018) Phylogenetic perspectives on reef fish functional traits. *Biological Reviews*, 93(1), 131-151.

- Fox, John, and Sanford Weisberg. (2019). *An R Companion to Applied Regression*. Third. Thousand Oaks CA: Sage.
<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>.
- Francini-Filho, R. B., & Moura, R. L. (2008). Dynamics of fish assemblages on coral reefs subjected to different management regimes in the Abrolhos Bank, eastern Brazil. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(7), 1166-1179.
- Francini-Filho, R. B., Ferreira, C. M., Rodrigues, A. S., & Ferreira, B. P. (2020). Marine conservation in Brazil: The case of the Abrolhos Bank. *Marine Policy*, 120, 104129.
- Gasparini, J.L., Floeter, S.R. & Joyeux, J.C. (2003) *sparisoma tuiupiranga*, a new species of parrotfish (Perciformes: Labroidae: Scaridae) from Brazil, with comments on the evolution of the genus. *Zootaxa*, 384, 1–14.
- Gilby, B. L. et al. (2018). Tropical dead zones and mass mortalities on coral reefs. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 115(45), 11700-11705.
- Gillis, L. G. et al. (2017). Seascape ecology of Caribbean coral reefs. In: Pittman, S. J. (Ed.). *Caribbean coral reefs: An introduction*. University Press of Florida, 1-493.
- Grabowski, J. H. et al. (2022). The functional roles of habitat types vary across geographical regions in marine ecosystems. *Ecology Letters*, 25(1), 147-156.
- Halpern, B. S. et al. (2019). An index to assess the health and benefits of the global ocean. *Nature*, 488(7413), 615-620.
- Halpern, B. S., et al. (2010). Placing marine protected areas onto the ecosystem-based management seascape. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 107(43), 18312-18317.
- Hartig, F. (2022). DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level / Mixed) Regression Models. <https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>.
- Heithaus, M. R. et al. (2008) Predicting Ecological Consequences of Marine Top Predator Declines. *Trends in Ecology & Evolution*. 23(4):202-210.
- Hughes, T. P. et al. (2018). Global warming impairs stock–recruitment dynamics of corals. *Nature*, 568(7752), 387-390.
- Irlandi, E. A., & Peterson, C. H. (1994). Catastrophic habitat destruction in intertidal marine communities due to a single outbreak of wrack-rafting macroalgae. *The American Naturalist*, 144(6), 873-889.
- IUCN Red List. (2023) Disponível em: <https://www.iucnredlist.org/>. Acesso em julho de 2023.
- Jackson, J. B. C. et al. (2001) Historical Overfishing and the Recent Collapse of Coastal Ecosystems. *Science*. 293(5530):629–638.

Johansen, J. L., Bellwood, D. R. & Fulton, C. J. (2008). Coral reef fishes exploit flow refuges in high-flow habitats. *Mar Ecol-Prog Ser* 360, 219-226

Kassambara, A. & Mundt, F. (2020). Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. <https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>.

Langeneck, J., Marcelli, M. & Simak, H. C. (2012). Unexpected alien species in Cyprus waters: *Acanthurus coeruleus* (Actinopterygii: Acanthuridae). *Marine Biodiversity Records*, 5(1), 1-3.

Lê, S. Josse, J. & Husson, F. (2008). "FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis." *Journal of Statistical Software* 25 (1): 1–18. <https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>.

Leão, Z. M. A. N., Kikuchi, R. K. P. & Testa, V. (2003). Corals and coral reefs of Brazil. *Coral Reefs*. Elsevier Science, Amsterdam, 9-52.

Lüdecke, D. et al. (2021). "performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models." *Journal of Open Source Software* 6 (60): 3139. <https://doi.org/10.21105/joss.03139>.

Luiz, O. J. et al. (2012). Ecological traits influencing range expansion across large oceanic dispersal barriers: insights from tropical Atlantic reef fishes. *Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences*, 279(1739), 1033-1040.

Lyzenga, D. (1978). *Appl. Optics*, 17, 379.

Minte-Vera, C. V. et al. (2018). Nested sampling: An improved visual-census technique for studying reef fish assemblages. *Mar. Ecol. Prog. Ser.*, 367(1), 283-293.

Moura, R. L. et al. (2013). Benthic megahabitats of the Abrolhos bank shelf: spatial patterns and conservation planning. *Continental Shelf Research*, 70(1), 109-117.

Mumby, P. J. et al. (2004) Mangroves enhance the biomass of coral reef fish communities in the Caribbean. *Nature*, 427(1), 533–536.

Mumby, P. J., et al. (2008). Coral reef habitats as surrogates of species, ecological functions, and ecosystem services. *Conservation Biology*, 22(4), 941-951.

Mumby, P.J. & Harborne, A.R. (1999). Development of a systematic classification scheme of marine habitats to facilitate regional management and mapping of Caribbean coral reefs. *Biological Conservation*, 88(1), 155- 163.

Nagelkerken, I., et al. (2015). Global alteration of ocean ecosystem functioning due to increasing human CO₂ emissions. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 112(43), 13272-13277.

Nagelkerken, I. et al. (2000). The habitat function of mangroves for terrestrial and marine fauna: A review. *Aquatic Botany*, 89(2), 155-185.

Oksanen, J. et al. (2022). *Vegan: Community Ecology Package*. <https://CRAN.R-project.org/package=vegan>.

Olds, A. D. et al. (2012). Marine reserves help coastal ecosystems cope with extreme weather. *Global Change Biology*, 18(10), 2822-2831.

Pauly, D. et al. (2002) Towards sustainability in world fisheries. *Nature*. 418:689–695.

Pereira, L. B, et al. (2020) Feeding ecology of two subspecies of bottlenose dolphin: a tooth tale. *Aquatic Ecology*, 54(1), 941-955. <https://doi.org/10.1007/s10452-020-09785-7>

Perry, C. T. et al. (2010). The ecology of mesophotic coral ecosystems. *Marine Ecology Progress Series*, 22, 275-302.

Pittman, S. J., Hile, S. D., & Jeffrey, C. F. (2021). Seascape ecology in tropical marine environments. In *Tropical Marine Ecosystems: Advances in Ecology, Conservation, and Management*. Springer, Cham, 205-230.

Portela, C. F. T. (2020). "Avaliações de altas doses em pequenos campos utilizando filmes radiocrômicos" [recurso eletrônico]. *Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Minas Gerais, Escola de Engenharia*, 1-72.

Previero, M. & Gasalla, M. A. (2018). Mapping fishing grounds, resource and fleet patterns to enhance management units in data-poor fisheries: the case of snappers and groupers in the abrolhos bank coral-reefs (south atlantic). *Ocean & Coastal Management*, 154(1), 83-95.

Quensen, J., Simpson, G. & Oksanen, J. (2023). *Ggordiplots: Make 'Ggplot2' Versions of Vegan's Ordplots*. <https://CRAN.R-project.org/package=ggordiplots>.

Sadovy de Mitcheson Y, Liu M. (2008) Functional hermaphroditism in teleosts. *Fish and Fisheries*. 9(1):1-43.

Sampaio, C. L. S. et al. (2009). Guia de identificação ilustrado das espécies de peixes endêmicas e ameaçadas das ilhas oceânicas brasileiras e do banco dos Abrolhos. In: Mohr, L. V. et al. (Org.). *Ilhas Oceânicas Brasileiras: da pesquisa ao manejo*. Brasília: MMA, 2(1), 164-198.

Silva, G. C. M. et al. (2017). Application of ALOS AVNIR-2 for the detection of seaweed and seagrass beds on the northeast of Brazil. *International Journal of Remote Sensing*, 38(3), 662–678.

<https://doi.org/10.1080/01431161.2016.1268738>

Teixeira, J. B., Silva, F. F., & Costa, M. R. (2019). Integrated management of coastal ecosystems: the importance of developing research on Brazilian marine biodiversity. *Biota Neotropica*, 19(2). doi: 10.1590/1676-0611-BN-2019-0593.

Thompson, D. M. et al. (2018). Soundscapes shape larval fish nurseries. *Science Advances*, 4(1), eaao1758.

Tierney, N. (2017). "Visdat: Visualising Whole Data Frames." *JOSS* 2 (16): 355. <https://doi.org/10.21105/joss.00355>.

Venables, W. N., and B. D. Ripley. (2002). *Modern Applied Statistics with s*. Fourth. New York: Springer. <https://www.stats.ox.ac.uk/pub/MASS4/>.

Weitzmann, B. et al (2015). First sighting of *Zebrasoma flavescens* (Teleostei: Acanthuridae) and *Balistoides conspicillum* (Teleostei: Balistidae) in the Mediterranean Sea: two likely aquarium releases. *Mediterranean Marine Science*, 16(1), 147–150.

Wickham, H. et al. (2019). "Welcome to the tidyverse." *Journal of Open Source Software* 4 (43): 1686. <https://doi.org/10.21105/joss.01686>.

Wickham, H. (2016). *Ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York. <https://ggplot2.tidyverse.org>.

Capítulo 3

A Importância dos Bancos de Rodólitos para a Biodiversidade de Peixes no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos



Autores: Inaiara Sousa Siqueira da Silva, Alexandre Schiavetti, Carlos Werner Hackradt

Revista: Fish and Fisheries

Fator de impacto: 6.7

Qualis CAPES: A1

A Importância dos Bancos de Rodolitos para a Biodiversidade de Peixes no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos

Resumo

Os rodolitos, formados por algas coralináceas, contribuem para a produção de carbonato de cálcio nos oceanos e desempenham um papel crucial na estabilização dos sedimentos, proporcionando abrigo e alimento para várias espécies de peixes. Este estudo investigou a importância dos bancos de rodolitos na biodiversidade de peixes marinhos no Parque Marinho de Abrolhos. Os resultados indicaram que os bancos de rodolitos representam um megahabitat intermediário em relação a fundos consolidados e inconsolidados, tanto em termos de características ambientais quanto de composição de espécies. Embora os megahabitats de fundo consolidado tenham a maior diversidade alfa, os bancos de rodolitos mostraram uma biomassa significativamente superior, sugerindo adaptações específicas dos peixes a esses ambientes. As análises destacaram a importância de variáveis como temperatura, visibilidade, profundidade e tipos de substrato na distribuição das espécies. Esses resultados ressaltam a necessidade de considerar a heterogeneidade do habitat na gestão da conservação marinha, enfatizando a importância de proteger uma variedade de habitats, incluindo rodolitos, para preservar a diversidade das comunidades de peixes recifais.

Palavras-chave: Diversidade de peixes, ecossistemas marinhos, Rodolitos, Megahabitats, Parque Marinho de Abrolhos.

The Importance of Rhodolith Beds for Fish Biodiversity in the Abrolhos Marine National Park

Abstract

Rhodoliths, formed by coralline algae, contribute to calcium carbonate production in oceans and play a crucial role in stabilizing sediments, providing shelter and food for various fish species. This study investigated the importance

of rhodolith beds in the marine fish biodiversity of the Abrolhos Marine Park. Results indicated that rhodolith beds represent an intermediate megahabitat compared to consolidated and unconsolidated bottoms, both in terms of environmental characteristics and species composition. While consolidated bottom megahabitats showed the highest alpha diversity, rhodolith beds exhibited significantly higher biomass, suggesting specific fish adaptations to these environments. Analyses highlighted the importance of variables such as temperature, visibility, depth, and substrate types in species distribution. These findings emphasize the need to consider habitat heterogeneity in marine conservation management, underscoring the importance of protecting a variety of habitats, including rhodoliths, to preserve the diversity of reef fish communities.

Keywords: Fish diversity, marine ecosystems, Rhodoliths, Megahabitats, Abrolhos Marine Park.

1. Introdução

Os bancos de rodolitos, também conhecidos como algas calcárias, são habitats submarinos formados por algas vermelhas coralináceas, que geram uma estrutura calcária com formato esferoidal (Bosence, 1983; Bosellini, Ginsburg e Rosen, 1999; Foster, 2001). Eles são importantes contribuintes para a produção de carbonato de cálcio nos oceanos (Adey, 1978) e promovem a estabilização dos sedimentos no leito marinho, diminuindo a turbidez da água e melhorando a qualidade do habitat para diversas espécies (Foster, 2001; Steller et al., 2003).

A estrutura do habitat e a quantidade de luz que atinge o fundo têm uma relação direta com a diversidade de peixes presentes nesses ecossistemas (Steller e Foster, 1995; Foster, 2001). A disponibilidade de abrigo e alimento nos rodolitos atrai várias espécies de peixes, tornando esses habitats cruciais para a sobrevivência e reprodução de muitas espécies, incluindo algumas ameaçadas (Araújo, 2016).

Os rodolitos são colonizados por uma variedade de pequenos invertebrados e algas, que fornecem uma rica fonte de alimento para peixes de diferentes tamanhos e dietas (Nelson, 2009). Estes bancos são um megahabitat da costa brasileira com alta riqueza de espécies e contribui fortemente com a biodiversidade da região de Abrolhos (Foster, 2001). São fundamentais para a riqueza de peixes marinhos. Logo é essencial que esses ecossistemas sejam incluídos em planos de ordenamento espacial, licenciamento e manejo pesqueiro (Foster, 2001; Fonseca et al., 2019). Isso ressalta a necessidade de maior atenção e proteção para esses ambientes, especialmente considerando as crescentes ameaças decorrentes das atividades humanas que ocorrem nesses habitats (Fonseca et al., 2019).

Dentre as atividades humanas e suas consequências nesses ecossistemas são comuns a mineração de carbonatos, exploração de petróleo e gás (e a possível poluição por metais pesados) e pesca de arrasto (Grigg, 2006; Teichert, 2014). Estas atividades podem ter um impacto sinérgico sobre os bancos de rodolitos, como por exemplo, a pesca de arrasto envolve arrastar redes pesadas pelo fundo do mar, o que pode danificar ou destruir os bancos de rodolitos (Teichert, 2014). Além disso, essas atividades podem levar à ressuspensão de sedimentos, podendo sufocar os rodolitos e interromper a fotossíntese (Jones et al., 2014).

As mudanças climáticas também têm um impacto significativo nos bancos de rodolitos, como exemplo, Kamenos et al. (2013) afirmam que a acidificação dos oceanos, em consequência direta do aumento das emissões de CO², pode dificultar a capacidade das algas coralináceas de se formarem e manterem os rodolitos. À medida que o pH do oceano diminui, torna-se mais difícil para essas algas formarem os esqueletos de carbonato de cálcio que compõem os rodolitos (Kamenos et al., 2013). O aumento das temperaturas do oceano, outra consequência das mudanças climáticas, também pode afetar os bancos de rodolitos. Tendo em vista que as algas coralináceas são sensíveis ao aumento das temperaturas do oceano, e a potencial elevação térmica pode afetar negativamente a saúde e diversidade dessas algas (McCoy e Kamenos, 2015).

Devido à tantas pressões, há uma real necessidade de atualizações de planejamento espacial integrado para a conservação marinha, incluindo a criação de áreas marinhas protegidas (AMPs) representativas que cubram os diferentes megahabitats (Oliveira et al., 2020). Até o momento, as AMPs existentes não cobrem de forma adequada os principais megahabitats do Banco de Abrolhos, limitando sua efetividade na conservação da biodiversidade.

O objetivo deste estudo foi testar a importância dos bancos de rodólitos para a biodiversidade de peixes marinhos no Parque Marinho de Abrolhos, investigando a composição de espécies nos bancos de rodólitos e comparando-a com outros megahabitats na unidade de conservação, conforme estabelecido por Moura et al. (2013). Este estudo buscou testar essa visão abrangente, considerando a composição de espécies de peixes nos bancos de rodólitos em relação aos demais megahabitats da região. Além disso, foi realizado dentro da unidade de conservação onde o fator pesca não foi considerado.

2. Materiais e métodos

a. Área de estudo

O Banco dos Abrolhos, localizado na costa brasileira, é uma área de grande importância para investigar a relação entre os bancos de rodólitos e a biodiversidade de peixes marinhos (Foster, 2001). A unidade de conservação abrange um arquipélago composto por cinco ilhas principais: Ilha de Santa Bárbara, Redonda, Siriba, Sueste e Guarita. Além disso, a área marinha inclui duas porções descontínuas: o arquipélago e Timbebas, situado no sul do estado da Bahia (Leão, 1999). É reconhecido como um dos ecossistemas mais biodiversos e produtivos do Oceano Atlântico Sul (Leão, 1999; Giglio, Luiz e Schiavetti, 2016).

Os bancos de rodólitos em Abrolhos pode ser o maior banco contínuo de rodólitos do mundo (Amado-Filho et al., 2012). Estão situados em profundidades entre 25 e 90 metros (Moura et al., 2013). A deposição contínua

de carbonato de cálcio pelas algas coralináceas ao longo de milênios resultou na formação dos grandes bancos de rodolitos encontrados na região (Figueiredo et al., 2014).

É possível visualizar na Figura 1 o Mapa de Localização da Área de Estudo, focando na Região do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, situado na costa leste do Brasil, no estado da Bahia. Essa área é de extrema importância em termos de biodiversidade marinha e conservação, sendo reconhecida como uma das regiões mais ricas em recifes de corais do Atlântico Sul (Foster, 2001).

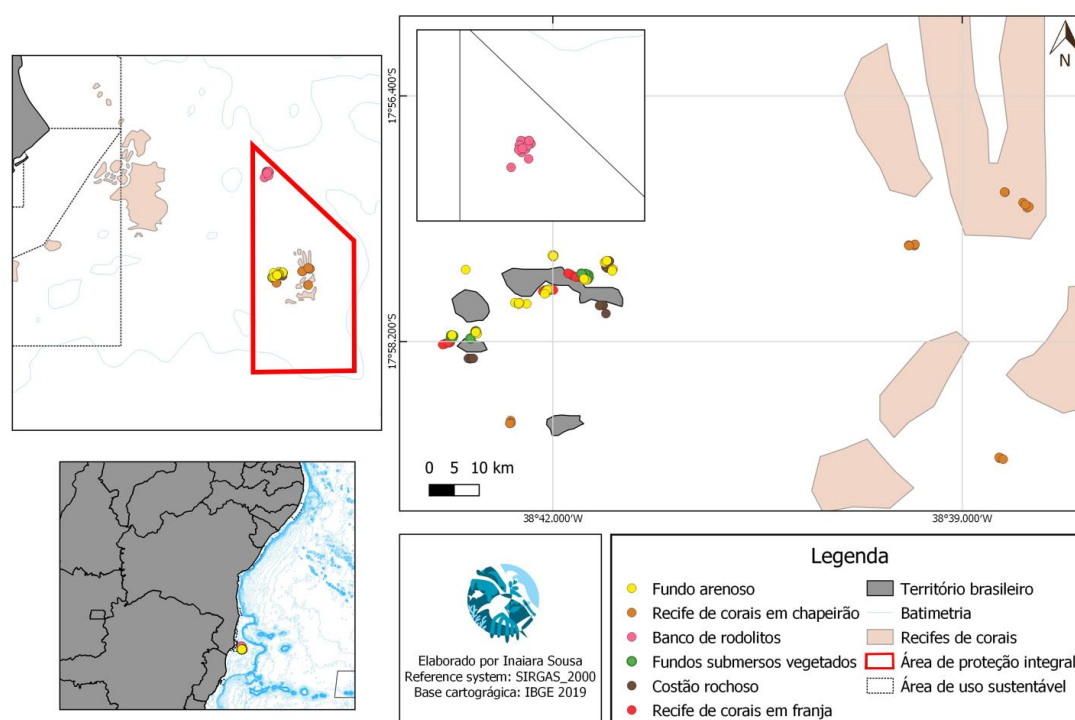


Figura 1: Mapa de localização da área de estudo. Região do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (Bahia), costa leste do Brasil, com destaque para os pontos amostrais.

2.2 Coleta de dados

Foram estabelecidos pontos amostrais nos principais habitats do fundo marinho do Parque Marinho de Abrolhos, incluindo fundo consolidado (recifes em chapeirões, recifes em franja e costões rochosos), fundo inconsolidado (bancos de algas marinhas e fundos arenosos) e o banco de rodolitos. As coletas de dados foram realizadas entre os anos de 2019 e 2021, por meio de mergulho autônomo (SCUBA), utilizando métodos padronizados de censo

visual subaquático (UVC) para caracterização das assembleias de peixes. Além disso, foram realizados fotoquadrados 15 X 17 centímetros para avaliar a porcentagem de cobertura bentônica (adaptado de Leão et al., 2015).

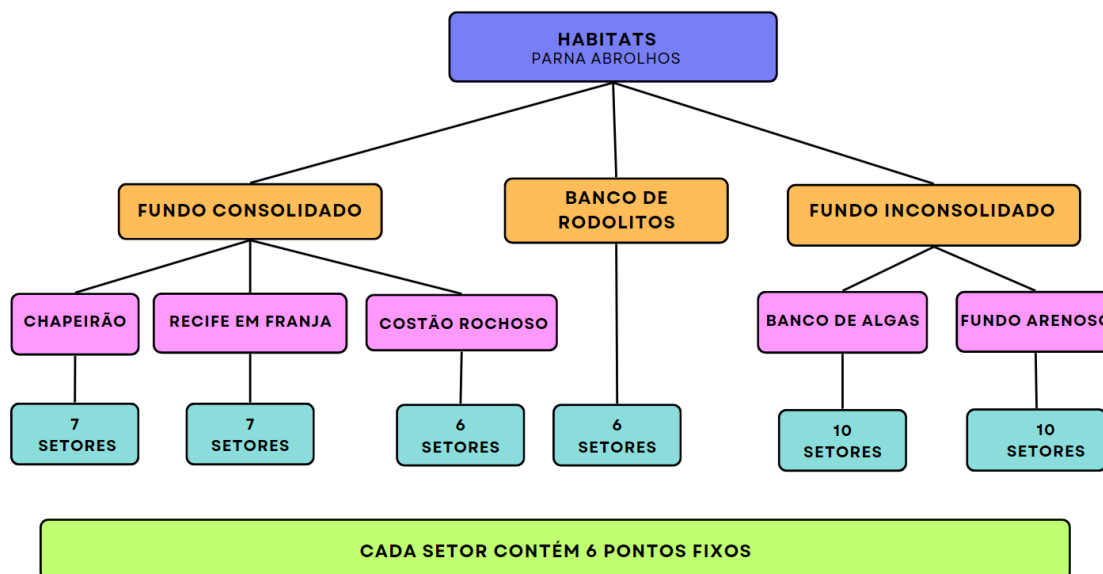


Figura 2: Desenho amostral das coletas de censo visual (UVC), fotoquadrado para estimativa de cobertura bentônica e georreferenciamento no PARNA Abrolhos entre os megahabitats de fundo consolidado, fundo inconsolidado e banco de rodolitos.

O censo visual de peixes foi a técnica utilizada para avaliar a riqueza, abundância, diversidade e biomassa das espécies de peixes (Harmelin, 1987, García-Charton e Pérez-Ruzafa 2001). Neste estudo utilizamos o método estacionário considerando um ponto fixo com observância em um raio de 2 metros (peixes < 20cm) e 4 metros (peixes > 20cm) (Minte-Vera, Moura e Francin-Filho et al., 2008).

Também foram consideradas as condições ambientais, tais como: a) Heterogeneidade – Tipo de substrato (estimando visualmente a % de rocha, % de areia; % de cascalho); b) estimativa visual da rugosidade (1 a 4, sendo 1 o terreno liso, e 4 o mais rugoso e alto possível); c) inclinação do terreno (em escala visual: 0° - 30°, 30° - 60°, 60° - 90°) (Félix-Hackradt et al. 2014); d) profundidade e temperatura da água de fundo; e) Cobertura bentônica (fotoquadrados em dois pontos dentro do raio do censo visual para serem analisados em porcentagem, *a posteriori*, pelo software CPCe (Laney, 2003).

2.3 Análise de dados

Para avaliar e comparar a diversidade alfa (ordens 0, 1 e 2) e abundância de peixes entre os grupos de megahabitats consolidados, inconsolidados e banco de rodolitos, foi feita a Análise de Variância Permutacional Multivariada de Variância (PERMANOVA). Da mesma forma, para avaliar a biomassa e comprimento total de peixes entre os grupos de megahabitats, foi utilizada a PERMANOVA, devido à correlação entre as variáveis diversidade alfa e abundância, e entre as variáveis biomassa e comprimento total. Os pacotes utilizados foram o *entropart* (Marcon e Hérault, 2015), para calcular as diversidades alfa, e o pacote *vegan* (Oksanen et al., 2022) para calcular a análise PERMANOVA.

A descrição dos megahabitats com as variáveis ambientais, incluindo temperatura, visibilidade, profundidade, rugosidade, inclinação, recifes de corais, areia, cascalho, pradarias, presença de algas, holothuroidea, crustacea, asteroidea, echinoidea, crinoidea, esponja, turfa, cianobactérias, corais negros, corais pétreos, octocorais e hidroide, foi realizada para compreender a formação dos grupos de megahabitats. Para isso, foi utilizada a Análise dos Componentes Principais (PCA) com os pacotes *FactoMineR* (Lê, Josse e Husson, 2008) e *factoextra* (Kassambara e Mundt, 2020). Foram verificadas as porcentagens de variância explicada para cada eixo e a contribuição das variáveis ambientais para os eixos significativos. Outros pacotes usados para essas análises foram o *vegan* (Oksanen et al., 2022) e o *missMDA* (Josse e Husson, 2016) para imputação de dados faltantes. Além disso, o pacote *ggordiplots* (Quensen, Simpson e Oksanen, 2023) foi usado para gerar os gráficos.

Foram calculadas as diversidades beta por substituição, por aninhamento e total, além das diversidades alfa de Shannon e Simpson para cada habitat (recifes de corais, chapeirões, costões rochosos, banco de rodolitos, fundos arenosos e banco de algas marinhas) presentes nos megahabitats. Para essas análises, foram utilizados os pacotes *vegan* (Oksanen et al., 2022) e *betapart* (Baselga et al., 2023).

Para entender como as variáveis ambientais influenciam na composição de espécies entre os megahabitats, foi empregada a Análise de Redundância

(RDA). Posteriormente, a Análise de Variância da Correspondência Canônica (ANOVA – CCA) foi usada para verificar a significância dos eixos na representação da relação entre as variáveis preditoras e a composição de espécies, assim como identificar as variáveis ambientais significativas que mais contribuíram na composição de espécies. Os pacotes usados para a análise RDA e para os gráficos foram *vegan* (Oksanen et al., 2022) e *ggord* (Beck, 2022), respectivamente. Os valores do R^2 e R^2 ajustado foram calculados para saber a porcentagem de influência das variáveis ambientais na variabilidade da composição de espécies.

Todos os gráficos foram gerados com o pacote *ggplot2* (Wickham, 2016) e *gridExtra* (Auguie, 2017). Os pacotes *tidyverse* (Wickham et al., 2019) e *visdat* (Tierney, 2017) foram usados para organização e manipulação dados antes da realização das análises estatísticas.

3. Resultados

O megahabitat de fundo consolidado apresentou maior diversidade alfa nas ordens 1, 2 e 3, seguido pelo megahabitat de ambientes de banco de rodolitos, e por último, ambientes de fundos inconsolidados, como fundos arenosos e banco de algas marinhas foram os que apresentaram a maior diversidade alfa para as três ordens analisadas (Figura 1; Tabela 1). Da mesma forma, a abundância de peixes no megahabitat de fundo consolidado foi maior do que os ambientes de banco de rodolitos, com abundância intermediária, e ambientes de fundo inconsolidado.

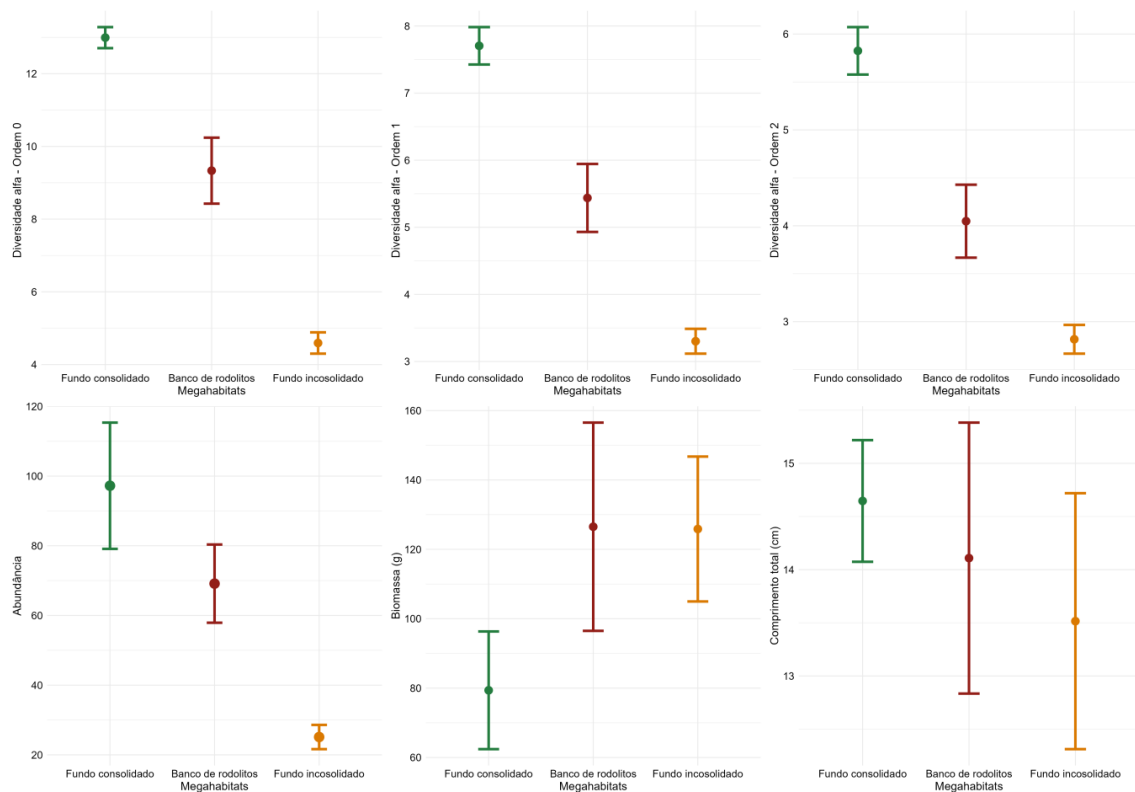


Figura 1. Diversidade alfa para as ordens 0, 1 e 2, abundância, biomassa (g) e comprimento total (cm) de peixes entre os megahabitats de fundos consolidados (barras verdes), fundos inconsolidados (barras vermelhas) e banco de rodolitos (barras laranjas). Os pontos centrais representam as médias e as barras os erros-padrão.

Tabela 1. Resultados da Análise de Variância Permutacional (PERMANOVA) para avaliar como as diversidades alfa e a abundância de espécies variam entre os megahabitats consolidados, inconsolidados e banco de rodolitos. A tabela apresenta as estatísticas dos megahabitats, estatística residual e total, incluindo os graus de liberdade (gl), a soma dos quadrados (SQ), os valores do R^2 , a estatística F e o valor de p . Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Fonte | gl | SQ | R^2 | F | p |
|--------------|-----|--------|-------|--------|--------------|
| Megahabitats | 2 | 7,740 | 0,235 | 38,294 | 0,001 |
| Residual | 249 | 25,166 | 0,765 | — | — |
| Total | 251 | 32,906 | 1 | — | — |

De maneira oposta aos dados de diversidade alfa e abundância, peixes de ambientes de fundo consolidado apresentaram menor biomassa comparado aos ambientes de banco de rodolitos e de fundos inconsolidados. Para os dados de comprimento total de peixes, as médias foram mais próximas entre os três tipos de megahabitats. A maior média do comprimento total de peixes ocorreu nos ambientes de fundo consolidado. A menor média ocorreu nos

ambientes de fundo inconsolidado, seguido dos ambientes de banco de rodolitos, entretanto, esses ambientes apresentaram uma maior variação no comprimento de peixes (Figura 1; Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da Análise de Variância Permutacional (PERMANOVA) para avaliar como a biomassa e o comprimento total de peixes variam entre os megahabitats consolidados, inconsolidados e banco de rodolitos. A tabela apresenta as estatísticas dos megahabitats, estatística residual e total, incluindo os graus de liberdade (gl), a soma dos quadrados (SQ), os valores do R^2 , a estatística F e o valor de p. Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Fonte | gl | SQ | R^2 | F | p |
|--------------|-----|--------|-------|-------|--------------|
| Megahabitats | 2 | 2,682 | 0,056 | 7,326 | 0,001 |
| Residual | 249 | 45,580 | 0,944 | — | — |
| Total | 251 | 48,262 | 1 | — | — |

A Análise de Componentes Principais indicou um padrão em que megahabitats apresentam características ambientais semelhantes aos megahabitats banco de rodolitos e fundos inconsolidados. Além disso, ambientes do banco de rodolitos apresentam características ambientais que são encontradas tanto em ambientes de fundos inconsolidados como em ambientes de fundos consolidados (Figura 2).

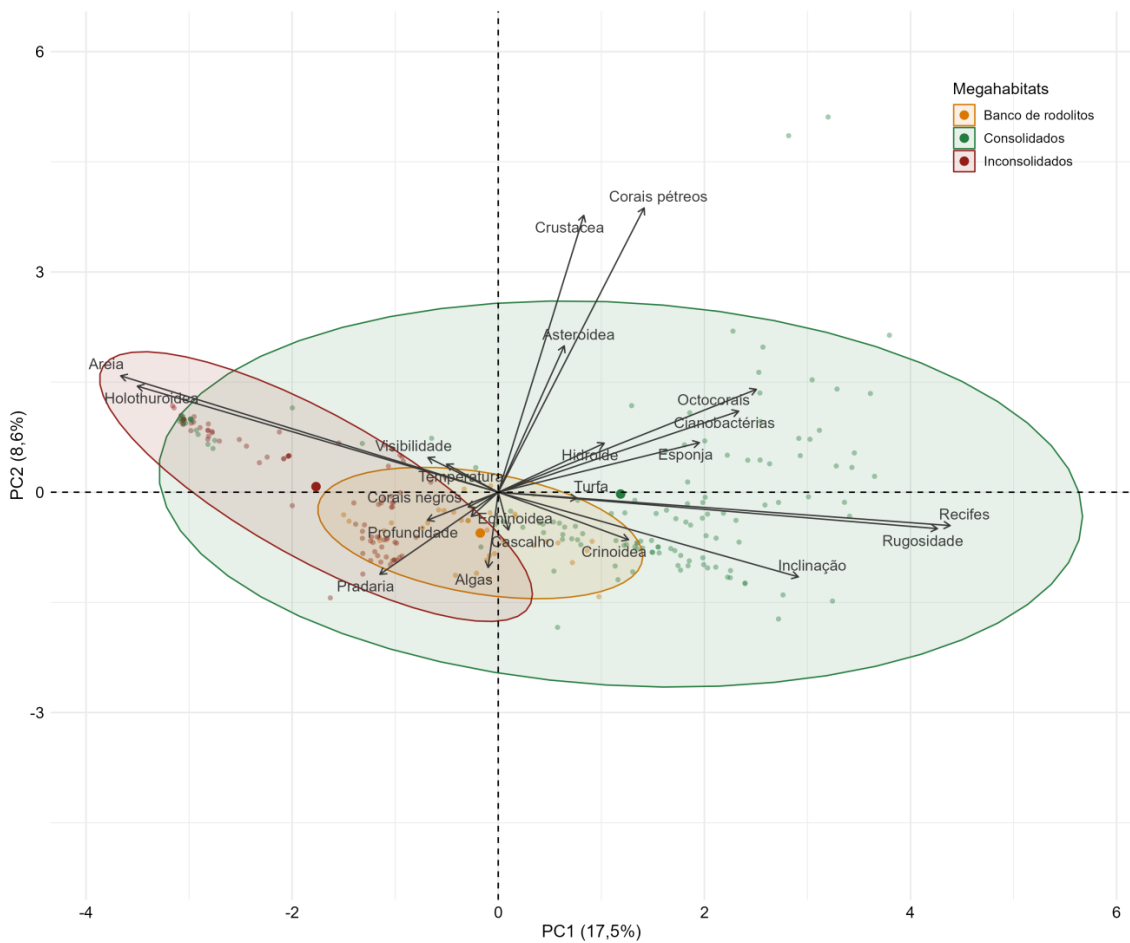


Figura 2. Gráfico da Análise de Componentes Principais apresentando as variáveis ambientais e os grupos de megahabitats banco de rodólitos (elipse em laranja), fundos consolidados (elipse em verde) e fundos inconsolidados (elipse em vermelho).

Os eixos das análises 1 e 2 foram os dois componentes principais que apresentaram maior porcentagem de explicação da variabilidade dos dados. O primeiro componente principal explicou 17,5% da variabilidade e o segundo componente explicou 8,6% (Figura 3). As variáveis ambientais com as maiores porcentagens de explicação para a variabilidade dos dados, foram, em ordem decrescente, recifes de corais, rugosidade, corais ptreos, crustáceos, inclinação e octocorais, além das variáveis areia e Holothuroidea, mais associados aos ambientes de fundos inconsolidados (Figura 4; Figura 2).

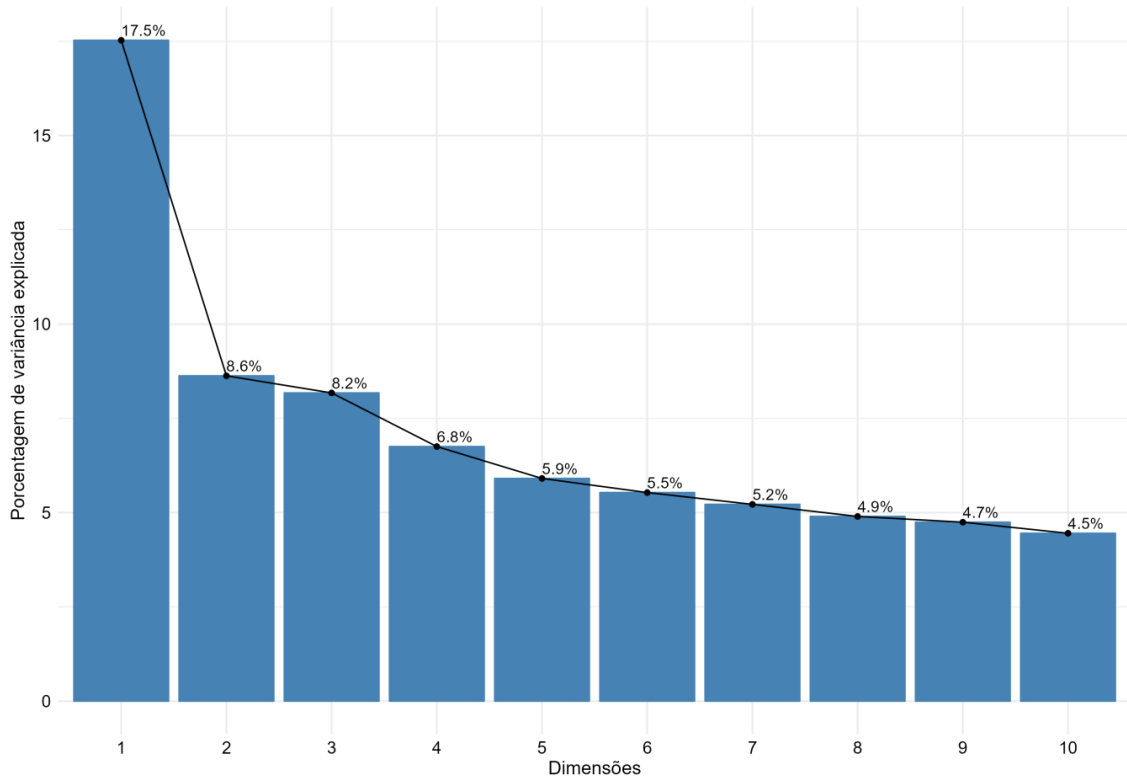


Figura 3. Gráfico da Análise de Componentes Principais apresentando a porcentagem de variância explicada para cada dimensão (eixos 1 a 10).

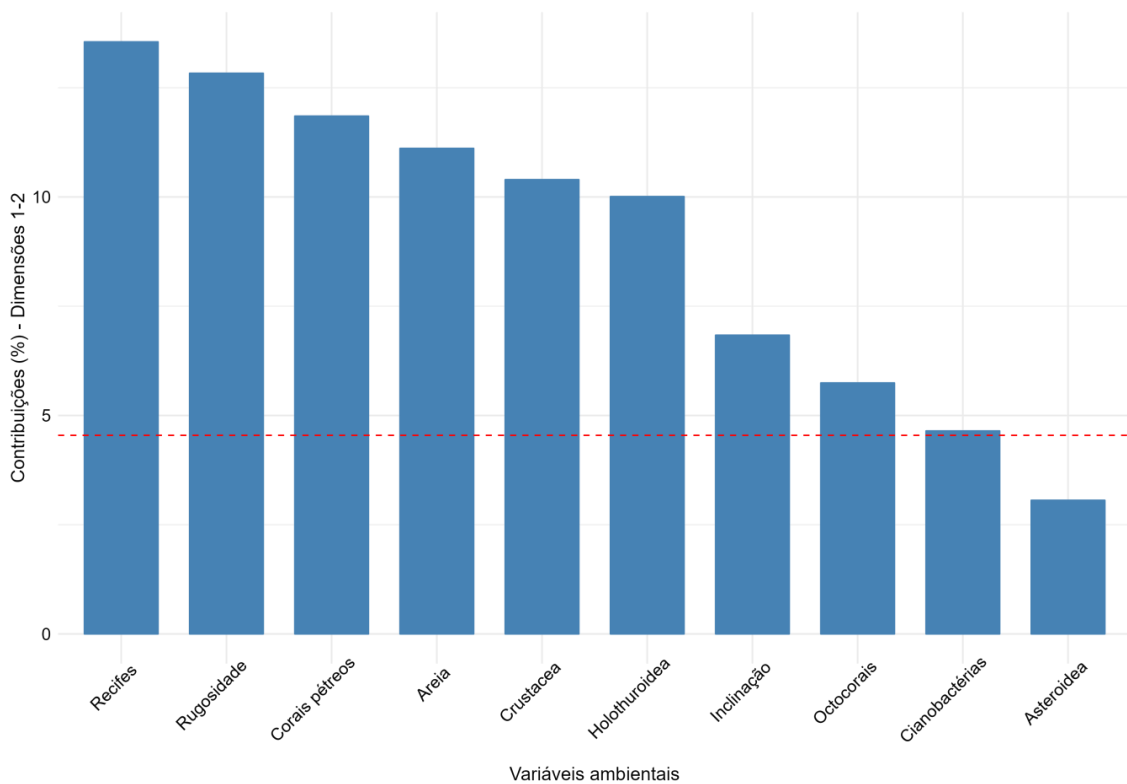


Figura 4. Gráfico da Análise de Componentes Principais apresentando a porcentagem de de contribuição de cada variável ambiental presente nos dados.

A maior diversidade beta total ocorreu entre os megahabitats de fundos inconsolidados do banco de algas marinhas e os megahabitats consolidados chapeirões, recifes de corais e costões rochosos, além disso ocorreu alta diversidade beta entre o megahabitat de fundo inconsolidado banco de algas marinhas e o megahabitat banco de rodolitos. O megahabitat banco de rodolito também apresentou alta diversidade beta com os ambientes consolidados chapeirões e recifes de corais. Em relação à diversidade beta por substituição, foi observado maior diversidade entre banco de rodolitos e chapeirões e banco de rodolitos e recifes de corais, ambos de ambientes consolidados (Figura 5). A diversidade beta por substituição também foi alta entre os ambientes inconsolidados de algas marinhas e os ambientes consolidado chapeirões (Figura 5).

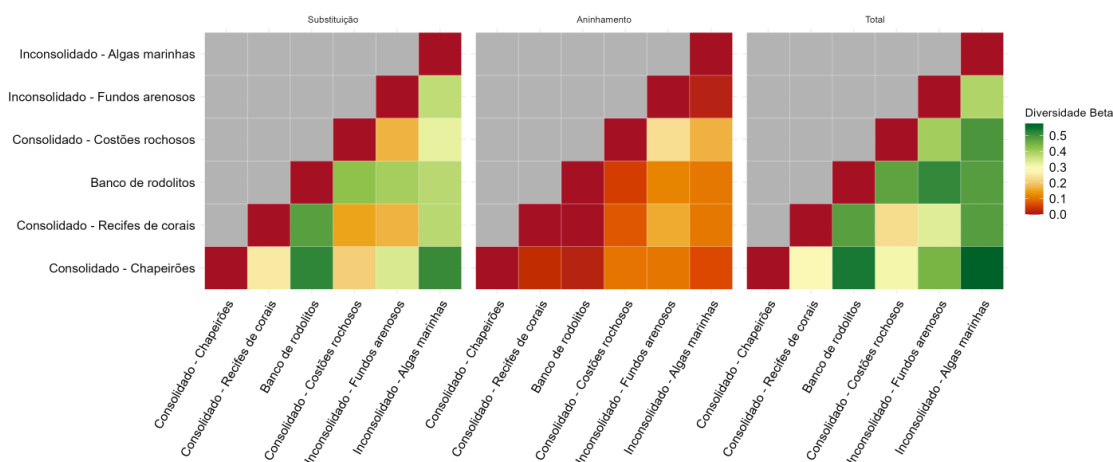


Figura 5. Gráfico de correlação das diversidades beta por substituição, por aninhamento e total (índices de 0 a 0,5) para cada habitat presente nos megahabitats de fundos consolidados, fundos inconsolidados e banco de rodolitos. Índices de diversidades beta mais baixos estão destacados em tons de vermelho e laranja e índices de diversidade beta mais altos estão destacados em tons de verde.

De forma geral, a diversidade alfa dos megahabitats de fundo inconsolidados, principalmente para o banco de algas marinhas, foi alta considerando os megahabitats de fundo consolidados e banco de rodolitos, indicando que os habitats de algas marinhas, apesar de menor diversidade alfa

contribuem para a diversidade beta total (Figura 6; Figura 5). A menor diversidade beta total e por substituição ocorreu entre os megahabitats de fundos consolidados como costões rochosos e recifes de corais, e costões rochosos e chapeirões (Figura 5).

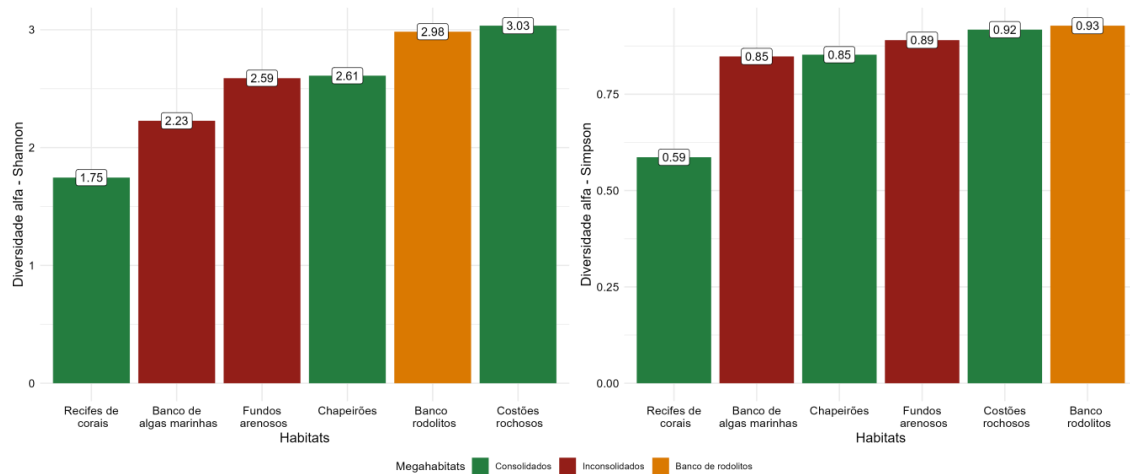


Figura 6. Diversidades alfa de Shannon e Simpson para os habitats inseridos nos megahabitats de fundos consolidados (barras verdes), fundos inconsolidados (barras vermelhas) e banco de rodolitos (barras laranjas).

A Análise de Redundância (RDA) apresentou as coordenadas RDA1 e RDA2 significativas para o modelo e para as combinações lineares entre as variáveis ambientais preditoras e a variabilidade de espécies de peixes (Tabela 3). O primeiro eixo apresentou uma porcentagem de 47,63% e o segundo eixos apresentou uma porcentagem de 14,18% na variabilidade e de espécies.

Tabela 3. Resultado do teste de permutação da Análise de Variância (ANOVA) para as coordenadas da Análise de Redundância (RDA) considerando o modelo da influência dessas variáveis preditoras sobre a composição de espécies. A tabela apresenta as variáveis ambientais do modelo, os graus de liberdade (gl), as variâncias do modelo, os valores de F e os valores de p. Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Coordenadas | gl | Variância | F | p |
|-------------|-----|-----------|--------|--------------|
| RDA1 | 1 | 0,082 | 30,190 | 0,001 |
| RDA2 | 1 | 0,024 | 8,987 | 0,001 |
| RDA3 | 1 | 0,013 | 4,645 | 0,106 |
| RDA4 | 1 | 0,012 | 4,450 | 0,099 |
| RDA5 | 1 | 0,007 | 2,426 | 0,995 |
| RDA6 | 1 | 0,006 | 2,248 | 0,996 |
| RDA7 | 1 | 0,005 | 1,850 | 1 |
| RDA8 | 1 | 0,004 | 1,638 | 1 |
| RDA9 | 1 | 0,004 | 1,484 | 1 |
| RDA10 | 1 | 0,003 | 1,097 | 1 |
| RDA11 | 1 | 0,002 | 0,869 | 1 |
| RDA12 | 1 | 0,002 | 0,681 | 1 |
| RDA13 | 1 | 0,002 | 0,597 | 1 |
| RDA14 | 1 | 0,001 | 0,515 | 1 |
| RDA15 | 1 | 0,001 | 0,384 | 1 |
| RDA16 | 1 | 0,001 | 0,337 | 1 |
| RDA17 | 1 | 0,001 | 0,280 | 1 |
| RDA18 | 1 | 0,001 | 0,205 | 1 |
| RDA19 | 1 | 0 | 0,175 | 1 |
| RDA20 | 1 | 0 | 0,137 | 1 |
| RDA21 | 1 | 0 | 0,103 | 1 |
| RDA22 | 1 | 0 | 0,090 | 1 |
| Residual | 200 | 0,543 | — | — |

As variáveis ambientais que apresentaram maior influência na distribuição das espécies de peixes entre os megahabitats foram temperatura, visibilidade, profundidade, rugosidade, inclinação, recifes de corais, areia, cascalho, pradaria, algas e Holothuroidea, de acordo com os valores de p significativos (Tabela 4). As variáveis ambientais mais correlacionadas com o megahabitat de fundos consolidados foram rugosidade, recifes de corais e inclinação, ou seja, essas variáveis ambientais influenciaram mais significativamente a distribuição de peixes nesses ambientes consolidados

(Figura 7). Por outro lado, as variáveis pradarias, profundidade, algas, temperatura e visibilidade influenciaram a distribuição da abundância de peixes em ambientes de fundos inconsolidados e em bancos de rodolitos. Os valores de R^2 e R^2 ajustado para o modelo da análise foram de 0,240 e 0,157, respectivamente.

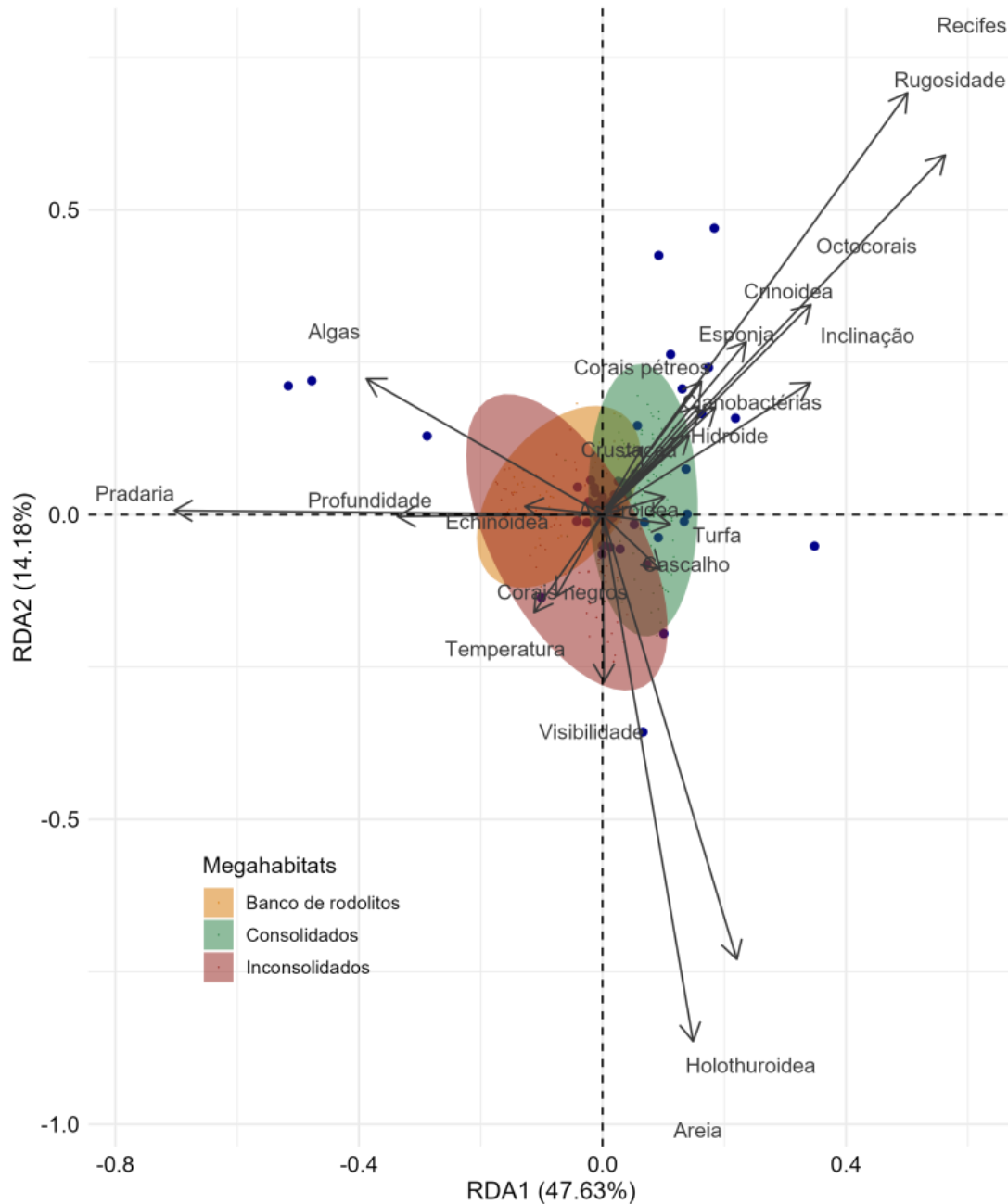


Figura 7. Gráfico da Análise de Redundância apresentando as relações lineares das variáveis ambientais e da distribuição de peixes entre os megahabitats banco de rodolitos (elipse em laranja), fundos consolidados (elipse em verde) e fundos inconsolidados (elipse em vermelho).

Tabela 4. Resultado do teste de permutação da Análise de Variância (ANOVA) para as variáveis ambientais da Análise de Redundância (RDA) considerando o modelo da influência dessas variáveis preditoras sobre a composição de espécies. A tabela apresenta as variáveis ambientais do modelo, os graus de liberdade (gl), as variâncias do modelo, os valores de F e os valores de p. Os parâmetros significativos no nível $\alpha \leq 0,05$ estão destacados em negrito.

| Variáveis | gl | Variância | F | p |
|----------------|-----|-----------|--------|--------------|
| Temperatura | 1 | 0,007 | 2,405 | 0,007 |
| Visibilidade | 1 | 0,007 | 2,418 | 0,004 |
| Profundidade | 1 | 0,010 | 3,691 | 0,001 |
| Rugosidade | 1 | 0,032 | 11,831 | 0,001 |
| Inclinação | 1 | 0,005 | 1,758 | 0,043 |
| Recifes | 1 | 0,009 | 3,172 | 0,001 |
| Areia | 1 | 0,035 | 13,067 | 0,001 |
| Cascalho | 1 | 0,005 | 1,709 | 0,029 |
| Pradaria | 1 | 0,012 | 4,528 | 0,001 |
| Algas | 1 | 0,011 | 3,940 | 0,001 |
| Holothuroidea | 1 | 0,009 | 3,444 | 0,001 |
| Crustacea | 1 | 0,003 | 1,023 | 0,420 |
| Asteroidea | 1 | 0,003 | 0,976 | 0,476 |
| Echinoidea | 1 | 0,002 | 0,720 | 0,904 |
| Crinoidea | 1 | 0,003 | 0,996 | 0,437 |
| Esponja | 1 | 0,003 | 1,231 | 0,199 |
| Turfa | 1 | 0,003 | 1,216 | 0,223 |
| Cianobactérias | 1 | 0,004 | 1,390 | 0,144 |
| Corais negros | 1 | 0,003 | 0,953 | 0,519 |
| Octocorais | 1 | 0,003 | 0,942 | 0,476 |
| Corais pétreos | 1 | 0,003 | 0,933 | 0,522 |
| Hidroide | 1 | 0,003 | 1,046 | 0,415 |
| Residual | 200 | 0,543 | — | — |

4. Discussão

Este estudo demonstra que os bancos de rodolitos se apresentam como um megahabitat intermediário em relação aos habitats de fundos consolidados e inconsolidados, no que diz respeito às características ambientais e composição de espécies. Os rodolitos podem suportar distintas assembleias de peixes, possivelmente com preferências por habitats menos estruturados ou

com diferentes regimes alimentares, como sugerido por Friedlander e Parrish (1998).

Em termos de conservação, esses resultados ressaltam a importância de considerar a heterogeneidade do habitat na gestão dos recursos pesqueiros e na manutenção da biodiversidade marinha (Munday, 2004). A proteção de uma variedade de habitats, incluindo fundos consolidados, fundos inconsolidados e rodolitos, será vital para a preservação da diversidade das comunidades de peixes recifais (Gaston, 2000).

A análise da diversidade alfa revelou que o megahabitat de fundo consolidado apresenta a maior diversidade. Esse padrão é consistente com estudos anteriores, destacando a importância de recifes de corais e ambientes consolidados na promoção da diversidade de peixes (Luckhurst e Luckhurst, 1978, Silva e Carvalho, 2022).

Assim como a abundância de peixes também foi maior nos megahabitats de fundo consolidado. Entretanto, a análise da biomassa revelou que os peixes nos ambientes de banco de rodolitos, apresentaram biomassa significativamente superior, apesar da menor abundância em comparação com os megahabitats de fundo consolidado. Isso sugere adaptações específicas desses peixes aos bancos de rodolitos, indicando possíveis benefícios associados à complexidade estrutural desses ambientes (Foster, 2001; Nelson, 2009). Já em recifes de corais e rochosos é observada uma maior heterogeneidade de espécies, consistente com a ideia de que habitats mais complexos proporcionam mais nichos e, portanto, suportam uma gama mais ampla de espécies (Tews et al., 2004).

No Oceano Atlântico, próximo à costa do Brasil, os rodolitos têm sido documentados como habitat para uma variedade de peixes, incluindo várias espécies da família Haemulidae, Scaridae e Acanthuridae, que podem se alimentar de algas e pequenos invertebrados associados aos rodolitos (Amado-Filho et al., 2012). Deve-se notar que a disponibilidade de alimentos em bancos de rodolitos depende não apenas da presença de algas e invertebrados, mas também da complexidade estrutural dos rodolitos, que podem abrigar uma

diversidade de organismos em seus vários nichos e micro-habitats (Steller et al., 2003; Amado-Filho et al., 2012).

Sabe-se que as espécies de peixes específicas que se alimentam em bancos de rodolitos podem variar dependendo da região geográfica e das características ambientais. Por exemplo, no Golfo da Califórnia, Steller et al. (2003), mostraram que uma variedade de espécies de peixes costeiros e bentônicos, como o gênero *Chromis*, espécie da família Labridae e espécies da família Blenniidae, foram observados nos bancos de rodolitos e esses peixes podem se alimentar diretamente de algas e invertebrados presentes.

A análise de componentes principais mostrou uma sobreposição de características ambientais entre os ambientes de banco de rodolitos e ambientes consolidados e inconsolidados. Essa similaridade pode ser um fator-chave na atração de diferentes espécies para esses ambientes intermediários, proporcionando uma variedade de nichos ecológicos que sustentam a diversidade observada. Ambientes intermediários têm sido reconhecidos como importantes "pontes ecológicas" facilitando a coexistência de espécies distintas de peixes (Vieira e Shibatt, 2007; Nunes et al., 2020). As assembleias de peixes são cruciais para o funcionamento dos ecossistemas aquáticos, desempenhando papéis importantes na ciclagem de nutrientes, manutenção da cadeia alimentar e estabilidade do ecossistema (Heithaus et al., 2008).

A diversidade beta ressaltou as diferenças nas comunidades de peixes entre os megahabitats, destacando a importância das diferenças ambientais para a manutenção da biodiversidade regional. A alta diversidade beta entre megahabitats de fundos inconsolidados e consolidados destaca a necessidade de estratégias de conservação que considerem a proteção de ambientes distintos para preservar a riqueza biológica do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos (Rolim et al., 2022).

Os megahabitats de fundos inconsolidados, especialmente o banco de algas marinhas, contribuíram significativamente para a diversidade beta total, apesar de sua menor diversidade alfa. Isso destaca a importância de considerar não apenas a riqueza de espécies local, mas também a contribuição

única de determinados habitats para a diversidade regional (Francini-Filho e Moura 2008; Descombes et al, 2015). A conservação desses habitats distintos é essencial para garantir a resiliência dos ecossistemas marinhos frente às mudanças climáticas e outros estressores antropogênicos (Bellwood et al., 2004).

A análise de redundância enfatizou a influência diferenciada das variáveis ambientais na distribuição de espécies de peixes. As variáveis mais correlacionadas com ambientes consolidados, como rugosidade e recifes de corais, indicam a importância desses elementos na estruturação das comunidades. Por outro lado, variáveis como pradarias, profundidade e algas exercem uma forte influência em ambientes de fundos inconsolidados e bancos de rodólitos. Essa compreensão detalhada das variáveis-chave pode orientar estratégias específicas de manejo e conservação para cada tipo de megahabitat (Graham e Nash, 2013). Essas características ambientais podem influenciar as oportunidades de alimentação, reprodução e proteção contra predadores para diferentes espécies de peixes, resultando em diferenças na composição das espécies entre habitats (Dorenbosch et al., 2005).

5. Conclusão

Este estudo proporcionou dados relevantes sobre a importância dos bancos de rodólitos como um megahabitat intermediário, posicionando-se entre ambientes de fundos consolidados e inconsolidados. Os resultados da diversidade alfa indicaram que os megahabitats de fundo consolidado exibiram a maior diversidade, consistente com achados anteriores que enfatizam a relevância de recifes de corais para a promoção da diversidade de peixes. Contrariamente, os ambientes de banco de rodólitos mostraram-se cruciais ao apresentar biomassa significativamente superior, apesar da menor abundância. Essa adaptação específica dos peixes aos bancos de rodólitos sugere benefícios associados à complexidade estrutural desses ambientes.

A análise de componentes principais revelou sobreposição de características ambientais entre ambientes de banco de rodólitos e ambientes consolidados e inconsolidados, apontando para a atração de diferentes

espécies a esses ambientes intermediários, que são reconhecidos como pontes ecológicas que facilitam a coexistência de espécies distintas de peixes.

A diversidade beta destacou as diferenças nas comunidades de peixes entre os megahabitats, ressaltando a importância das diferenças ambientais para a manutenção da biodiversidade regional, fortalecendo a necessidade de estratégias de conservação devem considerar a proteção de ambientes distintos para preservar a riqueza biológica do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos.

De modo geral, esses resultados destacam a complexidade e a interconectividade dos diferentes megahabitats no Parque Nacional Marinho dos Abrolhos, uma vez que na análise de redundância observa-se a influência diferenciada das variáveis ambientais na distribuição de espécies de peixes, com variáveis como rugosidade e recifes de corais exercendo forte influência em ambientes consolidados, enquanto pradarias, profundidade e algas desempenharam papéis cruciais em ambientes de fundos inconsolidados e bancos de rodolitos.

Essa compreensão detalhada das interações ecológicas é crucial para o desenvolvimento de estratégias de conservação adaptativas e sustentáveis. O que requer uma gestão eficaz dos recursos pesqueiros e a preservação da biodiversidade marinha através de uma abordagem holística, considerando toda diversidade de habitats existentes, desde recifes consolidados até bancos de rodolitos e fundos inconsolidados.

6. Referências

Adey, W.H. (1978). Coral reef morphogenesis: A multidimensional model. *Science*, 202(4369), 831-837.

Amado-Filho, et al. (2012). Rhodolith Beds Are Major CaCO₃ Bio-Factories in the Tropical South West Atlantic. *PLoS ONE* 7(4), e35171.

Araújo, A. L. F. de. (2016). Caracterização do habitat e aspectos ecológicos de *Anisotremus moricandi* (Perciformes: Haemulidae) em dois ambientes recifais

- costeiros da Paraíba, Brasil. (Dissertação de Mestrado em Ciências Biológicas). Universidade Federal da Paraíba, João Pessoa.
- Auguie, B. (2017). gridExtra: Miscellaneous Functions for "Grid" Graphics. (<https://CRAN.R-project.org/package=gridExtra>).
- Baselga, A., et al. (2023). Betapart: Partitioning Beta Diversity into Turnover and Nestedness Components. (<https://CRAN.R-project.org/package=betapart>).
- Beck, M. W. (2022). Ggord: Ordination Plots with Ggplot2.
- Bellwood, D.R. et. al. (2004). Confronting the coral reef crisis. *Nature* 429, 827–833.
- Bosellini, F.R., Ginsburg, R.N., & Rosen, B.R. (1999). The carbonate factory: a 2000-year record of coral reef evolution in the Fossil Bay (St Croix, US Virgin Islands). *Sedimentology*, 46(3), 579–602.
- Bosence, D.W. (1983). The occurrence and ecology of recent rhodoliths—a review. In *Coated grains*, 225-242.
- Descombes, P. et al. (2015). Forecasted coral reef decline in marine biodiversity hotspots under climate change. *Global Change Biology*, 21(7), 2479-2487.
- Dorenbosch, M. et al. (2005). Indo-Pacific seagrass beds and mangroves contribute to fish density and diversity on adjacent coral reefs. *Marine Ecology Progress Series* 302, 63–76.
- Figueiredo, M.A.O. et al. (2014). "Rodoliths in the rock record: an overview of their types and distribution." *Earth-Science Reviews*, 134, 1-20.
<https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2014.03.009>
- Fonseca, G., et al. (2019). Large-scale benthic habitat mapping of rhodolith beds in the Abrolhos Shelf, Brazil. *Journal of Coastal Research*, 35(1), 140-148.
- Foster, M. S. (2001). Rhodoliths: Between rocks and soft places. *Journal of Phycology*, 37(1), 659- 667.
- Fox, J., et al. (2019). *An R Companion to Applied Regression* (Third ed.). Thousand Oaks CA: Sage.
(<https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>).
- Francini-Filho, R. B., & de Moura, R. L. (2008). Dynamics of fish assemblages on coral reefs subjected to different management regimes in the Abrolhos Bank, eastern Brazil. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 18(7), 1166- 1179.
- Friedlander, A.M., & Parrish, J.D. (1998). Habitat characteristics affecting fish assemblages on a Hawaiian coral reef. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*, 224(1), 1-30.
- García-Charton, J.A. & Pérez-Ruzafa, A. (2001). Spatial pattern and the habitat structure of a Mediterranean rocky reef fish local assemblage. *Marine Biology*, 138, 917–934. <https://doi.org/10.1007/s002270000524>
- Gaston, K.J. (2000). Global patterns in biodiversity. *Nature*, 405, 220–227.

- Giglio, V. J.; Luiz, O. J. & Schiavetti, A. (2016). Recreational diver behavior and contacts with benthic organisms in the Abrolhos National Marine Park, Brazil. *Environmental management*, 57(3), 637-648.
- Graham, N.A. & Nash, K.L. (2013). The importance of structural complexity in coral reef ecosystems. *Coral Reefs* 32, 315–326.
- Grigg, R. W. (2006). Depth limit for reef building corals in the Au'au Channel, S.E. Hawaii. *Coral Reefs*, 25(1), 77-84.
- Harmelin, J.G. (1987). Structure et variabilité de l'ichtyofaune d'une zone rocheuse protégée en Méditerranée (Parc national de Port- Cros, France). *PSZN I, Marine Ecology*, 8(3), 263–284. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0485.1987.tb00188.x>
- Hartig, F. (2022). DHARMA: Residual Diagnostics for Hierarchical (Multi-Level/Mixed) Regression Models. (<https://CRAN.R-project.org/package=DHARMA>).
- Heithaus, M.R. et al. (2008). Predicting ecological consequences of marine top predator declines. *Trends in Ecology & Evolution* 23, 202–210.
- Jones, D. O. et al. (2014). Global reductions in seafloor biomass in response to climate change. *Global Change Biology*, 20(6), 1861-1872.
- Josse, J., et al. (2016). “missMDA: A Package for Handling Missing Values in Multivariate Data Analysis.” *Journal of Statistical Software*, 70(1), 1–31. (<https://doi.org/10.18637/jss.v070.i01>).
- Kamenos, N. A. et al. (2013). Coralline algal structure is more sensitive to rate, rather than the magnitude, of ocean acidification. *Global Change Biology*, 19(12), 3621-3628.
- Kassambara, A., & Mundt, F. (2020). Factoextra: Extract and Visualize the Results of Multivariate Data Analyses. (<https://CRAN.R-project.org/package=factoextra>).
- Lê, S. et al. (2008). “FactoMineR: A Package for Multivariate Analysis.” *Journal of Statistical Software*, 25(1), 1–18. (<https://doi.org/10.18637/jss.v025.i01>).
- Leão, Z. M. A. N. et al. (2015). Monitoramento dos recifes e ecossistemas coralinos. In: Turra, A. & Denadai, M. R. *Protocolos de Campo para o Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros. Rede de Monitoramento de Habitats Bentônicos Costeiros – ReBentos*, 155-179. <https://doi.org/10.7476/9788598729251>.
- Leão, Z. M (1999). Abrolhos - O complexo recifal mais extenso do Oceano Atlântico Sul. In: Schobbenhaus, C.; Campos, D.A.; Queiroz, E.T.; Winge, M.; Berbert-Born, M. (Edit.) *Sítios Geológicos e Paleontológicos do Brasil*. <http://www.unb.br/ig/sigep/sitio090/sitio090.htm>
- Luckhurst, B.E., & Luckhurst, K. (1978). Analysis of the influence of substrate variables on coral reef fish communities. *Marine Biology*, 49, 317–323.
- Lüdecke, D., et al. (2021). “performance: An R Package for Assessment, Comparison and Testing of Statistical Models.” *Journal of Open Source*

- Software, 6(60), 31-39.
<https://doi.org/10.21105/joss.03139>.
- Marcon, E., & Hérault, B. (2015). "entropart: An R Package to Measure and Partition Diversity." *Journal of Statistical Software*, 67(8), 1–26.
<https://doi.org/10.18637/jss.v067.i08>.
- McCoy, S. J., & Kamenos, N. A. (2015). Coralline algae (Rhodophyta) in a changing world: integrating ecological, physiological, and geochemical responses to global change. *Journal of Phycology*, 51(1), 6-24.
- Minte-Vera, C. V.; Moura, R. L.; Francini-Filho, R. B. (2008) Nested sampling: an improved visual-census technique for studying reef fish assemblages. *Marine Ecology Progress Series*, 367 (1), 283-293.
- Moura, R. L. et al. (2013). Spatial patterns of benthic megahabitats and conservation planning in the Abrolhos Bank. *Cont. Shelf Res.*, 70(1), 109-117.
- Munday, P.L. (2004). Habitat loss, resource specialization, and extinction on coral reefs. *Global Change Biology*, 10(10), 1642-1647.
- Nelson, W. (2009). "Calcified macroalgae – critical to coastal ecosystems and vulnerable to change: a review". *Marine and Freshwater Research*, 60(8), 787-801.
- Nunes, L. et al. (2020). The influence of species abundance, diet and phylogenetic affinity on the cooccurrence of butterflyfishes. *Marine Biology*, 167, 107. doi: 10.1007/s00227-020- 03725-7
- Oksanen, J., et al. (2022). *Vegan: Community Ecology Package*. (<https://CRAN.R-project.org/package=vegan>).
- Oliveira, O. M. P., et al. (2020). Distribution patterns and environmental drivers of rhodolith beds on the Abrolhos Bank, Brazil. *Journal of Marine Systems*, 207, 103292.
- Quensen, J., et al. (2023). *Ggordiplots: Make 'Ggplot2' Versions of Vegan's Ordplots*. (<https://CRAN.R-project.org/package=ggordiplots>).
- Rolim, F. A. et al. (2022). Habitat and marine reserve status drive reef fish biomass and functional diversity in the largest south Atlantic coral reef system (Abrolhos, Brazil). *Frontiers in Marine Science*, 9(1), 9-17.
- Silva, A. D. de C.; & Carvalho, L. L. de. (2022). Recifes de coral. *Ambiente & Educação*, 27(2), 1-35. <http://dx.doi.org/10.14295/ambeduc.v27i2.14084>.
- Steller, D. L. et al. (2003). Rhodolith bed diversity in the Gulf of California: the importance of rhodolith structure and consequences of disturbance. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 13(S1), S5–S20.
- Steller, D.L.; & Foster, M.S. (1995). Environmental factors influencing distribution and morphology of rhodoliths in Bahia Concepcion, B.C.S., Mexico. *Journal of Experimental Marine Biology and Ecology*., 194, 201–212.
- Teichert, N. (2014). Rhodolith beds (Rhodoliths) in the Mediterranean Sea: a review. *Facies*, 60(1), 15-27.

- Tews, J. et al. (2004). Animal species diversity driven by habitat heterogeneity/diversity: the importance of keystone structures. *Journal of Biogeography*, 31, 79–92.
- Tierney, N. (2017). “Visdat: Visualising Whole Data Frames.” *JOSS*, 2(16), 355. (<https://doi.org/10.21105/joss.00355>).
- Venables, W. N., & Ripley, B. D. (2002). *Modern Applied Statistics with S* (Fourth ed.). New York: Springer. (<https://www.stats.ox.ac.uk>).
- Vieira, D. B.; & Shibatta, O. A. (2007). Peixes como indicadores da qualidade ambiental do ribeirão Esperança, município de Londrina, Paraná, Brasil. *Biota Neotropica*, 7(1), 57-65. <http://dx.doi.org/10.1590/s1676-06032007000100008>.

Considerações finais

Este estudo foi pioneiro em trazer uma abordagem dos habitats em relação a diversidade de peixes em uma escala mais fina dando ênfase a todos os tipos de habitats Marinho costeiro, com uma visão abrangente da complexidade e interconectividade dos habitats marinhos da costa e principalmente do parque Marinho de Abrolhos, destacando a importância de considerar diferentes ambientes na elaboração de estratégias eficazes de conservação marinha. A diversidade e complexidade dos habitats, como fundos arenosos, bancos de algas marinhas e bancos de rodólitos, foram evidenciadas como elementos complementares para o entendimento da conectividade ecológica e a sustentabilidade das populações de peixes.

A interdependência entre os habitats, destacada pela diversidade beta total, sublinha a necessidade de medidas de conservação que abranjam uma variedade de ambientes, promovendo a resiliência das comunidades de peixes. A análise da diversidade funcional revelou a importância funcional dos diferentes habitats na manutenção das redes alimentares marinhas, reforçando a necessidade de uma abordagem integrada na gestão marinha.

Os bancos de rodólitos foram identificados como megahabitats intermediários, apresentando uma biomassa significativamente superior apesar da menor abundância, indicando benefícios associados à complexidade estrutural desses ambientes. A sobreposição de características ambientais entre bancos de rodólitos e ambientes consolidados e inconsolidados, evidenciada pela análise de componentes principais, ressalta o papel desses habitats intermediários como pontes ecológicas que facilitam a coexistência de espécies distintas de peixes.

A diversidade beta entre habitats sublinha as diferenças nas comunidades de peixes, reforçando a necessidade de estratégias de conservação que considerem a proteção de ambientes distintos para preservar a riqueza biológica do Parque Nacional Marinho dos Abrolhos. A análise de redundância evidenciou a influência diferenciada das variáveis ambientais na distribuição de espécies de peixes entre ambientes.

Esses resultados apontam para a complexidade das interações ecológicas na região, ressaltando a importância de uma gestão eficaz dos recursos pesqueiros e a preservação da biodiversidade marinha por meio de uma abordagem holística. A criação de corredores de conservação e práticas de pesca sustentável emerge como medidas cruciais para garantir a preservação da biodiversidade e a resiliência dos ecossistemas marinhos em Abrolhos e áreas com diversidade de habitats distribuídos ao longo da paisagem marinha. Essa compreensão detalhada das interações ecológicas é essencial para o desenvolvimento de estratégias de conservação adaptativas e sustentáveis, visando a proteção do patrimônio natural da região e a promoção da coexistência harmoniosa entre os diferentes elementos da paisagem marinha, bem como sensibilizar outras regiões que concentram variedades de habitats e que não há uma gestão integrada.