



**MARINHA DO BRASIL
INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PROGRAMA ASSOCIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA MARINHA**

NILCE GOMES SILVEIRA

**PAISAGEM ACÚSTICA SUBMARINA: PADRÕES ACÚSTICOS DE
INVERTEBRADOS BENTÔNICOS**

ARRAIAL DO CABO/RJ

2023



MARINHA DO BRASIL
INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA
UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
PROGRAMA ASSOCIADO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM BIOTECNOLOGIA MARINHA

NILCE GOMES SILVEIRA

**PAISAGEM ACÚSTICA SUBMARINA: PADRÕES ACÚSTICOS DE
INVERTEBRADOS BENTÔNICOS**

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e à Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Biotecnologia Marinha.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Coutinho
Coorientador: Prof. Dr. Fábio Contrera Xavier

ARRAIAL DO CABO/RJ

2023

FICHA CATALOGRÁFICA

S587p Silveira, Nilce Gomes
Paisagem acústica submarina: padrões acústicos de invertebrados bentônicos / Nilce Gomes Silveira. – Arraial do Cabo, 2023.

83 f.: il.; 30 cm.

Orientador: Ricardo Coutinho.

Coorientador: Fábio Contrera Xavier.

Tese (Doutorado) – Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e Universidade Federal Fluminense - IEAPM/UFF, Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha, Arraial do Cabo, 2023.

1. Monitoramento Acústico passivo. 2. Biofonia. 3. Biotecnologia marinha.
I. Coutinho, Ricardo. II. Xavier, Fábio Contrera. III. Título.

CDD:660.6

NILCE GOMES SILVEIRA

**PAISAGEM ACÚSTICA SUBMARINA: PADRÕES ACÚSTICOS DE
INVERTEBRADOS BENTÔNICOS**

Tese de doutorado apresentada ao Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira e à Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para a obtenção do grau de Doutor em Biotecnologia Marinha

COMISSÃO JULGADORA:

Prof. Dr. Ricardo Coutinho
Instituto de Estudos do Mar Almirante
Paulo Moreira
Professor orientador - Presidente da Banca
Examinadora

Prof. Dr. Alexandre de Freitas Azevedo
Universidade do Estado do Rio de Janeiro

Prof. Dr. Eduardo Barros Fagundes Netto
Instituto de Estudos do Mar Almirante
Paulo Moreira

Prof. Dr. Leandro Calado
Instituto de Estudos do Mar Almirante
Paulo Moreira

Dr. Fabio Barbosa Louza
Instituto de Estudos do Mar Almirante
Paulo Moreira

Arraial do Cabo/RJ, 30 de junho de 2023.

Aos meus filhos, Gabriel, Miguel e Rafael, para que saibam que o aprendizado é uma constante evolução.

AGRADECIMENTOS

Começo agradecendo a Deus pela oportunidade de fazer o doutorado, e por ter me sustentado nos momentos mais desafiadores que passei no decorrer do curso.

Apesar da escrita da tese ser uma atividade solitária, o desenvolvimento da pesquisa depende de muitos fatores. Gostaria de agradecer às pessoas que foram importantes nessa jornada.

Ao meu marido Marlon, meu parceiro de vida. Que mesmo vivendo um período difícil, me incentivou a concluir a tese.

Aos meus filhos, Gabriel, Miguel e Rafael, por me lembrarem sempre que eu já tinha o título de mãe, antes de entrar no doutorado. Por toda alegria, carinho e momentos de descontração que me trouxeram nesse período. O amor e a leveza de uma criança (no caso 3) são capazes de renovar as energias.

À minha mãe Regina, por todo o apoio e incentivo. Por ficar com meus filhos e dividir tarefas comigo, para que eu pudesse fazer disciplinas e me dedicar ao doutorado. Na prática, sem a sua ajuda, eu não teria chegado até aqui.

Ao meu orientador, Prof. Dr. Ricardo Coutinho, pela confiança, paciência e por todo apoio para a realização deste trabalho.

Ao meu coorientador, Prof. Dr. Fábio Contrera, por todas as contribuições e discussões científicas. Pela indicação de artigos para estudo, dos clássicos aos mais recentes. Por toda ajuda e revisões na programação. Pela disponibilidade, mesmo fora do horário de trabalho. Por todas as conversas e trocas de ideias, que foram muito além da tese. Além da orientação, sua amizade e incentivo foram essenciais nesse período.

Ao Prof. Dr. Eduardo Fagundes Netto, por ter disponibilizado os dados do Projeto BIOCUM para o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Prof. Sergio Jesus, pelo direcionamento e ensinamentos na evolução do projeto BIOCUM. Suas contribuições foram primordiais para o desenvolvimento do Capítulo 1 da tese.

Ao MSc. Luís Felipe Silva, por todas as trocas de ideias, dicas e bibliografia de Machine Learning, Data Mining e KDD, fundamentais para o Capítulo 2 da tese. Pela amizade e por fazer meus dias muito mais divertidos.

Ao CMG Simões, que foi meu chefe enquanto trabalhei no Departamento de Acústica Submarina do IEAPM. Por me liberar para fazer as disciplinas e incentivar o

curso de doutorado.

A todos que trabalharam comigo no Departamento de Acústica Submarina, pela vivência e aprendizado na área, em especial aos queridos e competentes SO-Ref^o-EL Raimundo Nonato e ao SO-Ref^o-ET José Tadeu Braun.

Aos colegas do grupo de bioacústica do IEAPM, pelas discussões e compartilhamento de artigos científicos. Especialmente ao Bira, pela ajuda na reta final.

Aos funcionários e professores do PPGBM, por todo o auxílio e dedicação.

Ao Dr. Alexandre Kassuga, Dra. Lilian Hoffmann, Dr. Marcus Vinícius Simões e Dr. Eduardo Fagundes Netto, pelas contribuições no exame de qualificação.

Aos membros da banca julgadora, por aceitarem o convite e pela avaliação e discussão sobre o trabalho desenvolvido nesta tese.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior - Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001.

RESUMO

Nas última duas décadas, o monitoramento da paisagem acústica tem evoluído como uma importante ferramenta para a caracterização e avaliação de diversos aspectos de ecossistemas marinhos. Entre esses ambientes, os costões rochosos são dominados por invertebrados bentônicos e apresentam uma assinatura acústica característica. A maioria destes organismos é reconhecida por produzir sons impulsivos e de banda larga. Para avaliar os padrões da paisagem acústica submarina de um costão rochoso da Ilha de Cabo Frio em Arraial do Cabo-RJ, Brasil, foram realizadas análises espectrais, temporais, sazonais, além da avaliação da influência de fatores abióticos em bandas de 1/3 de oitava no período de um ano. A análise espectral demonstrou que os maiores valores de SPL ocorreram nas bandas de 4, 5 e 6,3 kHz, que correspondem aos picos de frequência registrados para camarões estalo, ouriços e bivalves com base na literatura científica. Já as bandas de 2 e 16 kHz apresentaram os menores valores de SPL, sendo possivelmente bandas de transição onde há sobreposição de sons antropogênicos e de outros grupos de organismos marinhos. Em todas as bandas de 1/3 de oitava analisadas, foi identificado um padrão circadiano, com valores mais elevados de SPL nos crepúsculos, seguido pelo período noturno e com valores mais baixos no período diurno. Esse é um padrão característico dos invertebrados, que apresentam um pico de atividade crepuscular e continuam ativos a noite durante o período de alimentação. Os meses de fevereiro e março de 2018, e dezembro e janeiro de 2019 (verão e início do outono) apresentaram os maiores valores de SPL. O verão e o inverno foram estatisticamente diferentes, exceto para a banda de 2 kHz. Os fatores abióticos com maiores correlações com as bandas de 1/3 de oitava foram a radiação solar e a temperatura da água, fatores esses diretamente relacionados ao padrão circadiano e ao metabolismo dos invertebrados bentônicos. Os sons dos organismos mais representativos em termos de energia acústica foram caracterizados a partir de um método de classificação automática de estalos baseado em técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado. As três classes de estalos encontradas apresentaram assinaturas acústicas semelhantes, com a maior parte da energia acústica concentrada até 8 kHz e picos de frequência variando entre 3,7 e 4,55 kHz. O padrão das curvas das assinaturas acústicas e os SPL dos estalos são compatíveis com os registrados por outros autores para camarões-pistola. Mas outros invertebrados bentônicos, como cracas, bivalves e ouriços, apresentam elevadas densidades na área de estudo, e não é possível descartar a hipótese de que as assinaturas acústicas representem estalos produzidos por um conjunto de organismos.

Palavras-chaves: Monitoramento acústico passivo, biofonia, fatores abióticos, aprendizado de máquina, biotecnologia ambiental.

ABSTRACT

Over the past two decades, soundscape monitoring has evolved as an important tool for the characterization and evaluation of several aspects of marine ecosystems. Among these environments, rocky shores are dominated by benthic invertebrates and have a characteristic acoustic signature. Most of these organisms are known to produce impulsive and bandwidth sounds. We evaluate underwater soundscape patterns in a Cabo Frio Island rocky shore (Arraial do Cabo-RJ, Brazil) for one year. Spectral, temporal and seasonal analyzes were carried out, in addition to the evaluation of the influence of abiotic factors in 1/3 octave bands. Spectral analysis showed that the highest SPL values occurred in 4, 5 and 6.3 kHz bands, which correspond to the frequency peaks recorded for snapping shrimp, sea urchins and bivalves based on the scientific literature. All 1/3 octave bands analyzed, presented a circadian pattern, with higher SPL values in twilight, followed by the night period and with lower values in the daytime period. This is a characteristic pattern of invertebrates, which have a crepuscular peak of activity and remain active at night to feed. The months of February and March 2018, and December and January 2019 (summer and early autumn) showed the highest SPL values. Summer and winter were statistically different, except for the 2 kHz band. The abiotic factors with the highest correlations with the 1/3 octave bands were solar radiation and water temperature, factors directly related to the circadian pattern and metabolism of benthic invertebrates. The sounds of the most representative organisms in terms of acoustic energy were characterized using an automatic classification method based on unsupervised machine learning techniques. We identified three classes of snaps, which presented similar acoustic signatures, with most of the acoustic energy concentrated up to 8 kHz and frequency peaks varying between 3.7 and 4.55 kHz. Acoustic signatures patterns and the SPL of snaps are compatible with those registered by other authors for snapping shrimp. However, other benthic invertebrates, such as barnacles, bivalves and sea urchins, have high densities in the study area, and it is not possible to discard the hypothesis that the acoustic signatures represent snaps produced by a group of organisms.

Key-words: Passive acoustic monitoring, biophony, abiotic factors, machine learning, environmental biotechnology.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

FIGURA 1 – Componentes da Paisagem Acústica Submarina. Fonte: (CAMPBELL, 2018).	13
FIGURA 2 – Curvas de Wenz: espectro e frequência de fontes sonoras submarinas. Fonte: (MIKSIS-OLDS; BRADLEY; MAGGIE NIU, 2013) adaptado de (WENZ, 1962).	15
FIGURA 3 – Área de estudo localizada em Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brasil. O ponto verde representa a posição do sistema de aquisição acústico, o ponto azul indica o marégrafo e o ponto laranja localiza a estação meteorológica. Adaptado de Xavier (2021).	26
FIGURA 4 – Ilustração do sistema de aquisição acústica com o hidrofone posicionado a uma distância de 5 m do costão rochoso e a uma profundidade de 7,55 m. Estão delimitadas as faixas de distribuição dos invertebrados bentônicos dominantes na região. Adaptado de (KASSUGA; ALTVATER et al., 2017).	27
FIGURA 5 – Níveis de pressão sonora (SPL) para as bandas de 1/3 de oitava, entre 08 de fevereiro de 2018 a 31 de janeiro de 2019. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na ANOVA com o teste post-hoc de Tukey.	31
FIGURA 6 – Série temporal do nível de pressão sonora (SPL) para cada banda de 1/3 de oitava. O eixo x representa os dias do ano, o eixo y as horas do dia (UTC-3) e a barra de cores a variação do SPL. As falhas na gravação estão representadas pelas áreas brancas.	33
FIGURA 7 – Variação do nível de pressão sonora (SPL) de acordo com o período do dia para cada banda de 1/3 de oitava. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na ANOVA com o teste post-hoc de Tukey.	34
FIGURA 8 – Variação sazonal do nível de pressão sonora (SPL) para cada banda de 1/3 de oitava. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na ANOVA com o teste post-hoc de Tukey.	34
FIGURA 9 – Variação do nível de pressão sonora (SPL) para os meses do ano, para cada banda de 1/3 de oitava.	35

FIGURA 10 – Matriz diagonal de correlações de Spearman entre o SPL de cada banda de 1/3 de oitava e os fatores abióticos (temperatura- T, radiação solar- SR, velocidade do vento- WS, precipitação- R e maré- TD). A cor vermelha indica correlações positivas, enquanto que a cor azul indica correlações negativas.	36
FIGURA 11 – Análise de regressão múltipla, tendo como variáveis explicativas os fatores abióticos: temperatura- T, radiação solar- SR, maré- TD, velocidade do vento- WS e precipitação- R. O eixo x representa as bandas de 1/3 de oitava e o eixo y o valor do R^2 ajustado, demonstrando a contribuição total e isolada dos fatores abióticos.	38
FIGURA 12 – Um trecho do procedimento de detecção de estalos aplicado aos dados acústicos coletados. Os pontos laranjas indicam as detecções. a) amplitude da pressão acústica, b) espectrograma.	48
FIGURA 13 – Diagrama das etapas do método de classificação de estalos.	48
FIGURA 14 – Dendrograma gerado a partir do agrupamento hierárquico dos estalos, com base na distância euclidiana e no critério de ligação de Ward.	50
FIGURA 15 – Assinatura acústica dos grupos de estalos formados na análise de agrupamento.	50
FIGURA 16 – Análise de componentes principais entre as variáveis abióticas e o SPL registrado nos estalos em bandas de frequências de 1/3 de oitava. Os vetores em verde representam as variáveis abióticas (temperatura, maré e radiação solar) e as amostras representam os valores de SPL em cada banda de frequência.	51

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	12
2	OBJETIVOS	22
2.1	OBJETIVO GERAL	22
2.2	OBJETIVOS ESPECÍFICOS	22
3	HIPÓTESES	23
4	CAPÍTULO 1: PADRÕES TEMPORAIS DA ASSINATURA BIOACÚSTICA EM UM COSTÃO SUBTROPICAL NA ILHA DO CABO FRIO/RJ, BRASIL	24
4.1	INTRODUÇÃO	24
4.2	MATERIAL E MÉTODOS	26
4.2.1	Área de estudo	26
4.2.2	Aquisição de dados	27
4.2.2.1	Acústicos	27
4.2.2.2	Ambientais	28
4.2.3	Caracterização da comunidade bentônica local	28
4.2.4	Processamento de Dados e Análise espectral	28
4.2.5	Análise temporal e sazonal	29
4.3	INFLUÊNCIA DE FATORES ABIÓTICOS	30
4.4	RESULTADOS	31
4.4.1	Análise espectral	31
4.4.2	Análise temporal e sazonal	32
4.5	INFLUÊNCIA DE FATORES ABIÓTICOS	36
4.6	DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	38
5	CAPÍTULO 2: ANÁLISE DE SONS IMPULSIVOS PRODUZIDOS POR INVERTEBRADOS BENTÔNICOS	43
5.1	INTRODUÇÃO	43
5.2	MATERIAL E MÉTODOS	45
5.2.1	Monitoramento da paisagem acústica	45
5.2.2	Deteção de estalos	47
5.2.3	Método de classificação de estalos	47
5.2.3.1	Extração de características	47
5.2.3.2	Análise de agrupamento	48

	11
5.2.3.3 Assinatura acústica	49
5.2.3.4 Análise de componentes principais	49
5.3 RESULTADOS	49
5.3.1 Método de classificação de estalos	49
5.4 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES	52
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS	57
REFERÊNCIAS	59
APÊNDICES	73
APÊNDICE A	CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE INVERTEBRADOS
	BENTÔNICOS
	74

1 INTRODUÇÃO

Os primeiros estudos sobre paisagem acústica (do inglês *soundscape*) surgiram no final da década de 1960, com foco no ambiente urbano. E foi o pesquisador Michael Frank Southworth que deu início a essas pesquisas, a partir da defesa de sua dissertação de mestrado em planejamento urbano no *Massachusetts Institute of Technology* (MIT) (SOUTHWORTH, 1967). Sua dissertação serviu como base para a publicação do artigo científico "*The Sonic Environment of Cities*" em 1969 no jornal *Environment and Behavior*, considerado o primeiro trabalho a utilizar o termo paisagem acústica (SOUTHWORTH, 1969). Também no final da década de 1960, foi criado o *World Soundscape Project* (WSP), liderado por Raymond Murray Schafer, da *Simon Fraser University*, no Canadá. Este projeto surgiu como uma tentativa de chamar a atenção para o aumento da poluição sonora na cidade de Vancouver. Como resultado dos estudos feitos pelo WSP, Schafer publicou o livro "*The book of Noise*" (SCHAFER, 1970) e em 1977 reconheceu que os sons são propriedades ecológicas da paisagem, afirmando que as características acústicas de uma área podem refletir seus processos naturais (SCHAFER, 1977).

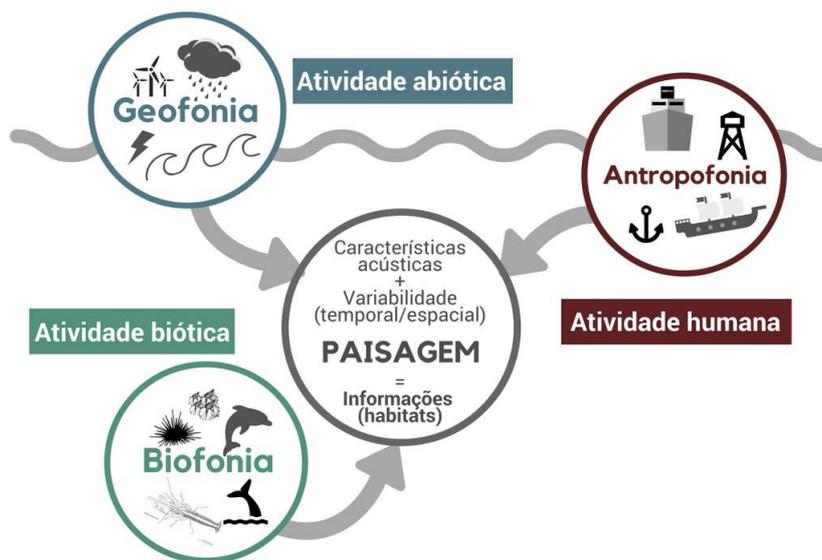
Desde então, o termo paisagem acústica tem sido usado para descrever a relação entre uma paisagem e sua composição acústica. Para caracterizar as componentes sonoras da paisagem, Krause (1987) adotou os termos biofonia e geofonia, sendo biofonia o conjunto de sons produzidos por todos os organismos vivos em um local durante determinado período e geofonia os sons originados do ambiente físico, ou seja, os sons de origem natural não biológica (vento, chuva, trovão, ondas, etc). Em 2011 o termo antropofonia foi introduzido por Pijanowski, Villanueva-Rivera et al. (2011), referindo-se aos sons produzidos pela atividade humana. A definição de paisagem acústica mais utilizada atualmente foi proposta em outro artigo por Pijanowski, Farina et al. (2011), como um arranjo complexo de sons de várias fontes, incluindo a biofonia, a geofonia e a antropofonia, que cria padrões acústicos no espaço e no tempo.

Em relação ao ambiente marinho, apesar dos hidrofones serem utilizados desde a Segunda Guerra Mundial (BURDIC, 2003), estudos científicos sobre paisagem acústica submarina só tiveram início a partir da década de 1990. Os hidrofones foram concebidos para monitorar o tráfego de submarinos, mas durante a sua utilização, foram captados outros sons, até então desconhecidos. A partir daí, surgiu a necessidade de identificar os sons produzidos pelos animais marinhos para diferenciá-los do ruído gerado pelos submarinos. Mas devido ao elevado custo e a confidencialidade desse tipo de trabalho, por muito tempo, os estudos dos sons subaquáticos ficaram restritos aos setores militar e industrial (STOCKER, 2002).

Em 1954, a Marinha dos Estados Unidos desenvolveu e implantou um sistema de escuta submarina chamado *Sound Surveillance System* - SOSUS. Este sistema tornou-se bastante preciso e capaz de monitorar submarinos e navios a longas distâncias, além dos sons biológicos presentes no ambiente. Mas foi só a partir da década de 1990, após o fim da Guerra Fria, que o SOSUS foi disponibilizado para a comunidade acadêmica, impulsionando os estudos no ambiente marinho (STOCKER, 2002).

Na figura 1 podem ser observados os elementos da paisagem acústica submarina. Dentre eles, a biofonia apresenta-se como uma componente bastante expressiva e complexa, devido a grande diversidade de organismos produzindo sons no oceano. Os mamíferos marinhos, peixes e o camarão-pistola são os animais mais conhecidos e estudados (STOCKER, 2002). Mais recentemente, invertebrados marinhos como bivalves, ouriços-do-mar e outros crustáceos têm despertado o interesse de pesquisadores (RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; BUSCAINO; FILICIOTTO et al., 2011; DI IORIO et al., 2012; COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016).

FIGURA 1 – Componentes da Paisagem Acústica Submarina. Fonte: (CAMPBELL, 2018).



A geofonia em ambientes marinhos corresponde principalmente à agitação de superfície, como o vento e as ondas, que produzem frequências entre 150 Hz e 200 Hz e entre 500 Hz e 50 kHz, respectivamente (HILDEBRAND, 2009; RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010). A chuva também tem influência, e gera um ruído característico na superfície (NYSTUEN et al., 2008). Esses elementos podem atingir 90 dB em áreas costeiras rasas (STOCKER, 2002). Outros fatores que podem gerar variabilidade temporal na paisagem acústica são as correntes e marés (LURTON, 2010).

Já as fontes de origem antropogênica estão relacionadas principalmente a navios e embarcações de pequeno porte e atividades industriais, associadas a frequências abaixo de 1 kHz (HILDEBRAND, 2009; DUARTE et al., 2021). Há diversos estudos

avaliando o impacto da antropofonia em organismos marinhos (WILLIAMS et al., 2015), como cetáceos (JENSEN et al., 2009; ERBE et al., 2019; PIRES et al., 2021), peixes (LADICH, 2008; CODARIN et al., 2009; SLABBEKOORN et al., 2010; NEDELEC et al., 2017; LESSA et al., 2023) e invertebrados (TIDAU; BRIFFA, 2016; HAWKINS; POPPER, 2017; HUBERT et al., 2018; MURCHY et al., 2019).

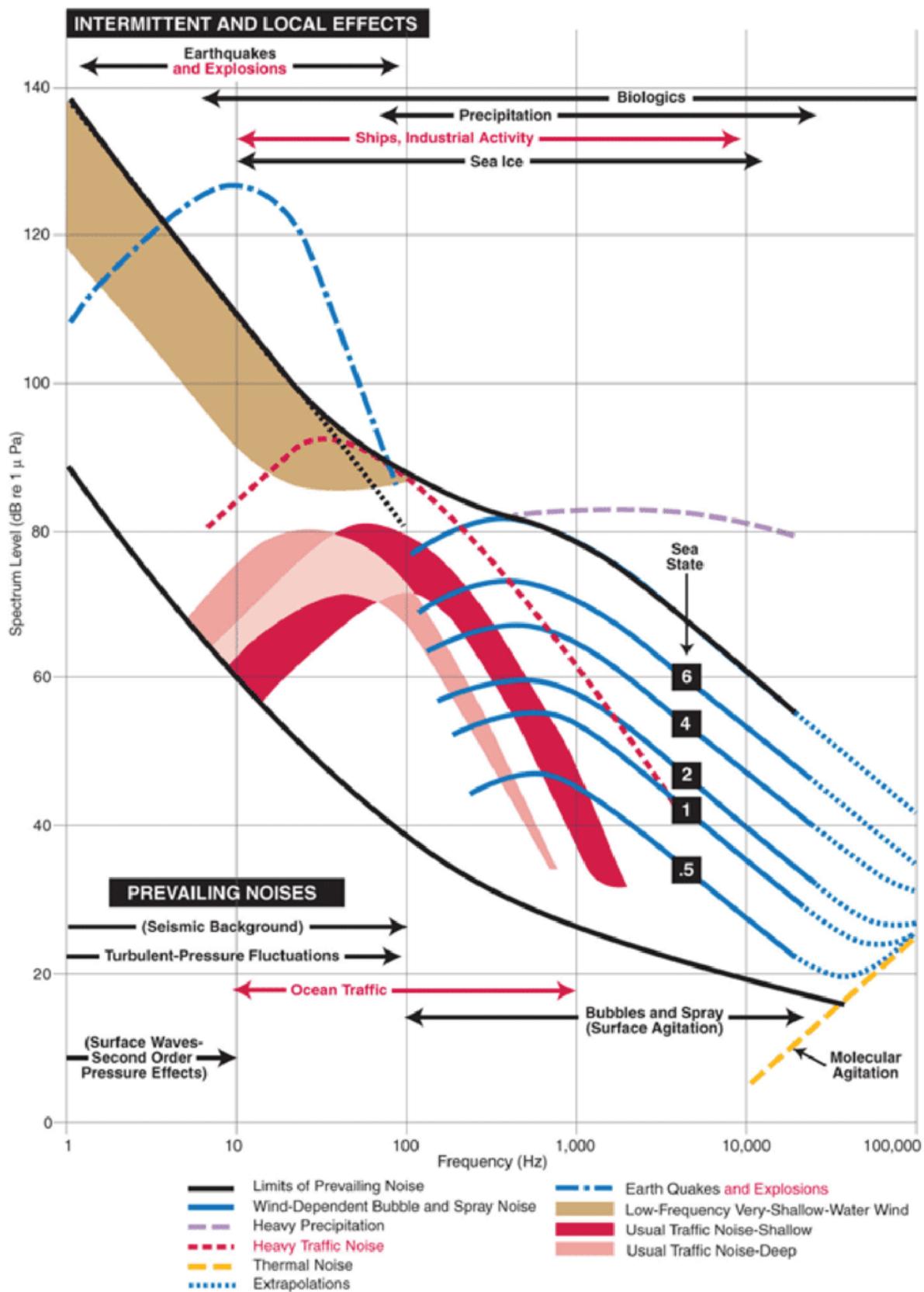
Um estudo de referência para a paisagem acústica submarina é o trabalho de Wenz (1962). O autor desenvolveu um gráfico que ficou conhecido por apresentar curvas que consideram a contribuição global de diversas fontes sonoras, e que apresenta uma estimativa da distribuição das frequências e dos níveis de energia destas fontes para o ambiente oceânico (Fig. 2). É possível verificar nesta figura que os sons de origem biológica apresentam uma ampla faixa de frequência, variando de aproximadamente 10 Hz até 100 kHz.

Em relação aos invertebrados bentônicos, esse grupo de organismos encontra-se fixo ou apresenta algum tipo de associação com o substrato, como por exemplo, os costões rochosos (LALLI; PARSONS, 1997). Diversos autores relatam a importância dos sons produzidos por esses organismos na composição da parcela biofônica em regiões costeiras, em sua maior parte acima da frequência de 2 kHz (AU; BANKS, 1998; FERGUSON; CLEARY, 2001; RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008a,b; RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; MCWILLIAM; HAWKINS, 2013; STAATERMAN et al., 2013; COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016; BORIE et al., 2015).

A maioria dos invertebrados bentônicos produz sons não intencionais, incidentes de sua movimentação e alimentação, pela fricção das partes duras de seus corpos umas contra as outras e contra o substrato (FARINA, 2013; FREEMAN et al., 2014). Alguns podem produzir sons intencionais, como os camarões-pistola (VERSLUIS et al., 2000), lagostas (PATEK; SHIPP; STAATERMAN, 2009) e caranguejos (POPPER; SALMON; HORCH, 2001), para defesa e comunicação. Entre os invertebrados bentônicos que produzem sons em costões rochosos, pode-se destacar os camarões-pistola, os ouriços-do-mar, os bivalves e as cracas.

O camarão-pistola (ou camarão-estalo) é o invertebrado marinho mais estudado, e a frequência de seu estalo pode ir de 1 kHz a mais de 200 kHz (AU; BANKS, 1998; FERGUSON; CLEARY, 2001; CATO; NOAD; MCCAULEY, 2005; CHITRE; POTTER; ONG, 2006; HUNTERA; FILLINGERA; CLARIJS, 2014; BORIE et al., 2015). Estes crustáceos produzem um som intencional, utilizado para atordoar suas presas e para interações coespecíficas, incluindo defesas territoriais (KNOWLTON; MOULTON, 1963; NOLAN; SALMON, 1970). Os indivíduos adultos possuem apenas alguns centímetros de comprimento, mas apresentam uma garra que pode atingir metade do tamanho de seu corpo. Ao fechar rapidamente sua garra, é gerada uma bolha de cavitação, que ao estourar, emite um ruído muito alto e impulsivo (LOHSE; SCHMITZ; VERSLUIS,

FIGURA 2 – Curvas de Wenz: espectro e frequência de fontes sonoras submarinas. Fonte: (MIKSIS-OLDS; BRADLEY; MAGGIE NIU, 2013) adaptado de (WENZ, 1962).



2001; VERSLUIS et al., 2000). Existem centenas de espécies de camarões-pistola, que pertencem à Família Alpheidae. Entretanto, apenas os gêneros *Alpheus* e *Synalpheus* são reconhecidos por produzirem sons de estalo vigorosos (JOHNSON; EVEREST; YOUNG, 1947). Desde a década de 1940, os camarões-pistola são reconhecidos como os organismos mais representativos na produção de sons em águas rasas (profundidade inferior a 10 m) (JOHNSON; EVEREST; YOUNG, 1947; EVEREST; YOUNG; JOHNSON, 1948; AU; BANKS, 1998).

Já os ouriços-do-mar são invertebrados abundantes no ambiente costeiro, e se alimentam raspando as algas fixadas nos costões rochosos (SÁNCHEZ-JÉREZ et al., 2001; CORDEIRO; HARBORNE; FERREIRA, 2014; VENTURA; TAVARES, 2020). Segundo Coquereau, Grall, Chauvaud et al. (2016), o som proveniente de sua alimentação pode ser dividido em duas partes: o som inicial proveniente da alimentação propriamente dita (durante o fechamento da lanterna de Aristóteles) quando é produzido um pico de frequência ultrassônico entre 37 e 49 kHz, e outro pico em frequências intermediárias (3 a 6 kHz) que corresponde ao efeito da ressonância em seu esqueleto calcáreo. Radford, Jeffs, Tindle et al. (2008a) demonstraram que o esqueleto ovoide dos ouriços atua como uma câmara de ressonância de Helmholtz, amplificando o som e gerando uma potência acústica suficiente para que estes organismos sejam representativos na formação da biofonia, entre as frequências de 800 Hz e 2,8 kHz.

Algumas espécies de bivalves podem formar grandes populações, construindo bancos compactos e complexos em ambientes rochosos (MONTEIRO et al., 2020). Estes organismos possuem um movimento mais frequente, chamado de adução de valvas (*coughing*), associada à expulsão de água, fezes e outras substâncias da cavidade do manto. Esse movimento produz um som característico, inicialmente produzido pela fricção das duas valvas e logo em seguida devido a turbulência do fluxo de água. Di Iorio et al. (2012) observou frequências na faixa do ultrassom, entre 20 e 27 kHz para o bivalve *Pecten maximus*. Já Melo Júnior et al. (2019) realizaram experimentos em laboratório e verificaram que os sons gerados pelo bivalve *Perna perna* foram associados ao movimento de suas valvas, sendo classificados como impulsivos e com pico de frequência entre 4 e 6 kHz.

As cracas estão entre os principais organismos bioincrustantes de costões rochosos, e apresentam elevadas densidades nesse ambiente (KASSUGA; COSTA et al., 2020). O som gerado por esses animais ocorre ao abrir e fechar suas placas calcárias e pelo movimento de seus apêndices, podendo ser captado por muitos quilômetros de distância (FRINGS; FRINGS, 1977). Os estudos encontrados na literatura científica são antigos e não abordam a faixa de frequência relacionada à produção de som pelas cracas (BUSNEL; DZIEDZIC, 1962; FISH, 1963). Budelmann (1992), por exemplo, relata que são sons rítmicos que consistem em pulsos de 1 a 3 ms com

picos de amplitude de $70 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}^2$. De forma exploratória, foram feitas gravações no Laboratório de Cultivo de Invertebrados Marinhos (IEAPM), onde o som gerado pelas cracas foi detectado no intervalo de 2 a 24 kHz, com níveis de pressão acústica variando de 58 a $65 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}^2$, aproximadamente (MINELLO; BARROSO et al., 2022).

A presença de determinadas espécies nas comunidades biológicas, faz com que os ambientes marinhos apresentem assinaturas acústicas diferentes (RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; RADFORD; STANLEY; JEFFS, 2014). Essas diferenças são importantes para alguns processos ecológicos, como por exemplo, a orientação de larvas de peixes e crustáceos. Diversos estudos apresentam evidências de que a assinatura acústica é utilizada por essas larvas para localizar o ambiente adequado em que devem se estabelecer (TOLIMIERI; JEFFS; MONTGOMERY, 2000; RADFORD; JEFFS; MONTGOMERY, 2007; SIMPSON et al., 2011).

A biofonia também apresenta grande variabilidade temporal e espacial em águas costeiras, sendo afetada pela diversidade de habitats e de comunidades biológicas (RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010), pela atividade humana e por fatores abióticos (MERCHANT et al., 2015). Entretanto, podem ser reconhecidos alguns padrões. Por exemplo, a presença de sons como estalos, cliques e sussurros são bastante característicos em ambientes de costões rochosos. Geralmente são sons curtos, impulsivos e de banda larga, associados aos invertebrados bentônicos. Quando muitos indivíduos estão em atividade, estes sons se fundem em um ruído quase contínuo que se assemelha a um som de fritura, chamado de coro bioacústico de invertebrados (SIMMONDS; MACLENNAN, 2008). Esse coro ocorre logo após o pôr do sol e antes do nascer do sol (*dusk and dawn choruses*). Nesses períodos, a intensidade do som pode aumentar de 10 a $20 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}^2$ em relação ao período diurno (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008a; RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010).

Em regiões tropicais e temperadas, ocorre um padrão diário para a biofonia de invertebrados com a diminuição na intensidade sonora durante o período diurno, o aumento durante a noite e picos no anoitecer e no amanhecer (BERTUCCI et al., 2016; KAPLAN et al., 2018; XAVIER, 2021). Além do padrão circadiano citado acima, alguns autores relatam padrões temporais no som de origem biológica, relacionadas a fase da lua e às estações do ano (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b; RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010). Radford, Stanley, Tindle et al. (2010) relacionaram a maior intensidade dos sons a lua nova e sons menos intensos a lua cheia. Em relação às estações do ano, os mesmos autores relataram sons mais intensos no verão.

A partir do início da década de 2010, o monitoramento da paisagem acústica submarina vem se tornando uma ferramenta utilizada por diversos pesquisadores para a caracterização e para o monitoramento da qualidade ambiental de ambientes costeiros

(RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; LILLIS; EGGLESTON; BOHNENSTIEHL, 2014). O som é considerado um componente do ecossistema (HARRIS; RADFORD, 2014), e este tipo de monitoramento pode fornecer detalhes sobre o ambiente em tempo real, e também evidenciar efeitos das atividades humanas ou distúrbios naturais, que podem alterar o padrão natural da paisagem acústica (MOONEY et al., 2020). Outro fator relevante é que este tipo de monitoramento é realizado de forma passiva, isto é, envolve apenas a gravação dos sons do ambiente. Dessa forma, o monitoramento acústico passivo se destaca por ser um método menos invasivo e que pode ser implementado em locais onde os métodos tradicionais (como observações visuais e coleta de organismos) não são possíveis de serem utilizados (BORIE et al., 2015).

Entre os monitoramentos acústicos de longo prazo publicados, pode-se destacar os trabalhos de Buscaino, Ceraulo et al. (2016) e Bohnenstiehl, Lillis e Eggleston (2016). Buscaino, Ceraulo et al. (2016) estudaram o padrão temporal da paisagem acústica submarina de águas rasas de uma área protegida no Mediterrâneo pelo período de 1 ano. Os autores evidenciaram que as frequências inferiores a 1 kHz foram dominadas pelo som produzido pelas ondas, e abaixo de 2 kHz foi registrado o coro de peixes e a interferência da passagem de navios no ambiente. Entre 4 e 16 kHz, os autores relatam a maior representatividade dos camarões-estalo. Bohnenstiehl, Lillis e Eggleston (2016) avaliaram também por 1 ano, o padrão temporal de um ambiente estuarino na Carolina do Norte, especificamente voltado para os sons produzidos pelo camarão-estalo. Os pesquisadores relataram uma maior atividade acústica do camarão no verão em relação ao inverno. Também observaram que as taxas de estalos desses organismos foram positivamente correlacionadas com a temperatura da água. É um dos poucos estudos sobre o comportamento acústico de um invertebrado que também contempla a variação temporal.

O monitoramento e o estudo da paisagem acústica submarina têm apresentado grandes avanços no âmbito internacional, mas no Brasil ainda é uma área pouco explorada. Recentemente vem ganhando importância devido às exigências do IBAMA – Instituto Brasileiro do Meio Ambiente e dos Recursos Naturais Renováveis - para o licenciamento ambiental de atividades sísmicas e de Exploração e Produção (E&P) de petróleo, sendo as pesquisas impulsionadas principalmente pelo monitoramento de cetáceos (PIRES et al., 2021). Um exemplo é o Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina na Bacia de Santos (PMPAS-BS), que é uma contrapartida mitigatória exigida pelo IBAMA à PETROBRAS para a concessão do licenciamento ambiental para as atividades desenvolvidas no polo pré-sal da Bacia de Santos. O projeto teve seu início efetivo em 2015 e conta com a participação do Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM). Seu objetivo é a caracterização e o monitoramento da paisagem acústica submarina para avaliação dos impactos da introdução dos ruídos antropogênicos no meio marinho decorrentes das atividades de E&P (PETROBRAS, 2017). Foram

levantados dados de áreas costeiras e oceânicas da Bacia de Santos, estabelecendo os níveis de ruído submarino tanto de regiões pristinas quanto de regiões impactadas por atividades antropogênicas (LIMA et al., 2022).

Existem alguns grupos de pesquisas em Universidades e Institutos de Ciência, Tecnologia e Inovação brasileiros desenvolvendo trabalhos nesta área. No IEAPM, a Divisão de Bioacústica em conjunto com a Divisão de Oceanografia Biológica, têm produzido trabalhos na região de Arraial do Cabo, abordando a biofonia, a antropofonia e a influência da ressurgência na paisagem acústica submarina (CAMPBELL, D. et al., 2017; MENDES, 2018, 2021; CAMPBELL et al., 2019; LOUZA et al., 2019; MELO JÚNIOR, 2019; MELO JÚNIOR et al., 2019; JESUS et al., 2020; RAMOS; MINELLO; XAVIER, 2020; XAVIER, 2021; MINELLO; CALADO; XAVIER, 2021; MINELLO; BARROSO et al., 2022; RAMOS, 2023). Um outro exemplo é o Laboratório de Mamíferos Aquáticos e Bioindicadores Profa. Izabel M. G. do N. Gurgel (MAQUA) da Universidade do Estado do Rio de Janeiro (UERJ), que atua no estudo da paisagem acústica submarina e da biofonia de cetáceos. Podem ser destacados os artigos de Bittencourt, Carvalho et al. (2014), Bittencourt, Barbosa, Secchi et al. (2016), Bittencourt, Lima et al. (2017) e Bittencourt, Barbosa, Bisi et al. (2020). O Laboratório de Acústica e Meio Ambiente (LACMAM) da Universidade de São Paulo (USP) desenvolve tecnologia para a produção de equipamentos e softwares de análise de dados, além do estudo de paisagens acústicas subaquáticas em pequenas escalas de tempo e estudos de bioacústica submarina com peixes e cetáceos (SÁNCHEZ-GENDRIZ; PADOVESE, 2014, 2015, 2016, 2017; SANCHEZ-GENDRIZ; PADOVESE, 2017).¹

A partir da década de 1990, os avanços da tecnologia permitiram que diversos equipamentos acústicos associados a sistemas de aquisição de dados, começassem a coletar e armazenar grandes volumes de dados amostrados. Nesses casos, a análise manual dos sons é um processo demorado e está sujeito às variações individuais de quem os analisa (DUC et al., 2021), se tornando impraticável em longos períodos de amostragem (meses a anos). Com isso houve um crescimento no desenvolvimento de ferramentas computacionais para auxiliar o homem a analisar e interpretar esses dados de forma automática (MANNILA, 1996).

Para extrair informações e analisar esses grandes volumes de dados acústicos, técnicas de Aprendizado de Máquina (*Machine Learning - ML*) vem sendo utilizado pela comunidade científica e se tornando uma tecnologia em expansão (JORDAN; MITCHELL, 2015; BIANCO et al., 2019). O Aprendizado de Máquina pode ser definido como a aplicação de técnicas de inteligência artificial com o objetivo de identificar padrões discriminatórios nos dados, sendo uma ferramenta que auxilia na descrição

¹ A maioria dos trabalhos realizados no Brasil apresenta períodos de amostragem de no máximo três meses.

desses dados e também a fazer previsões a partir deles (WITTEN; FRANK; HALL, 2011). Algumas das técnicas utilizadas derivam da estatística, enquanto outras estão associadas a ciência da computação (WITTEN; FRANK; HALL, 2011).

As técnicas de ML podem ser divididas em supervisionadas e não supervisionadas. No Aprendizado de Máquina Supervisionado o objetivo é encontrar relações ou estruturas específicas nos dados de entrada que permitam descrever ou prever dados de saída corretos (classes). As classes devem ser conhecidas *a priori*, e a saída "correta" é determinada a partir dos dados de treinamento. As tarefas utilizadas para o aprendizado supervisionado são a classificação e a regressão (*random forest*) (WITTEN; FRANK; HALL, 2011). O objetivo do Aprendizado de Máquina Não Supervisionado é inferir a estrutura inerente ao conjunto de dados, e não fornece saídas rotuladas. Análises de agrupamento (ou clusterização), estimativa de densidade e aprendizado de representação são as tarefas mais comuns. Entre os algoritmos utilizados estão o agrupamento *k-means*, análise de componentes principais (PCA) e auto codificadores (WITTEN; FRANK; HALL, 2011).

No ambiente marinho, o uso de algoritmos automáticos a partir de técnicas de aprendizado de máquina têm sido utilizadas pela comunidade científica para a detecção e medição de sinais acústicos e como ferramentas de classificação (NODA; TRAVIESO; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, 2016; MALFANTE; MARS et al., 2018; BIANCO et al., 2019; BARKLEY et al., 2019; WADDELL; RASMUSSEN; ŠIROVIĆ, 2021; FRASIER, 2021). Neste contexto, a realização de monitoramentos acústicos passivos e o desenvolvimento de métodos não invasivos de identificação e classificação de organismos, são ferramentas importantes para o estudo, conservação e preservação dos oceanos. Estes tipos de pesquisa se encaixam na área de Biotecnologia Ambiental, que por definição, compreende o desenvolvimento, o uso e a regulação de sistemas biológicos para aplicações em produtos ou serviços nas áreas de monitoramento ambiental, biorremediação, biofertilizantes, bioplásticos e biopesticidas (SINGH, 2017). No ambiente marinho, a Biotecnologia Ambiental está presente em diversas atividades de pesquisa, onde se utiliza um sistema biológico marinho para obter informações sobre o ambiente em que ele está inserido.

Outro fato relevante, é que este tipo de pesquisa também está alinhado a um dos objetivos principais da Década da Ciência Oceânica para o Desenvolvimento Sustentável (também conhecida como Década dos Oceanos), que incentiva o desenvolvimento de sistemas de monitoramento ambiental marinho sustentáveis que facilitem o aumento do conhecimento sobre os oceanos (CLAUDET et al., 2020). A Década dos Oceanos foi declarada pela Organização das Nações Unidas em 2017 e compreende o período de 2021 a 2030 (VISBECK, 2018).

Ressalta-se assim, a necessidade da realização de monitoramentos acústicos

passivos de longo prazo em ecossistemas costeiros brasileiros e com uma maior abrangência dos organismos alvo, como os invertebrados bentônicos. A caracterização de padrões espectrais e sazonais da paisagem acústica submarina promove o conhecimento do comportamento bioacústico de sua comunidade de forma mais ampla, além de fornecer informações que viabilizem a identificação de possíveis mudanças nos ecossistemas. Além disso, a utilização e o desenvolvimento de métodos baseados em técnicas de aprendizado de máquina, contribui para a análise de grandes volumes de dados gerados nos monitoramentos de longo prazo.

A presente tese está dividida em 6 partes principais. A primeira parte é relativa a uma introdução geral sobre aspectos relevantes da paisagem acústica submarina. A segunda e a terceira partes apresentam os objetivos e as hipóteses do trabalho, respectivamente. A quarta e a quinta partes estão relacionadas aos capítulos 1 e 2, que foram desenvolvidos no formato de artigos. No capítulo 1 é apresentada uma caracterização da paisagem acústica submarina com foco em invertebrados bentônicos, permitindo o registro de informações ainda não descritas para a área de estudo. No capítulo 2 foi realizado um estudo aplicado para analisar e identificar os organismos mais representativos da paisagem acústica local. Por fim, a sexta parte apresenta as principais conclusões deste estudo e sugestões para trabalhos futuros.

2 OBJETIVOS

2.1 OBJETIVO GERAL

Avaliar os padrões acústicos da paisagem acústica submarina, com ênfase nos sons produzidos por invertebrados de um costão rochoso da Ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo – RJ.

2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Analisar o padrão circadiano e sazonal da assinatura bioacústica local.
- Avaliar a influência dos fatores abióticos na assinatura bioacústica local.
- Analisar e identificar os sons produzidos por invertebrados bentônicos a partir de um método de classificação de estalos.

3 HIPÓTESES

- Os padrões acústicos de invertebrados bentônicos apresentam características circadianas e sazonais.
- A atividade acústica dos invertebrados bentônicos é dependente de fatores abióticos.
- Os estalos produzidos por invertebrados podem ser agrupados a partir de características espectrais.

4 CAPÍTULO 1: PADRÕES TEMPORAIS DA ASSINATURA BIOACÚSTICA EM UM COSTÃO SUBTROPICAL NA ILHA DO CABO FRIO/RJ, BRASIL

Abstract:

Benthic invertebrates are representative organisms of the acoustic signature of rocky shores. To analyze temporal patterns and the influence of abiotic factors on the bioacoustic signature in Cabo Frio Island rocky shore, Arraial do Cabo, Brazil, passive acoustic monitoring was carried out for a period of one year. The SPL was calculated in 10 frequency bands of 1/3 octave, which represent the frequency range characteristic of benthic invertebrates. Spectral, temporal and seasonal analysis, and the influence of abiotic factors were performed in each band. In spectral analysis, the highest SPL values occurred in the 4, 5 and 6.3 kHz bands, which correspond to the frequency peaks recorded for snapping shrimp, sea urchins and bivalves in scientific literature. The lowest SPL values were found in the 2 and 16 kHz bands, possibly being transition bands where there is overlapping of anthropogenic sounds and those of other groups of marine organisms. A circadian pattern was identified in all 1/3 octave bands, more intense between 3.15 and 10 kHz, with higher values in twilight, followed by the night period and with lower values in the daytime period. This pattern is recognized for invertebrates, which have a crepuscular activity peak and remain active at night for feeding. The months with the highest SPL values correspond to summer and early autumn (February and March/2018 and December and January/2019). Statistically significant differences were observed between summer and winter, except for the 2 kHz band. The abiotic factors with the highest correlations with the 1/3 octave bands were solar radiation and water temperature, factors directly related to the circadian pattern and metabolism of benthic invertebrates. Regression analysis showed that temperature, solar radiation, sea level and precipitation together explained approximately 58% of data variance in the 6.3 kHz band. The present study contributed to the characterization of the local bioacoustic signature, and may be used as a reference for identifying possible alterations in the acoustic soundscape of the region.

Keywords: Temporal patterns, Marine soundscape, Passive acoustic monitoring, and Environmental biotechnology.

4.1 INTRODUÇÃO

O Brasil apresenta uma grande diversidade de ecossistemas ao longo de sua costa, cada um com características físicas e comunidades biológicas diferentes. Dentre eles, estão os costões rochosos, que encontram-se entre os ambientes costeiros mais produtivos do planeta, apresentando elevada riqueza de espécies de importância

ecológica e econômica (COUTINHO; YAGINUMA et al., 2016). Os costões rochosos apresentam uma comunidade de espécies complexa, com vários grupos de organismos fixos ou associados ao substrato (NYBAKKEN, 1988; LALLI; PARSONS, 1997; COUTINHO; ZALMON, 2009; MESSANO et al., 2020). Um desses grupos é o dos invertebrados bentônicos, compostos por poríferos, cnidários, moluscos, anelídeos, crustáceos, equinodermos, entre outros (COUTINHO; ZALMON, 2009).

Diversos autores relatam a importância dos sons produzidos por invertebrados bentônicos na assinatura acústica de ambientes costeiros, sendo os mais representativos os camarões-pistola, os ouriços-do-mar, os bivalves e as cracas (AU; BANKS, 1998; FERGUSON; CLEARY, 2001; RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008a,b; MCWILLIAM; HAWKINS, 2013; STAATERMAN et al., 2013; COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016; BORIE et al., 2015; MELO JÚNIOR, 2019; MELO JÚNIOR et al., 2019).

Cada ecossistema possui uma assinatura bioacústica diferente (RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; RADFORD; STANLEY; JEFFS, 2014), que sofre a influência de fatores abióticos como radiação solar, temperatura, maré, vento, precipitação, fazendo com que cada ambiente apresente características temporais, espaciais, espectrais e sazonais (TESSMAR-RAIBLE; RAIBLE; ARBOLEDA, 2011; BOHNENSTIEHL; LILLIS; EGGLESTON, 2016; MCWILLIAM; MCCAULEY et al., 2017; LILLIS; MOONEY, 2018). Entretanto, podem ser reconhecidos alguns padrões comuns a áreas costeiras, como por exemplo, o coro bioacústico de invertebrados bentônicos, que ocorre logo após o pôr do sol e antes do nascer do sol (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b; BERTUCCI et al., 2016; KAPLAN et al., 2018). Nesses períodos, muitos indivíduos estão em atividade, e os sons produzidos por eles se fundem em um som quase contínuo (SIMMONDS; MACLENNAN, 2008).

Para avaliar os padrões da paisagem acústica e a assinatura bioacústica de diversos ecossistemas, o monitoramento acústico passivo vem sendo utilizado pela comunidade científica. Monitoramentos de longo prazo, permitem a avaliação das características e padrões de cada ambiente, além da possibilidade de evidenciar efeitos das atividades humanas ou distúrbios naturais no local (BUSCAINO; CERAULO et al., 2016; BOHNENSTIEHL; LILLIS; EGGLESTON, 2016; MOONEY et al., 2020).

Mas no Brasil, monitoramentos da paisagem acústica de ecossistemas marinhos ainda são pouco publicados. Em sua maioria, são estudos realizados em períodos inferiores a 3 meses de amostragem, abordando principalmente a antropofonia (BITTENCOURT; CARVALHO et al., 2014; BITTENCOURT; BARBOSA; BISI et al., 2020; LIMA et al., 2022) e a biofonia de cetáceos e peixes (BITTENCOURT; BARBOSA; SECCHI et al., 2016; SÁNCHEZ-GENDRIZ; PADOVESE, 2016; SANCHEZ-GENDRIZ; PADOVESE, 2017).

Nesse sentido, o presente trabalho visa contribuir para o conhecimento de

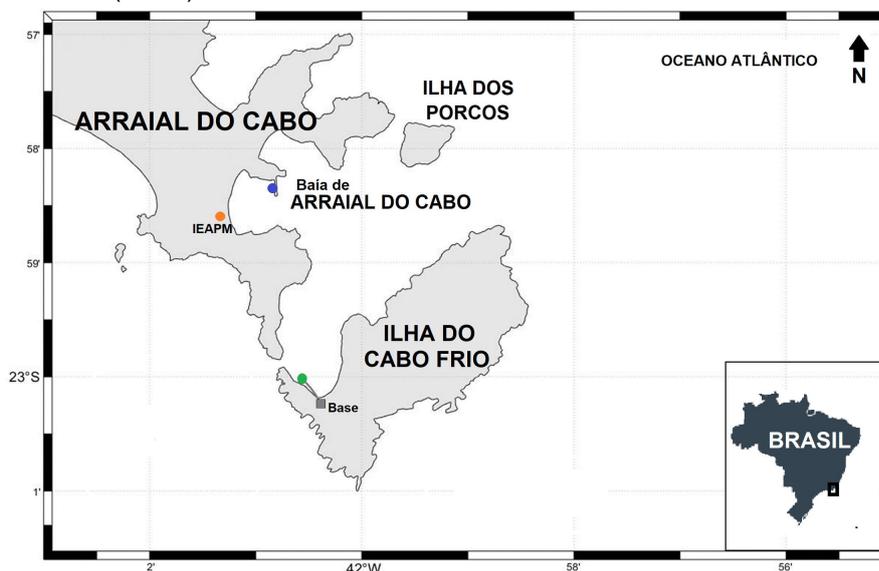
características espectrais e sazonais da paisagem acústica de um ambiente costeiro brasileiro. Os objetivos são: analisar os padrões temporais e a influência dos fatores abióticos na assinatura bioacústica de um costão rochoso na Ilha do Cabo Frio, com ênfase nos invertebrados bentônicos. As hipóteses testadas foram que: (1) os padrões acústicos de invertebrados bentônicos apresentam características circadianas e sazonais e (2) a atividade acústica dos invertebrados bentônicos é dependente de fatores abióticos.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Área de estudo

A área de estudos localiza-se na Reserva Extrativista Marinha de Arraial do Cabo, região sudeste do Brasil (Fig. 3). Arraial do Cabo é considerado o local de maior frequência e intensidade da ressurgência costeira do país (MIRANDA, 1985; COELHO-SOUZA et al., 2012), fenômeno oceanográfico que contribui para o aumento da riqueza de habitats e da diversidade de espécies na região (VALENTIN; COUTINHO, 1990; CALADO et al., 2020).

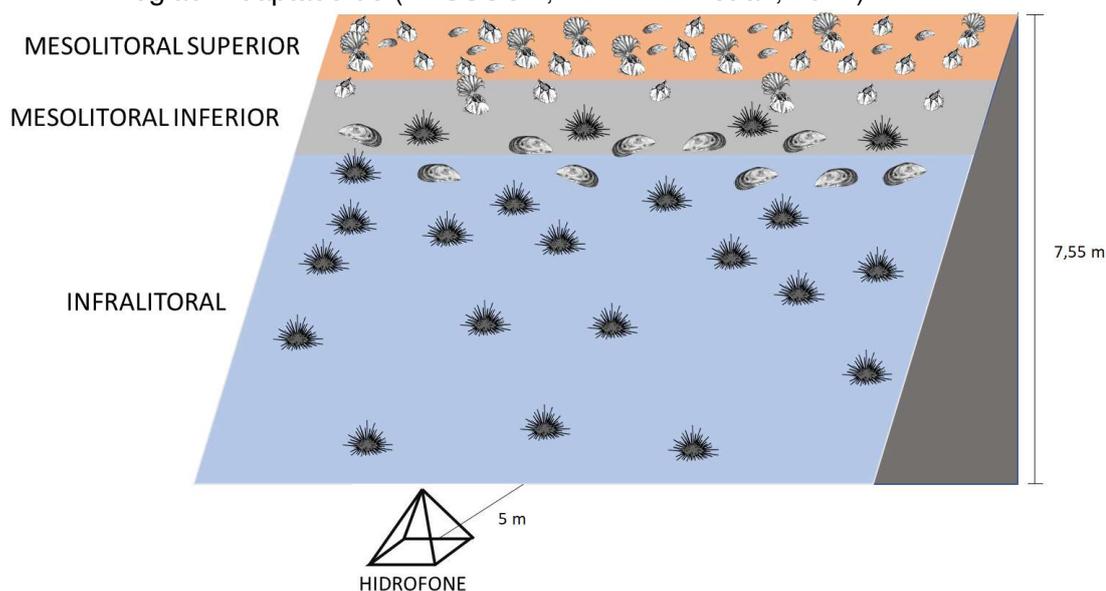
FIGURA 3 – Área de estudo localizada em Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brasil. O ponto verde representa a posição do sistema de aquisição acústico, o ponto azul indica o marégrafo e o ponto laranja localiza a estação meteorológica. Adaptado de Xavier (2021).



O ecossistema objeto deste estudo foi um costão rochoso na Ilha do Cabo Frio (Fig. 3), formado por afloramentos de rochas cristalinas, situados na transição entre os ambientes terrestre e marinho (COUTINHO; YAGINUMA et al., 2016). Uma das características mais marcantes deste ambiente é o padrão de zonação vertical, onde os organismos bentônicos são distribuídos em faixas (Fig. 4). Esse padrão ocorre devido a interação de fatores abióticos e bióticos, que favorecem a sobrevivência de

determinados organismos em cada zona. As principais zonas são: Supralitoral, área emersa que recebe apenas os borrifos das ondas; Mediolitoral (ou Mesolitoral), é a faixa entre-marés, onde a comunidade bentônica está sujeita a períodos alternados de total imersão ou emersão; e Infralitoral, que é a área permanentemente submersa (COUTINHO; ZALMON, 2009; MESSANO et al., 2020).

FIGURA 4 – Ilustração do sistema de aquisição acústica com o hidrofone posicionado a uma distância de 5 m do costão rochoso e a uma profundidade de 7,55 m. Estão delimitadas as faixas de distribuição dos invertebrados bentônicos dominantes na região. Adaptado de (KASSUGA; ALTVATER et al., 2017).



4.2.2 Aquisição de dados

4.2.2.1 Acústicos

Os dados acústicos foram coletados durante o monitoramento realizado pelo projeto BIOCUM¹, fomentado pelo Programa Ciência Sem Fronteiras do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq). O projeto foi executado pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) em parceria com a Universidade do Algarve de Portugal. Teve como objetivo principal o estudo de padrões bioacústicos e suas características para aplicação na modulação de sinais para comunicações submarinas (LOUZA et al., 2019).

As gravações acústicas foram realizadas por meio de um sistema fixo de aquisição, composto por uma estrutura de proteção, um hidrofone modelo digitalHyd TP1-4A da Marsensing Ltda e um cabo de energia e transmissão de dados conectado a uma estação em terra. O sistema foi posicionado no fundo a 5 m de um costão rochoso da Ilha do Cabo Frio, a uma profundidade de 7,55 m (Fig. 4). O hidrofone registrou a

¹ Projeto de Construção de Métodos de Sinalização com Características de Ruídos Bioacústicos para Comunicação Submarina

série temporal com uma frequência de amostragem de 52.734 Hz, resolução de 24 bits, sensibilidade de -174,9 dB re 1V/1 μ Pa e resposta plana entre 0,1 e 40 kHz.

Os dados foram coletados de 08 de fevereiro de 2018 a 31 de janeiro de 2019 com uma taxa de amostragem (*duty cycle*) de 20% (1 min a cada 5 min, 12 minutos por hora), totalizando 1.403 horas de gravação. Os registros acústicos foram armazenados em arquivos de 1 min do tipo *wav file*. Algumas falhas ocorreram nas aquisições de dados devido ao vandalismo, quedas de energia e problemas no sistema autônomo. Essas falhas foram inferiores a 20% do período amostrado, e não comprometeram a análise sazonal dos dados.

4.2.2.2 Ambientais

Os dados de temperatura foram obtidos a partir de sensores do tipo *datalogger* (HOBO Pendant, Onset Computer Corporation) instalados na estrutura de proteção do sistema autônomo, registrando 1 medida a cada 10 minutos.

A Divisão de Oceanografia Física do IEAPM disponibilizou os dados de maré, registrados por um marégrafo instalado no Porto do Forno, com uma taxa de aquisição de 1 medida por minuto.

Os dados de radiação solar, velocidade do vento e precipitação foram coletados por uma estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalada dentro do IEAPM, a uma taxa de 1 medida por hora.

4.2.3 Caracterização da comunidade bentônica local

De modo a subsidiar os resultados do projeto BIOCUM, foi realizado um levantamento da fauna marinha no costão rochoso próximo ao hidrofone. Esse levantamento destacou quatro grupos de organismos, por apresentarem maior interesse para os estudos de Bioacústica: Cirripedia (cracas), Bivalvia (mexilhões), Echinoidea (ouriços-do-mar) e Decapoda > Alpheidae (camarões-estalo) (KASSUGA; ALTVATER et al., 2017). Os organismos registrados são característicos e bem definidos para cada zona dos costões rochosos localizados na Baía de Arraial do Cabo (COUTINHO; ZALMON, 2009; MESSANO et al., 2020).

4.2.4 Processamento de Dados e Análise espectral

Os dados foram processados e analisados usando a linguagem de programação Python e seus módulos de computação científica.

O Nível de Pressão Sonora (*Sound Pressure Level* - SPL) foi calculado para toda a série temporal amostrada. O SPL é considerado a métrica mais apropriada

para expressar o ruído ambiente em monitoramentos contínuos do som em ambientes aquáticos (ROBINSON; LEPPER; HAZELWOOD, 2014).

Para o cálculo do SPL, cada arquivo de áudio de um minuto (*wav file*) foi dividido em 60 blocos de um segundo. Para cada bloco de um segundo foi calculada a Densidade Espectral de Potência (*Power Spectral Density* – PSD) usando o periodograma de Welch (da biblioteca Scipy do Python) com sobreposição (*overlap*) de 50% e uma resolução de 8192 pontos. A partir dessas 60 PSDs, foi estimado o SPL₅₀ (50º percentil do SPL ou mediana) para cada 60 s.

Em seguida, foi calculado o valor de SPL₅₀ em 10 bandas de 1/3 de oitava. As frequências centrais (limite inferior e limite superior) são as seguintes: 2 (1,778 a 2,239 kHz), 2,5 (2,239 a 2,818 kHz), 3,15 (2,818 a 3,548 kHz), 4 (3,548 a 4,467 kHz), 5 (4,467 a 5,623 kHz), 6,3 (5,623 a 7,079 kHz), 8 (7,079 a 8,913 kHz), 10 (8,913 a 11,220 kHz), 12,5 (11,220 a 14,130 kHz) e 16 (14,130 a 17,780 kHz) kHz. Uma oitava simples é uma banda de frequência, onde a frequência maior é o dobro da frequência menor. Uma banda de 1/3 de oitava é a terça parte de uma oitava simples. Por razões práticas, os valores de frequência central são arredondados para números inteiros convenientes (ANSI, 2009). As bandas de 1/3 de oitava foram escolhidas por serem padronizadas pela Sociedade Acústica Americana (*Acoustical Society of America* - ASA), além de seu uso ser recomendado em estudos de ruídos submarinos (ROBINSON; LEPPER; HAZELWOOD, 2014).

4.2.5 Análise temporal e sazonal

Para possibilitar a visualização do SPL por banda de frequência e ao longo de todo o período amostrado, foi utilizada a representação denominada SPL-grama (SÁNCHEZ-GENDRIZ; PADOVESE, 2017). Através dessa representação é possível detectar visualmente as tendências acústicas durante períodos de tempo maiores, comparado ao uso de espectrogramas (TOWSEY et al., 2014). No SPL-grama, o eixo y representa a hora do dia (UTC-3), o eixo x indica os dias amostrados e a barra de cores equivale aos valores de SPL.

Para avaliar a periodicidade, os dados acústicos foram classificados nas seguintes categorias: a) Período do dia (dia, noite, nascer e pôr do sol); b) Meses do ano; e c) Estações do ano.

Foi usada a representação dos dados através de *box plots* para a visualização da variabilidade do SPL em cada banda de frequência e de acordo com o filtro aplicado. A linha central de cada retângulo representa a mediana (50º percentil) e as linhas inferiores e superiores marcam o 25º e o 75º percentis, respectivamente. As barras acima e abaixo do retângulo correspondem a uma distância de uma vez e meia a altura do quadrado (1,5 IQR) a partir da parte superior e inferior do quadrado, respectivamente.

O uso do valor de 1,5 IQR corresponde a uma cobertura de 99,3 % dos dados, se eles tiverem uma distribuição normal.

Ao observar a distribuição dos dados nos *box plots*, verificou-se que todas as bandas apresentaram a linha da mediana aproximadamente centralizada com os valores do 25º e 75º percentil. Esta simetria indica que os dados apresentam distribuição normal. Em conjuntos de dados de grandes dimensões (> 5.000 amostras), como os do presente trabalho, os testes de normalidade perdem robustez. Nesse caso, inspeções visuais da normalidade baseadas na análise de *box plots* ou de diagramas quantil-quantil (Q-Q) podem ser utilizadas e são mais confiáveis (GHASEMI; ZAHEDIASL, 2012). Para a realização de testes estatísticos paramétricos, é importante verificar se os dados apresentam um grave desvio da normalidade, o que não ocorreu com os dados deste estudo. A homogeneidade das variâncias foi verificada com o teste de Levene (XAVIER, 2021).

Para avaliar as diferenças estatísticas entre as bandas de 1/3 de oitava e entre o período do dia, meses do ano e estações do ano, foi realizada uma Análise de Variância (ANOVA), seguida do teste *post hoc* de Tukey (ambos com nível de significância de 5%), já que os dados atenderam às premissas de normalidade e homoscedasticidade. O método de Monte Carlo foi utilizado para calcular o valor de p, já que proporciona maior consistência dos valores quando as amostras são de tamanhos diferentes. Os números de gravações foram escolhidos randomicamente, baseados na menor quantidade amostral entre as categorias comparadas. A ANOVA e o teste *post hoc* de Tukey foram repetidos 10 mil vezes. O resultado de cada teste foi obtido através da média das repetições.

4.3 INFLUÊNCIA DE FATORES ABIÓTICOS

O conjunto de dados de SPL em cada banda de 1/3 de oitava e os dados abióticos (temperatura da água, maré, radiação solar, velocidade do vento e precipitação) foram avaliados quanto à distribuição normal (teste de Shapiro-Wilk) e relação linear. Como as premissas acima não foram atendidas, foram realizadas análises de correlação baseadas no método de Spearman (intervalo de confiança de 95%), de cada fator abiótico com cada banda de 1/3 de oitava.

Foi realizada também uma análise de regressão múltipla, baseada no método dos mínimos quadrados, para avaliar o quanto cada fator abiótico explica a variância dos dados de SPL.

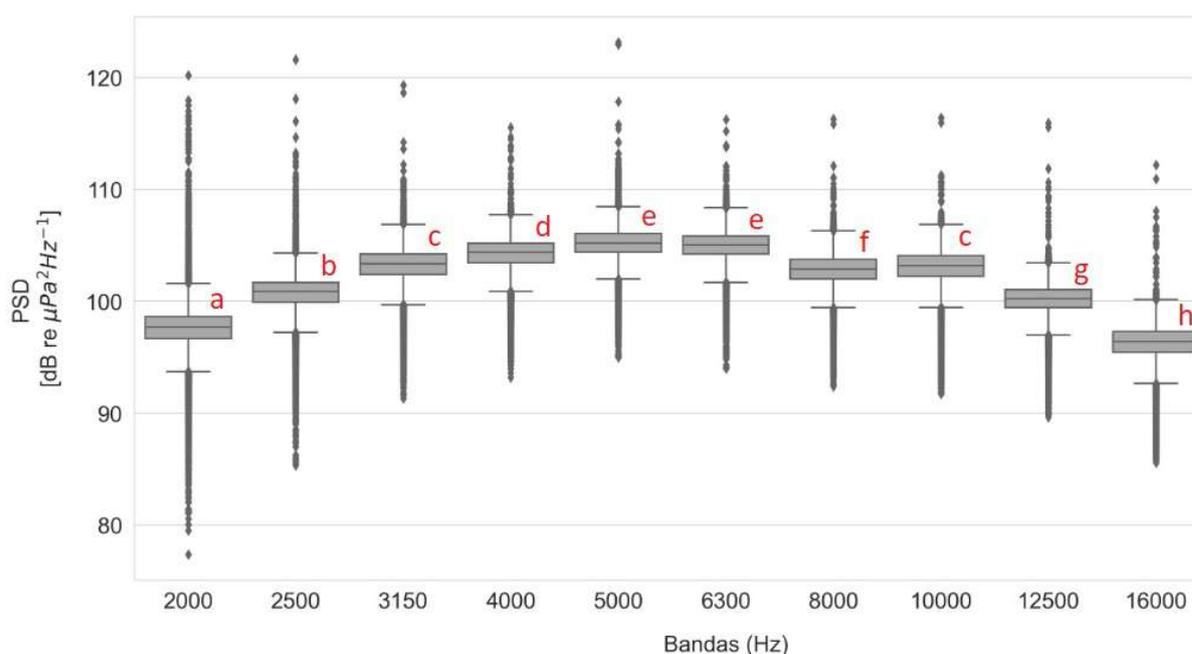
4.4 RESULTADOS

4.4.1 Análise espectral

Pode-se observar na figura 5 a contribuição de cada banda de frequência analisada no conjunto total dos dados. As maiores medianas foram obtidas nas bandas com frequências intermediárias de 4, 5, 6,3 e 10 kHz, com SPL de 104,4, 105,2, 105 e 103,3 $dB re 1\mu Pa^2$, respectivamente. Já as menores medianas foram registradas nas bandas centradas em 2 e 16 kHz (bandas das extremidades do gráfico) com SPL de 97,7 e 96,4 $dB re 1\mu Pa^2$, respectivamente. A diferença entre a maior e a menor mediana é de 8,8 $dB re 1\mu Pa^2$. Verifica-se no gráfico da figura 5 que a partir da banda centrada em 2 kHz há um aumento do SPL até a banda centrada em 5 kHz, e em seguida uma diminuição até a banda centrada em 16 kHz. O desvio padrão foi semelhante em todas as bandas, variando de 1,4 a 1,9. O valor máximo registrado foi de 123,1 $dB re 1\mu Pa^2$ na banda centrada em 5 kHz e o mínimo foi de 77,3 $dB re 1\mu Pa^2$ na banda centrada em 2 kHz. É possível observar também a grande quantidade de *outliers* nas bandas centradas em 2 e 2,5 kHz.

Foi evidenciado pela ANOVA (com o teste *post hoc* de Tukey) que não houve diferença significativa entre as bandas de 5 e 6,3 kHz, e também entre as bandas de 3,15 e 10 kHz. As demais bandas foram significativamente diferentes (Fig. 5).

FIGURA 5 – Níveis de pressão sonora (SPL) para as bandas de 1/3 de oitava, entre 08 de fevereiro de 2018 a 31 de janeiro de 2019. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na ANOVA com o teste post-hoc de Tukey.



4.4.2 Análise temporal e sazonal

A figura 6 mostra o padrão do SPL ao longo dos dias amostrados e pelas 24 h diárias para as bandas de 1/3 de oitava. Em todas as bandas é possível observar um padrão circadiano, com os valores de SPL mais elevados nos crepúsculos (nascer e pôr do sol), e o período noturno apresentando valores de SPL superiores ao período diurno. Esse padrão é mais nítido nas bandas entre 3,15 e 10 kHz.

A figura 7 reforça esse padrão, evidenciando que nas bandas de frequência intermediárias (de 3,15 a 12,5 kHz), as maiores medianas ocorrem no pôr e no nascer do sol, seguida pela noite, e os valores menos intensos ocorrem durante o dia.

A maioria das bandas de 1/3 de oitava apresentou diferenças significativas entre os quatro períodos do dia. As exceções foram as bandas de 2,5, 3,15 e 4 kHz, onde o pôr e o nascer do sol podem ser considerados semelhantes estatisticamente (Fig. 7).

Na figura 8, comparando-se as estações do ano, o verão foi estatisticamente diferente do inverno em praticamente todas as bandas de frequência, exceto em 2 kHz. No verão, os valores de SPL foram semelhantes aos registradas na primavera nas bandas de frequências de 2, 2,5, 3,15 e 5 kHz. Já nas bandas de 10 e 16 kHz, verão e outono apresentaram valores próximos. Nas bandas de 4, 6,3, 8 e 12,5 kHz, o verão foi diferente das demais estações.

A figura 9 mostra a variação mensal do SPL por banda de frequência. É possível observar uma tendência de diminuição dos valores de SPL em todas as bandas, a partir de fevereiro/2018 e indo até maio/2018. A partir de junho/2018 o SPL volta a aumentar e mantém uma tendência de estabilidade até novembro/2018, aumentando novamente a partir de dezembro/2018.

FIGURA 6 – Série temporal do nível de pressão sonora (SPL) para cada banda de 1/3 de oitava. O eixo x representa os dias do ano, o eixo y as horas do dia (UTC-3) e a barra de cores a variação do SPL. As falhas na gravação estão representadas pelas áreas brancas.

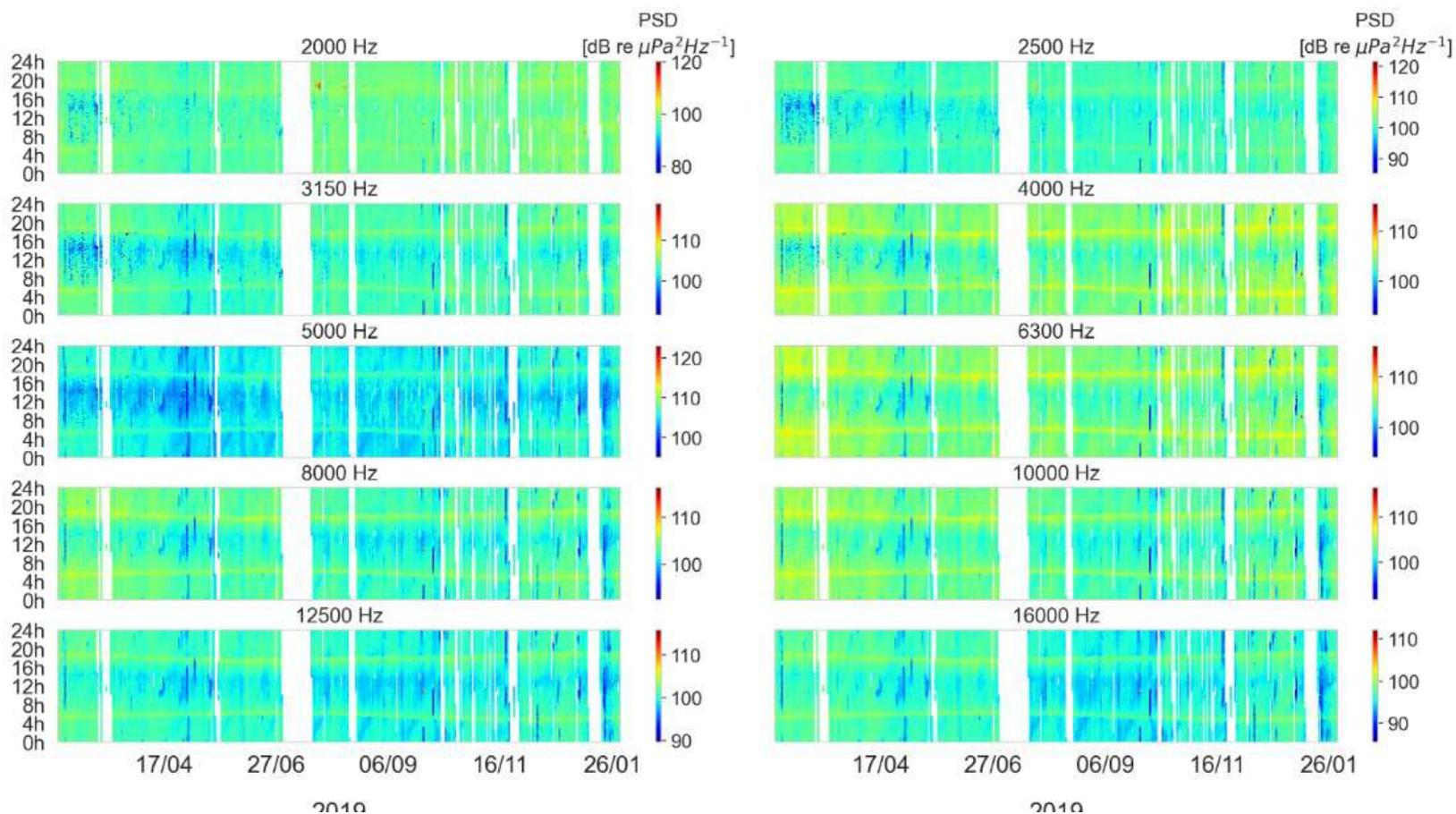


FIGURA 7 – Variação do nível de pressão sonora (SPL) de acordo com o período do dia para cada banda de 1/3 de oitava. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na ANOVA com o teste post-hoc de Tukey.

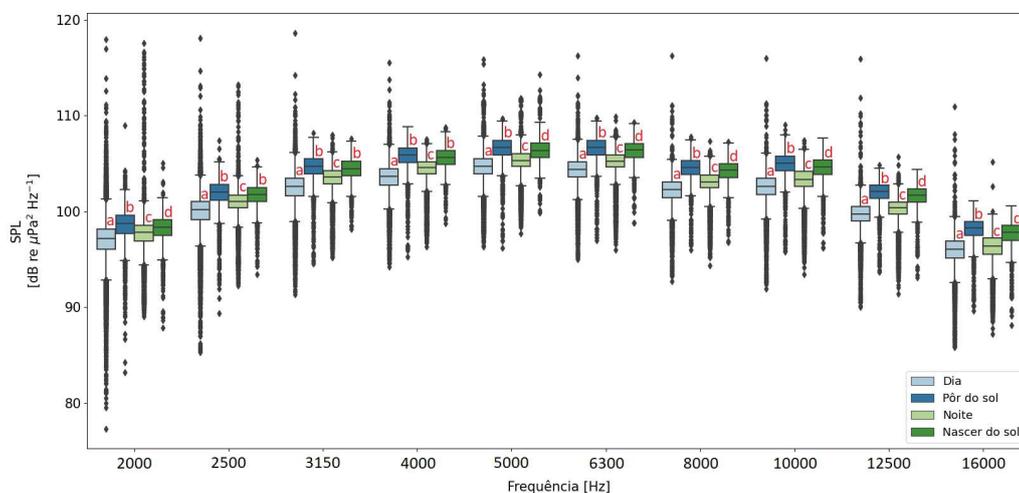


FIGURA 8 – Variação sazonal do nível de pressão sonora (SPL) para cada banda de 1/3 de oitava. Letras diferentes indicam diferenças estatísticas significativas ($p < 0,05$) na ANOVA com o teste post-hoc de Tukey.

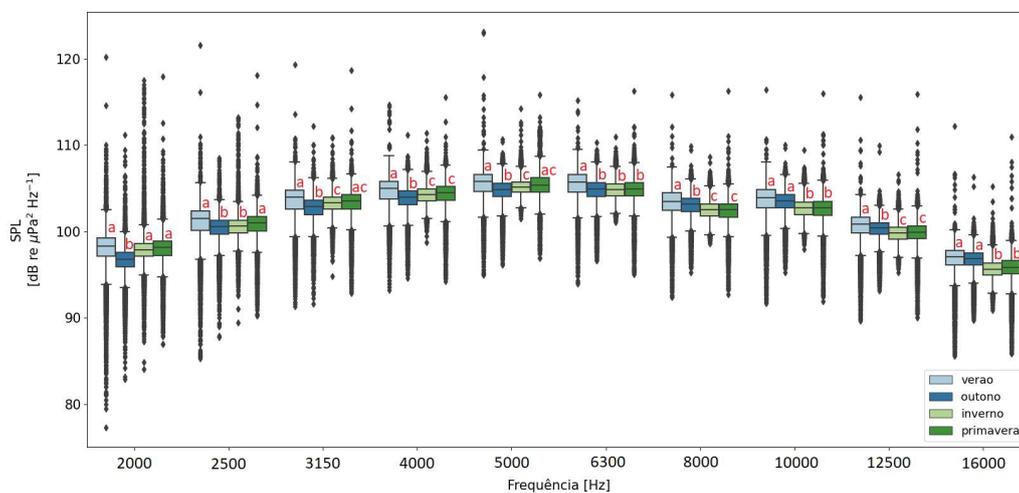
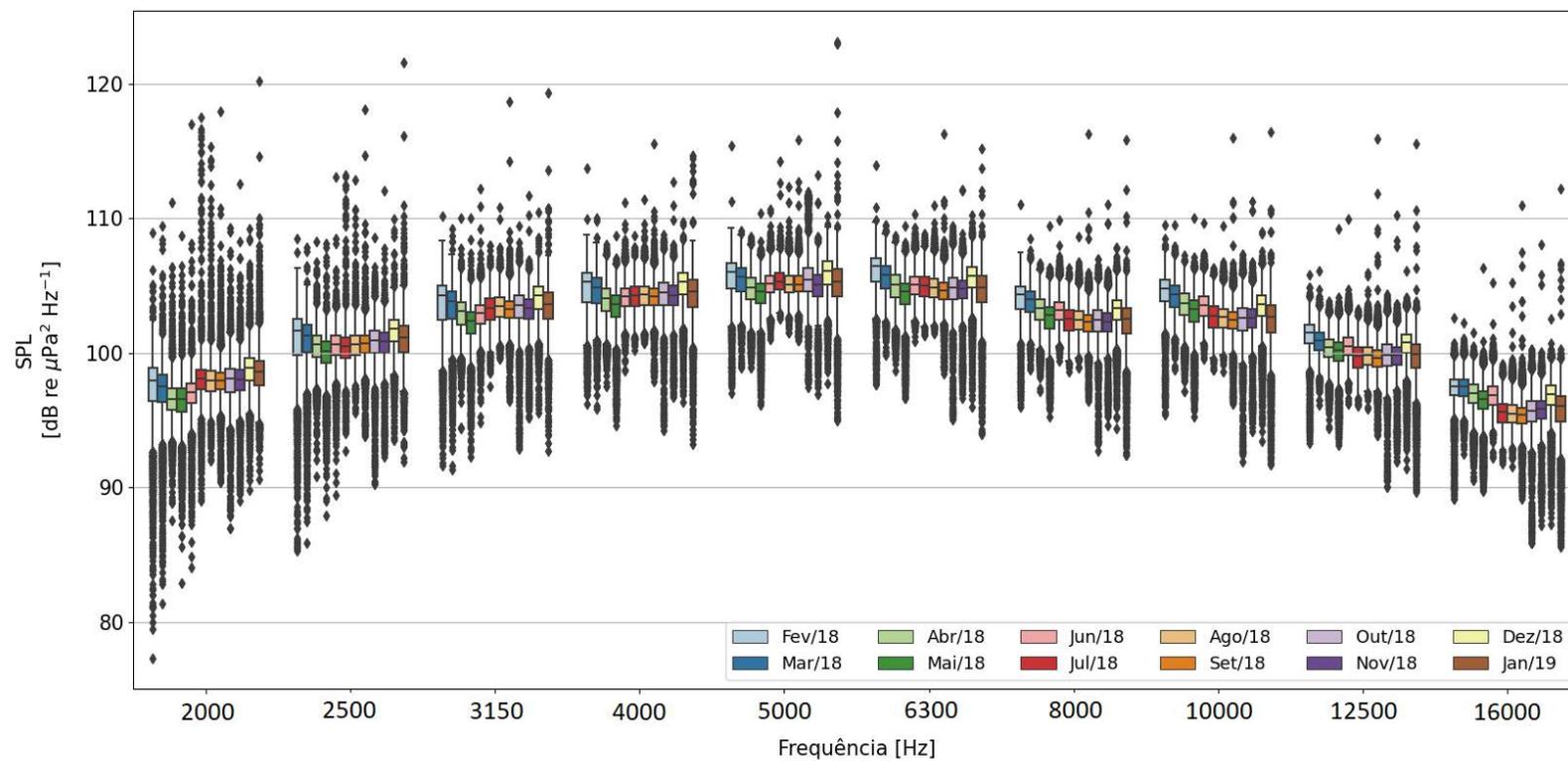


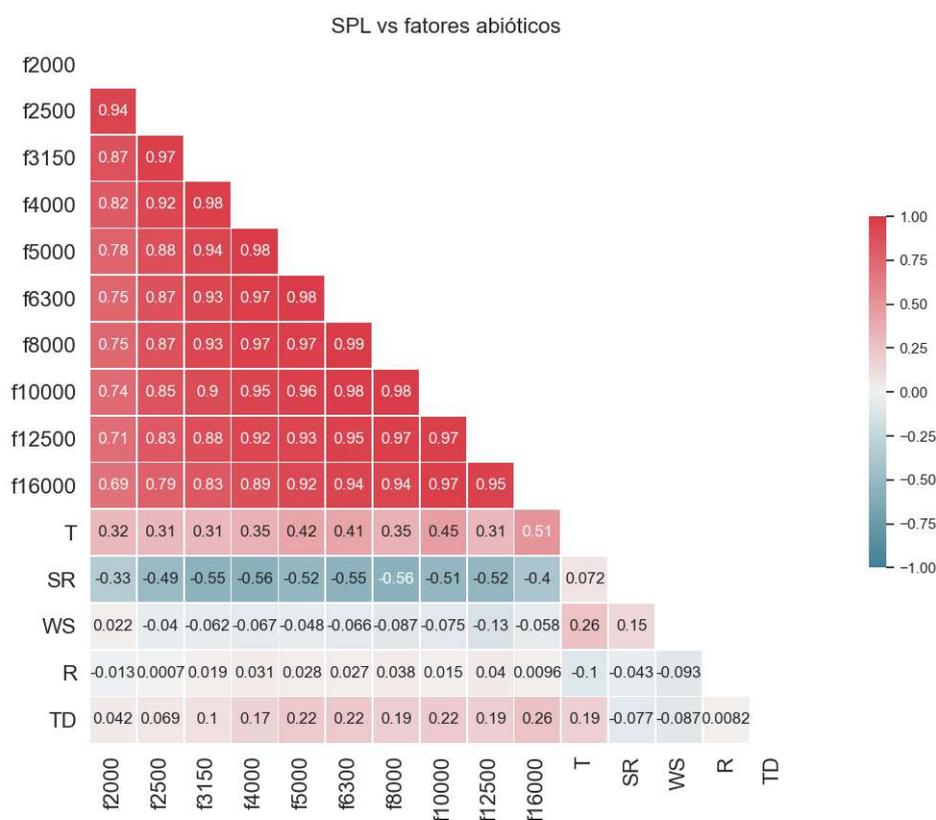
FIGURA 9 – Variação do nível de pressão sonora (SPL) para os meses do ano, para cada banda de 1/3 de oitava.



4.5 INFLUÊNCIA DE FATORES ABIÓTICOS

A figura 10 apresenta a correlação entre o SPL das bandas de 1/3 de oitava e os fatores abióticos. Valores positivos do coeficiente de correlação ($\rho > 0,00$ e $p \leq 0,05$) indicam que as variáveis estão diretamente relacionadas, ou seja, à medida que o valor de uma variável aumenta, o valor da outra variável também tende a aumentar. Ao contrário, se os valores forem negativos ($\rho < 0,00$ e $p \leq 0,05$), as variáveis estão inversamente relacionadas, e conforme uma variável aumenta, o valor da outra tende a diminuir.

FIGURA 10 – Matriz diagonal de correlações de Spearman entre o SPL de cada banda de 1/3 de oitava e os fatores abióticos (temperatura- T, radiação solar- SR, velocidade do vento- WS, precipitação- R e maré- TD). A cor vermelha indica correlações positivas, enquanto que a cor azul indica correlações negativas.



Pode ser observada uma correlação positiva entre os dados de temperatura e todas as bandas de 1/3 de oitava analisadas, com maiores coeficientes de correlação nas bandas centradas em 16 e 10 kHz ($\rho = 0,51$ e $0,45$, respectivamente). Para a maré, a correlação também foi positiva, exceto para a banda centrada em 2 kHz. Os maiores valores ocorreram nas bandas centradas em 16, 5, 6,3 e 10 kHz (0,26 no primeiro e 0,22 para os demais). Os dados de radiação solar apresentam correlação negativa com todas as bandas de frequência, ocorrendo os valores mais elevados nas bandas centradas em 4 e 8 kHz (-0,56) e 3,15 e 6,3 kHz (-0,55). Para a velocidade do vento, a correlação foi negativa com as bandas centradas em 3,15, 4, 6,3, 8, 10, 12,5 e 16 kHz.

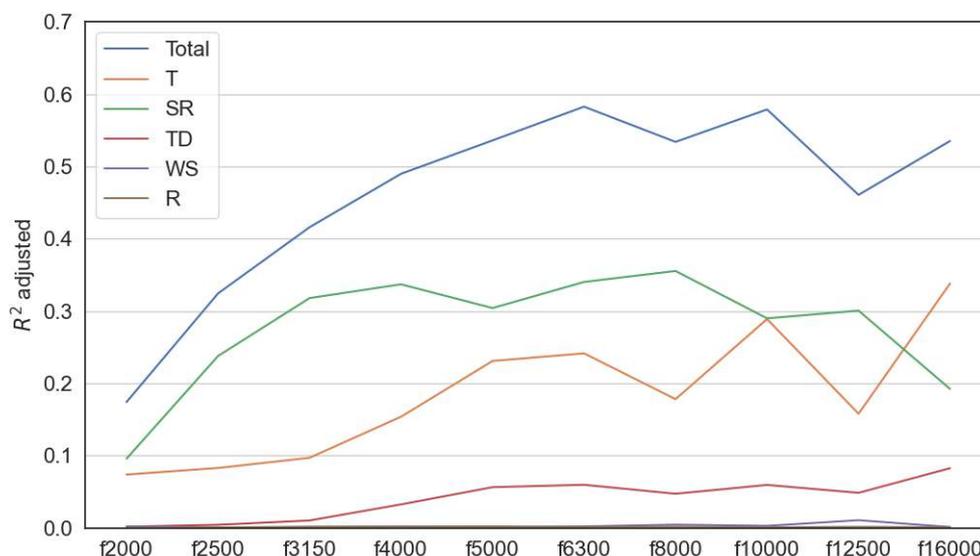
Os maiores coeficientes de correlação foram -0,13 e -0,087, com as bandas de 12,5 e 8 kHz. Os dados de precipitação apresentaram valores de ρ inferiores a 0,04 para todas as bandas de 1/3 de oitava analisadas.

A figura 11 mostra a contribuição individual dos fatores abióticos e a contribuição total (atuação conjunta dos múltiplos fatores) na explicação da variância dos dados de SPL de cada banda de 1/3 de oitava, obtidas através da regressão múltipla. A maior explicação da variância dos dados, considerando a contribuição total dos fatores abióticos, ocorreu nas bandas de 6,3 e 10 kHz (em torno de 58%).

Também é possível observar na figura 11 que a radiação solar apresenta uma melhor explicação da variância dos dados na maioria das bandas de frequência (2, 2,5, 3,15, 4, 5, 6,3, 8 e 12,5 kHz), alcançando cerca de 36% na banda de 8 kHz. Na banda de 10 kHz, a radiação solar e a temperatura apresentam os mesmos valores (29%). Já na banda de 16 kHz, a temperatura é a responsável pela maior explicação da variância dos dados de SPL (34%). Para a maré, a explicação da variância dos dados ficou abaixo de 9% para todas as bandas de frequência. Velocidade do vento e precipitação não apresentaram valores representativos.

Também é possível observar na figura 11 que a radiação solar é o fator que mais impactou na variância dos dados de SPL, em todas as bandas de frequência, exceto a centrada em 10 kHz. O coeficiente R^2 ajustado da radiação solar alcançou um pico de 36% em 8kHz, e apresentou o mesmo valor que a T (29%) em 10 KHz.. Já na banda de 16 kHz, a temperatura é a responsável pela maior explicação da variância dos dados de SPL (34%). Para a maré, a explicação da variância dos dados ficou abaixo de 9% para todas as bandas de frequência. Velocidade do vento e precipitação não apresentaram valores representativos.

FIGURA 11 – Análise de regressão múltipla, tendo como variáveis explicativas os fatores abióticos: temperatura- T, radiação solar- SR, maré- TD, velocidade do vento- WS e precipitação- R. O eixo x representa as bandas de 1/3 de oitava e o eixo y o valor do R^2 ajustado, demonstrando a contribuição total e isolada dos fatores abióticos.



4.6 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

As variações circadianas e sazonais da paisagem acústica de um costão rochoso em Arraial do Cabo foram avaliadas em um período de aproximadamente 1 ano. O aumento na intensidade do SPL durante os crepúsculos é um padrão bem conhecido para invertebrados bentônicos, denominado coro bioacústico (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b). É o momento de maior atividade destes organismos, relacionado principalmente à alimentação. Após esse pico de atividade crepuscular, invertebrados como os ouriços-do-mar continuam ativos no período noturno (JONES; ANDREW, 1990; HEREU, 2005), o que pode estar associado aos maiores níveis de SPL registrados à noite quando comparados ao dia. Radford, Jeffs, Tindle et al. (2008b) registraram o mesmo padrão para um recife de coral em ambiente temperado, onde os níveis de intensidade na banda de frequência entre 2 e 7 kHz variaram ao longo de 24 h, sendo o dia o horário mais silencioso, seguido da noite, depois o amanhecer, sendo o anoitecer o mais ruidoso.

Nas bandas centradas em 4, 6,3 e 10 kHz foi observada a presença mais intensa do coro bioacústico. É bastante difundido na literatura científica que os camarões-estalo são os organismos bentônicos mais representativos em termos sonoros nas bandas de frequência acima de 1,5 kHz de regiões costeiras (AU; BANKS, 1998; FERGUSON; CLEARY, 2001; CATO; NOAD; MCCAULEY, 2005; CHITRE; POTTER; ONG,

2006; HUNTERA; FILLINGERA; CLARIJS, 2014; BORIE et al., 2015; BOHNENSTIEHL; LILLIS; EGGLESTON, 2016; BUSCAINO; CERAULO et al., 2016), apresentando pico de frequência de seus estalos entre 3,2 e 4,5 kHz (AU; BANKS, 1998). Buscaino, Ceraulo et al. (2016) relataram em seu estudo que o ruído do camarão-estalo foi dominante nas bandas de frequência de 4 a 16 kHz. Freeman et al. (2014) verificaram um aumento de 4,6 a 6,2 dB na faixa de frequências de 11 a 17 kHz em ambientes de recife de coral no período noturno, que consideraram ser provenientes dos sons produzidos por invertebrados, que em geral apresentam as partes externas de seus corpos rígidas. Os mesmos autores avaliaram em laboratório os sons produzidos pela interação de conchas e exoesqueleto do ermitão *Clibanarius diugeti* e o substrato, que apresentaram uma elevação de cerca de 10 dB na faixa de frequência de 11 a 17 kHz.

No presente estudo, as bandas de 1/3 de oitava de 10, 12,5 e 16 kHz são correspondentes a este intervalo de frequências de 11 a 17 kHz. A banda de 10 kHz ficou entre as que apresentaram maiores medianas na área de estudo, e é possível verificar um padrão bem evidente de elevação do SPL nos crepúsculos e no período noturno (Fig. 6), semelhante ao verificado por Freeman et al. (2014) para os invertebrados bentônicos em geral. Porém, a banda de 16 kHz foi uma das que apresentou valores mais baixos de SPL, e possivelmente pode ser uma banda de transição para frequências ultrassônicas (acima de 20 kHz), utilizadas por mamíferos marinhos.

A banda de frequência de 2 kHz apresentou grande quantidade de outliers, e menores valores de SPL. Esta faixa de frequência é descrita na literatura científica como uma banda de transição (RAMOS, 2023; BUSCAINO; CERAULO et al., 2016), entre os sons de baixa frequência onde prevalecem os sons de origem antropogênica e o coro de peixes, e os sons de alta frequência dominados pelos sons de invertebrados bentônicos. Buscaino, Ceraulo et al. (2016) consideram a banda de 2 kHz uma banda de equilíbrio, com valores de SPL mais baixos durante todo o período amostrado. Os autores atribuíram essa estabilidade ao fato do ruído produzido pelas ondas e pelo camarão-estalo estarem parcialmente representados nessa banda. Também foi levantada a hipótese de que esta banda mais silenciosa pode ter uma função ainda desconhecida no ecossistema. Ramos (2023) identificou uma zona acústica de transição entre as bandas de 1 e 2 kHz, influenciada pela antropofonia e pela biofonia. O autor acredita que esta zona pode representar um ecótono acústico, que corresponderia a uma zona de tensão no espectro sonoro, entre zonas acústicas de domínios distintos. Entretanto, não é possível excluir que algum efeito na propagação acústica esteja causando esse nível mais baixo de ruído nas bandas de 2 e 16 kHz.

Kassuga, Altvater et al. (2017) observaram que as cracas (*Chtamalus* sp., *Megabalanus* sp. e *Tetraclita stalactifera*) distribuíram-se predominantemente no mesolitoral superior, com menores densidades no mesolitoral inferior e no infralitoral (27.633

ind./m², 4.515 ind./m² e 0,2 ind./m², respectivamente). Os bivalves (*Brachidontes* sp. e *Perna perna*) seguiram o mesmo padrão das cracas, sendo mais representativos no mesolitoral superior, e apresentando densidades reduzidas no mesolitoral inferior e no infralitoral (2.663 ind./m², 10,4 ind./m² e 0,2 ind./m², respectivamente). Os ouriços-do-mar (*Echinometra lucunter* e *Lytechinus variegatus*) não foram registrados no mesolitoral superior, apresentando densidades de 2,8 ind./m² no mesolitoral inferior e de 5 ind./m² no infralitoral. Os camarões-estalo (*Alpheus* sp., *A. camdei* e *Synalpheus* sp.) foram registrados apenas no infralitoral, com uma densidade de 2 ind./m². Os autores consideraram esta densidade subestimada em relação à realidade, devido ao comportamento furtivo destes organismos (KASSUGA; ALTVATER et al., 2017). Deste modo, além do camarão-estalo, pode-se destacar a importância de outros invertebrados na área de estudo, como ouriços-do-mar, bivalves e cracas, principalmente devido às elevadas densidades que apresentam.

Os ouriços-do-mar são invertebrados comuns e abundantes em comunidades subtidais tropicais e subtropicais do Brasil (CORDEIRO; HARBORNE; FERREIRA, 2014; SÁNCHEZ-JÉREZ et al., 2001). Desde a década de 1960 a contribuição destes organismos na paisagem acústica é estudada, considerando sua participação no coro bioacústico (CASTLE; KIBBLEWHITE, 1975; CATO, 1978). As bandas de frequência associadas a estes invertebrados estão entre 700 Hz e 2,8 kHz (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b; RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010). De acordo com Coquereau, Grall, Chauvaud et al. (2016) foram registrados picos de frequência para esses animais entre 3 e 6 kHz.

Os bivalves têm grande importância social, econômica e ecológica em regiões costeiras, sendo bastante representatividade em termos de densidade (MONTEIRO et al., 2020). Foram registrados para o mexilhão *Perna perna* sons impulsivos de curta duração, produzidos pelo movimento de abrir e fechar de suas valvas, com picos de frequência entre 4 e 6 kHz (MELO JÚNIOR et al., 2019). Outros bivalves como *Pecten maximus* e *Mimachlamys varia* apresentaram bandas de frequência mais extensas, entre 3 e 37 kHz, e entre 9 e 29 kHz (COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016). As maiores medianas registradas nas bandas de 1/3 de oitava de 4, 5 e 6,3 kHz correspondem aos picos de frequência registrados para ouriços e bivalves (COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016; MELO JÚNIOR et al., 2019). O pico de frequência é o intervalo onde a maior parte da energia acústica está concentrada.

As cracas são citadas como fontes de ruído biológico (FISH, 1963; FRINGS; FRINGS, 1977; BUDELMANN, 1992; TAKEMURA, 1969), mas não foram encontradas na literatura informações acústicas suficientes sobre esses organismos. É uma lacuna que precisa ser preenchida, já que são organismos que ocorrem em elevadas densidades nos costões rochosos e possuem um grande potencial na contribuição da

biofonia.

No presente estudo, os meses onde ocorreram os maiores valores de SPL correspondem ao verão e início do outono (de fevereiro a março/2018 e dezembro/2018 a janeiro/2019). Foram observadas também diferenças significativas do SPL entre o verão e o inverno nas bandas de 1/3 de oitava, exceto para 2 kHz. Buscaino, Ceraulo et al. (2016) relatam que as bandas de frequência acima de 2 kHz apresentaram os menores valores de SPL no inverno. Os autores atribuíram a variação sazonal nestas bandas de frequência à atividade do camarão-estalo. Bohnenstiehl, Lillis e Eggleston (2016) registraram que as taxas de estalos do camarão variaram de 1.500 a 2.000 estalos por minuto no verão, e no inverno foram inferiores a 100 estalos por minuto. É importante salientar que estes estudos foram realizados em ambientes temperados, onde as estações do ano são bem definidas e com grandes variações na temperatura do ambiente. Vale ressaltar que, apesar do costão rochoso utilizado neste trabalho se localizar na região tropical do Brasil, o padrão sazonal encontrado no presente trabalho é semelhante ao registrado em ambientes temperados.

Os fatores abióticos que apresentaram correlações mais elevadas com as bandas de 1/3 de oitava estudadas foram a radiação solar e a temperatura. Esses mesmos fatores foram os responsáveis pelas maiores explicações na variância de dados de SPL em todas as bandas de frequência.

A radiação solar apresentou uma correlação negativa com todas as bandas de 1/3 de oitava, o que significa que quanto menor a luminosidade, maior o valor de SPL. Os resultados obtidos a partir dos dados deste trabalho confirmam o padrão circadiano registrado na literatura, onde a maior atividade acústica dos organismos é relatada durante os crepúsculos e no período da noite (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b). Os organismos do ambiente marinho se adaptaram ao ciclo dia-noite ao longo de milhões de anos. O estímulo externo da luz solar, induz a mudanças no comportamento e na fisiologia dos organismos, e conseqüentemente influenciando o ritmo biológico e o relógio molecular das espécies (TESSMAR-RAIBLE; RAIBLE; ARBOLEDA, 2011).

No presente estudo, a temperatura foi correlacionada positivamente aos dados de SPL em todas as bandas de frequência. De acordo com Brockington e Clarke (2001) e Brothers e McClintock (2015), a temperatura está diretamente relacionada à velocidade dos processos metabólicos de invertebrados marinhos. Radford, Jeffs, Tindle et al. (2008b) e Bohnenstiehl, Lillis e Eggleston (2016) sugerem o aumento da atividade do camarão-estalo no verão devido ao aumento da temperatura da água, já que são animais pecilotérmicos. Para as cracas, Skinner, Neves Siviero e Coutinho (2007) observaram que a atividade cirral destes organismos foi maior em períodos de temperatura mais elevados.

Para a maré, também foi observada uma correlação positiva com os dados de SPL, o que indica que quando a maré está alta, mais organismos estão submersos e podem contribuir com a produção de sons na assinatura bioacústica local. Como por exemplo, as cracas e bivalves que foram registrados por Kassuga, Altvater et al. (2017) em maiores densidades no mesolitoral superior. Tessmar-Raible, Raible e Arboleda (2011) relatam a influência do ciclo circatidal na atividade dos organismos entre-marés.

A velocidade do vento apresentou correlação negativa com algumas bandas de frequência, sendo o maior valor registrado na banda de 12,5 kHz ($\rho = -0,13$). Para a precipitação, o maior coeficiente de correlação foi 0,04, também na banda de 12,5 kHz. Esses dois fatores parecem não ser representativos na assinatura acústica local, assim como Kaplan et al. (2018) relataram.

Embora o monitoramento tenha sido realizado em apenas um ponto de amostragem, este trabalho apresentou contribuições para a caracterização da assinatura bioacústica local, através da identificação de padrões temporais e da compreensão do impacto dos fatores abióticos sobre o SPL da região estudada. Cabe ressaltar que o presente trabalho é considerado um estudo de longo prazo, com ênfase em invertebrados bentônicos, e desta forma espera-se que contribua com essa área do conhecimento ainda pouco explorada no Brasil. Em trabalhos futuros, estes dados poderão ser usados como referência para a identificação de possíveis mudanças na paisagem acústica submarina, já que os invertebrados bentônicos podem ser utilizados como bioindicadores, pois muitas espécies são fixas ou se locomovem pouco, e conseqüentemente, sofrem um maior impacto de alterações ambientais.

5 CAPÍTULO 2: ANÁLISE DE SONS IMPULSIVOS PRODUZIDOS POR INVERTEBRADOS BENTÔNICOS

Abstract:

Benthic invertebrate sounds are important in the composition of rocky shore soundscapes, and most of these organisms are known to produce impulsive and broadband sounds. To classify the most representative sounds in terms of acoustic energy produced by benthic invertebrates from a rocky shore of Cabo Frio Island, Arraial do Cabo-RJ, Brazil, an automatic classification method based on unsupervised machine learning techniques was applied to passive acoustic monitoring data. Three classes of snaps were identified, presenting similar acoustic signatures. Most of the acoustic energy was concentrated up to 8 kHz and frequency peaks varying between 3.7 and 4.55. The pattern of the curves of the acoustic signatures and the SPL of the snaps are compatible with those registered by other authors for snapping shrimp. However, other benthic invertebrates, such as barnacles, bivalves and sea urchins, have high densities in the study area, and it is not possible to discard the hypothesis that the acoustic signatures represent snaps produced by a group of organisms. There is not enough information about the acoustic characteristics of these animals in the scientific literature, and conducting laboratory experiments is a future perspective to improve the method of automatic classification of snaps proposed in this study.

Keywords: Underwater acoustics, acoustic signature, machine learning, invertebrate chorus.

5.1 INTRODUÇÃO

Costões rochosos são ambientes costeiros que apresentam uma grande diversidade de espécies de grande importância ecológica e econômica, incluindo invertebrados bentônicos como mexilhões, ostras e diversos crustáceos (COUTINHO; ZALMON, 2009; MESSANO et al., 2020). Os invertebrados bentônicos são um grupo de organismos que não apresentam coluna vertebral e se encontram fixos ou associados ao substrato (LALLI; PARSONS, 1997). Estes animais apresentam adaptações morfológicas ou comportamentais à vida nos costões rochosos, relacionadas em grande parte às marés e ao batimento das ondas (COUTINHO; ZALMON, 2009). Desta forma, condições ambientais que atuam no ecossistema, como temperatura da água e do ar, vento, umidade e radiação solar, afetam diretamente esses organismos (MERCHANT et al., 2015).

Entre os organismos que formam o grupo dos invertebrados bentônicos, representantes dos filos Echinodermata (ouriços-do-mar), Mollusca (bivalves, gastrópodes)

e Arthropoda (decápodes e cirripédios) são importantes na constituição da paisagem acústica submarina de ambientes costeiros (FRINGS; FRINGS, 1977; RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b; RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; MCWILLIAM; HAWKINS, 2013; STAATERMAN et al., 2013; COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016; BORIE et al., 2015). Uma das características marcantes de áreas próximas a costões rochosos, é a presença constante de sons gerados por invertebrados bentônicos, que têm uma curta duração, são impulsivos e de banda larga (SIMMONDS; MACLENNAN, 2008; GERVAISE et al., 2019). Esses animais são mais ativos durante os crepúsculos, formando um coro bioacústico registrado por diversos autores no anoitecer e no amanhecer (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b; SIMMONDS; MACLENNAN, 2008; BERTUCCI et al., 2016; KAPLAN et al., 2018).

Os sons provenientes dos invertebrados bentônicos podem ser gerados por uma variedade de mecanismos (intencionais e não intencionais). Por exemplo, os camarões-pistola (*snapping shrimp*) podem produzir sons de forma intencional a partir do colapso de bolhas de cavitação (VERSLUIS et al., 2000), principalmente para atordoar suas presas e para defesa territorial (KNOWLTON; MOULTON, 1963), e também para a comunicação (ROSSI; CONNELL; NAGELKERKEN, 2016; LILLIS; PERELMAN et al., 2017). Outros crustáceos produzem sons através da estridulação, como caranguejos para comunicação (POPPER; SALMON; HORCH, 2001; BOON; YEO; TODD, 2009) e lagostas quando ameaçadas (PATEK; SHIPP; STAATERMAN, 2009; HAMILTON et al., 2019). Já os sons não intencionais ocorrem quando há o contato entre as partes duras dos corpos dos invertebrados e destas com o substrato, geralmente relacionadas à movimentação e à alimentação (FARINA, 2013; FREEMAN et al., 2014).

Alguns desses sons já foram descritos na literatura científica, como é o caso dos camarões-pistola (AU; BANKS, 1998; FERGUSON; CLEARY, 2001; CATO; NOAD; MCCAULEY, 2005; CHITRE; POTTER; ONG, 2006; HUNTERA; FILLINGERA; CLARIJS, 2014; BORIE et al., 2015), ouriços-do-mar (COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016; RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008a) e bivalves (DI IORIO et al., 2012; MELO JÚNIOR et al., 2019). Mas na grande maioria dos artigos, as informações são limitadas ao SPL e a faixa e pico de frequência. O som de outros animais representativos nos costões rochosos permanecem desconhecidos, como é o caso das cracas.

Muitos desses sons têm sido estudados a partir de dados provenientes de monitoramentos acústicos passivos. Este tipo de monitoramento vem se apresentando como uma ferramenta eficiente e menos invasiva que métodos tradicionais de amostragem de ecossistemas, podendo ser utilizada para a caracterização e avaliação de vários aspectos de ambientes costeiros (RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010;

LILLIS; EGGLESTON; BOHNENSTIEHL, 2014; HARRIS; RADFORD, 2014; BORIE et al., 2015; MOONEY et al., 2020; MIKSIS-OLDS; MARTIN; TYACK, 2018). Entretanto, há uma geração de grandes volumes de dados brutos que precisam ser analisados correta e eficientemente.

A análise de grandes quantidades de dados pelo homem sem o auxílio de ferramentas computacionais apropriadas é uma tarefa inviável atualmente. E é nesse sentido que o uso do aprendizado de máquina vêm se destacando, com o desenvolvimento de técnicas que auxiliem as tarefas de analisar e interpretar dados provenientes de monitoramentos acústicos passivos de forma automática e inteligente (BIANCO et al., 2019).

A identificação automática de sons produzidos por animais no ambiente tem se destacado nos últimos anos, principalmente para peixes (NODA; TRAVIESO; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, 2016; DEMERTZIS; ILIADIS; ANEZAKIS, 2017; MALFANTE; MARS et al., 2018; MALFANTE; MOHAMMED et al., 2018; LIN; TSAO; AKAMATSU, 2018; WADDELL; RASMUSSEN; ŠIROVIĆ, 2021) e cetáceos (ESFAHANIAN; ZHU-ANG; ERDOL, 2014a,b; BARKLEY et al., 2019; ZHANG et al., 2019; FRASIER, 2021; BARBOSA et al., 2022). Técnicas de aprendizado de máquina supervisionado dominam essa área de pesquisa (BIANCO et al., 2019). Mas para que essas técnicas possam ser empregadas, é necessário que se tenha o conhecimento prévio dos sons das espécies presentes no local de interesse.

Na maioria dos estudos de monitoramento acústico passivo não ocorre essa identificação prévia, e nesses casos, são aplicadas técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado. Além de não haver a identificação dos sons dos organismos previamente, são raros os estudos que avaliem as características acústicas de espécies de invertebrados bentônicos registrados no Brasil (MENDES, 2018; MELO JÚNIOR et al., 2019).

Desta forma, o presente trabalho tem como objetivo desenvolver um método de classificação automático de invertebrados bentônicos, de modo a identificar classes de sons dos organismos mais representativos em termos de energia acústica, utilizando técnicas de aprendizado de máquina não supervisionado. A hipótese testada é que os estalos produzidos por invertebrados podem ser agrupados a partir de características espectrais.

5.2 MATERIAL E MÉTODOS

5.2.1 Monitoramento da paisagem acústica

O presente estudo foi realizado em um costão rochoso localizado na Ilha do Cabo Frio, dentro da Reserva Extrativista Marinha de Arraial do Cabo, Estado do Rio

de Janeiro, Brasil. Os costões rochosos da região apresentam uma rica e complexa comunidade de espécies marinhas (BATISTA; GRANTHOM-COSTA; COUTINHO, 2020), além de grande importância econômica e ecológica (MESSANO et al., 2020).

A paisagem acústica submarina de Arraial do Cabo apresenta uma forte influência da antropofonia, principalmente associada ao turismo náutico na região (CAMPBELL, 2018; CAMPBELL et al., 2019; MENDES, 2021). Já na biofonia foram relatados a presença de sons de peixes recifais e invertebrados (XAVIER, 2021).

A coleta dos dados acústicos foi realizada durante o desenvolvimento do Projeto de Construção de Métodos de Sinalização com Características de Ruídos Bioacústicos para Comunicação Submarina (BIOCOM). Este projeto foi fomentado pelo Programa Ciência Sem Fronteiras do Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) no período de 2015 a 2019, e foi executado pelo Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM) em parceria com a Universidade do Algarve de Portugal (LOUZA et al., 2019).

Um sistema fixo de aquisição de dados foi instalado no fundo (7,55 m de profundidade) a 5 m da base do costão rochoso, composto por um hidrofone *digitalHyd TP1-4A da Marsensing Ltda*, uma estrutura de proteção e um cabo de energia e transmissão de dados conectado a uma estação em terra. O hidrofone foi configurado com uma frequência de amostragem de 52.734 Hz, resolução de 24 bits, sensibilidade de -174,9 dB re 1V/1 μ Pa e resposta plana entre 0,1 e 40 kHz.

Os dados foram coletados com uma taxa de amostragem (*duty cycle*) de 20% (1 min a cada 5 min, 12 min/hora), e os registros acústicos foram armazenados em arquivos de 1 min do tipo *wav file*. Durante a coleta de dados anual, ocorreram algumas falhas no sistema autônomo, provocadas por vandalismo e quedas de energia. Para o presente trabalho, foram utilizados os dados do período de 01 a 31 de março de 2018, já que este mês não apresentou falhas nas aquisições dos dados acústicos e abióticos. Além de corresponder ao final do verão/início do outono, período no qual foram observados os valores mais elevados de SPL, conforme registrado no Capítulo 1 desta tese.

Simultaneamente à aquisição dos dados acústicos, a temperatura foi amostrada a partir de sensores do tipo *datalogger (HOBO Pendant, Onset Computer Corporation)* instalados na estrutura de proteção do sistema autônomo (registrando 1 medição a cada 10 minutos). Os dados de maré foram disponibilizados pela Divisão de Oceanografia do IEAPM, a partir do registro de um marégrafo instalado no Porto do Forno (taxa de aquisição de 1 medição por minuto). Os dados de radiação solar foram obtidos através de uma estação automática do Instituto Nacional de Meteorologia (INMET) instalada dentro do IEAPM (taxa de 1 medição por hora).

5.2.2 Detecção de estalos

Os dados amostrados foram filtrados pelos horários dos crepúsculos, das 05 às 07 h e das 17 às 19 h. Esses horários correspondem aos picos de SPL gerado pelo coro bioacústico de invertebrados, registrados no Capítulo 1 da presente tese.

Na sequência, foi aplicado um filtro elíptico de Cauer em cada arquivo de 1 minuto, entre 1,5 e 20 kHz, faixa de frequências característica dos sons gerados por invertebrados bentônicos (RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; MCWILLIAM; HAWKINS, 2013; STAATERMAN et al., 2013; BORIE et al., 2015). Em seguida, foi calculado o Nível de Pressão Sonora (SPL - *Sound Pressure Level*) a partir da Densidade Espectral de Potência (PSD - *Power Spectral Density*) para cada minuto amostrado. Foi utilizado o periodograma de Welch (da biblioteca Scipy do Python), com sobreposição (overlap) de 93,75% e resolução de 64 pontos.

O limiar de detecção foi estabelecido em $122 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}^2$, que corresponde ao percentil de 50% do SPL observado na faixa de frequência de interesse, considerando-se o período de amostragem. Em estudos específicos para o camarão-pistola, como o de Bohnenstiehl, Lillis e Eggleston (2016), o limiar de detecção foi estabelecido no percentil de 90%, já que este organismo é reconhecido por produzir estalos com os mais elevados níveis de SPL. No presente trabalho, optou-se pelo percentil de 50%, já que pretende-se detectar a maioria dos estalos produzidos por invertebrados bentônicos, enquanto exclui a maioria dos sinais impulsivos de baixa amplitude provenientes de outras fontes.

Na figura 12 pode ser observada a detecção de estalos em um arquivo de 1 minuto, onde os pontos que ultrapassaram o limiar de detecção estão representados pela cor laranja.

5.2.3 Método de classificação de estalos

O desenvolvimento do algoritmo de aprendizado de máquina não supervisionado proposto neste artigo para o reconhecimento de sons de invertebrados, foi realizado nas etapas que podem ser verificadas na figura 13.

5.2.3.1 Extração de características

A cada minuto amostrado, toda vez que o limiar de detecção foi excedido, foi registrado o intervalo de 30 milissegundos (ms), considerando-se 15 ms antes e 15 ms após a detecção. Nesse intervalo de tempo, foi identificada a assinatura acústica de cada estalo. Os parâmetros acústicos foram estabelecidos com base em estudos anteriores, como o realizado por Song, Salas et al. (2021) e Song, Ou et al. (2023). Foram extraídos os valores de SPL para cada componente em frequência.

FIGURA 12 – Um trecho do procedimento de detecção de estalos aplicado aos dados acústicos coletados. Os pontos laranjas indicam as detecções. a) amplitude da pressão acústica, b) espectrograma.

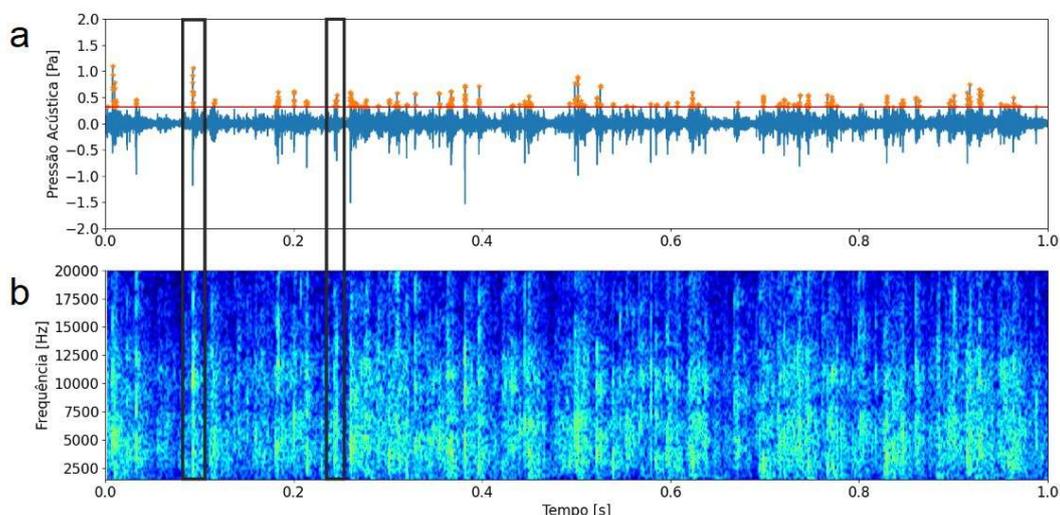
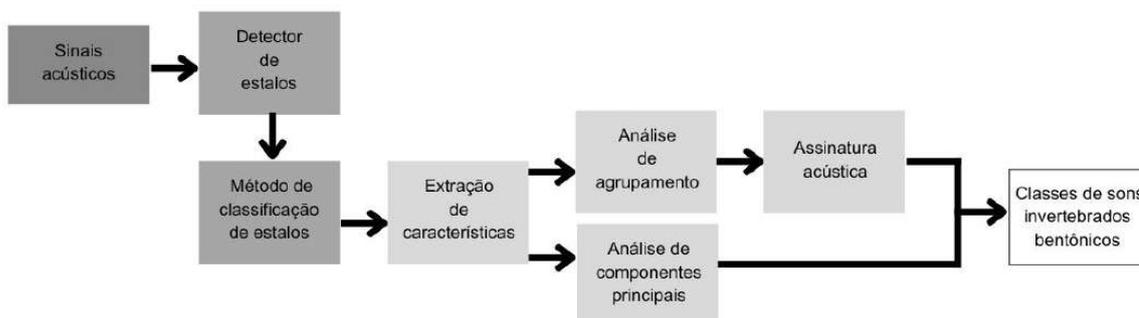


FIGURA 13 – Diagrama das etapas do método de classificação de estalos.



5.2.3.2 Análise de agrupamento

A análise de agrupamento visa separar o conjunto de dados em n grupos de registros de dados que agregam padrões semelhantes (*clusters*) (GOLDSCHMIDT; PASSOS, 2005). Para tal, foi utilizada a abordagem hierárquica aglomerativa, que não necessita que seja definido previamente o número de grupos que serão formados. As distâncias euclidianas foram usadas como métricas e o método de Ward foi usado como critério de ligação (WARD JR, 1963).

Para se identificar o número ideal de grupos, o algoritmo de clusterização hierárquico foi representado por um dendrograma. Esta abordagem apresenta os agrupamentos de estalos e permite visualizar a proximidade dos grupos (GOLDSCHMIDT; PASSOS, 2005).

A análise de agrupamento foi realizada a partir dos parâmetros acústicos extraídos de cada estalo detectado, em cada arquivo de 1 min. Em cada grupo encontrado, foi calculada e armazenada a média desses parâmetros. Em seguida, foi realizada uma nova análise de agrupamento com os dados de todos os arquivos de 1 min.

5.2.3.3 Assinatura acústica

Uma vez concluída a função de clusterização, cada grupo formado no dendrograma apresentou características acústicas diferentes, que correspondem a assinatura acústica de cada grupo. A partir desses dados, foi gerado um gráfico de linhas para representar a assinatura acústica de cada grupo.

5.2.3.4 Análise de componentes principais

Para avaliar a possível influência das variáveis abióticas nos estalos dos invertebrados, foi realizada uma análise de componentes principais. Inicialmente foram calculados os coeficientes de correlação de Pearson, para verificar a existência de correlação entre as variáveis. Em seguida, foi realizada a análise de componentes principais com a apresentação de seus resultados através de um gráfico biplot, que representa na mesma dimensão as variáveis (temperatura, maré e radiação solar) e o SPL registrado em cada frequência de cada estalo. Para permitir uma melhor visualização dos dados, as frequências dos estalos foram agrupadas em onze bandas de 1/3 de oitava (2, 2,5, 3,15, 4, 5, 6,3, 8, 10, 12,5, 16 e 20 kHz).

Os dados obtidos neste estudo foram processados e analisados usando a linguagem de programação Python e seus módulos de computação científica.

5.3 RESULTADOS

5.3.1 Método de classificação de estalos

Na análise de agrupamento realizada a partir das médias das características acústicas de cada grupo de estalos, foi gerado o dendrograma apresentado na figura 14. É possível observar a formação de três grupos principais, sendo os grupos 1 e 2 com maior similaridade. O grupo 0 foi formado pelos estalos que apresentaram SPL de 115,1 a 133 $dB re 1\mu Pa^2$. O grupo 1 corresponde aos estalos com nível de pressão sonora no intervalo de 107,8 e 127 $dB re 1\mu Pa^2$ e o grupo 2 foi composto por valores entre 105 e 123 $dB re 1\mu Pa^2$.

A assinatura acústica de cada grupo de estalos formado no dendrograma da figura 14 está representada na figura 15. Nas assinaturas dos três grupos é possível observar um padrão semelhante, com três regiões distintas. Até cerca de 8 kHz, é onde se concentra a maior energia acústica (maiores valores de SPL). Aproximadamente

entre 8 e 15 kHz, ocorrem valores intermediários e a partir de 15 kHz estão os valores mais baixos de SPL.

FIGURA 14 – Dendrograma gerado a partir do agrupamento hierárquico dos estalos, com base na distância euclidiana e no critério de ligação de Ward.

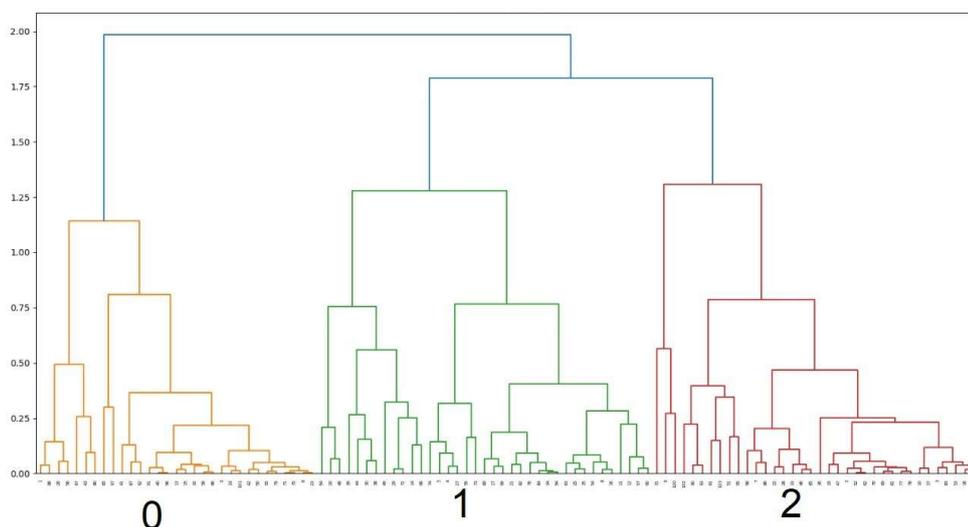
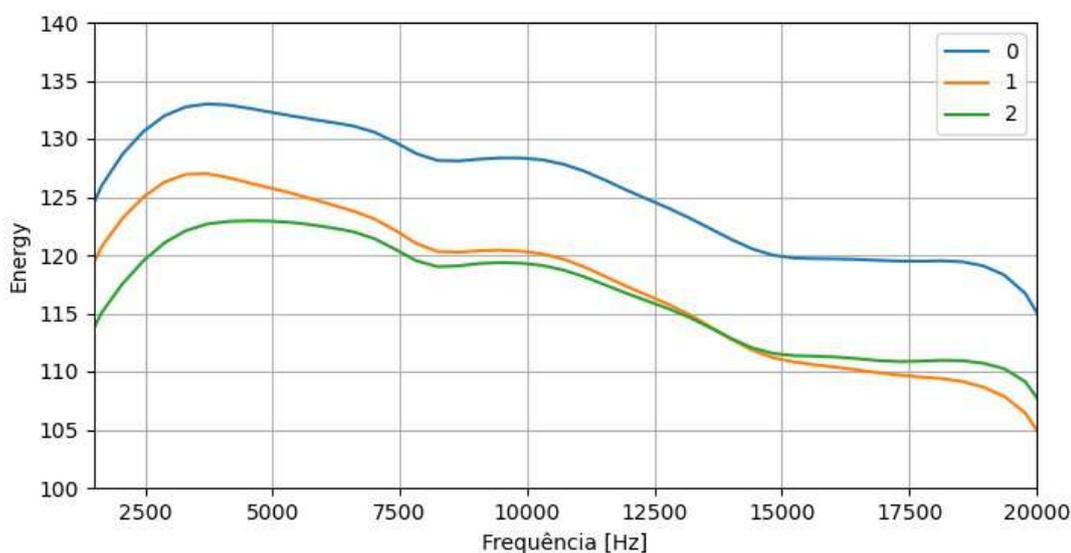


FIGURA 15 – Assinatura acústica dos grupos de estalos formados na análise de agrupamento.

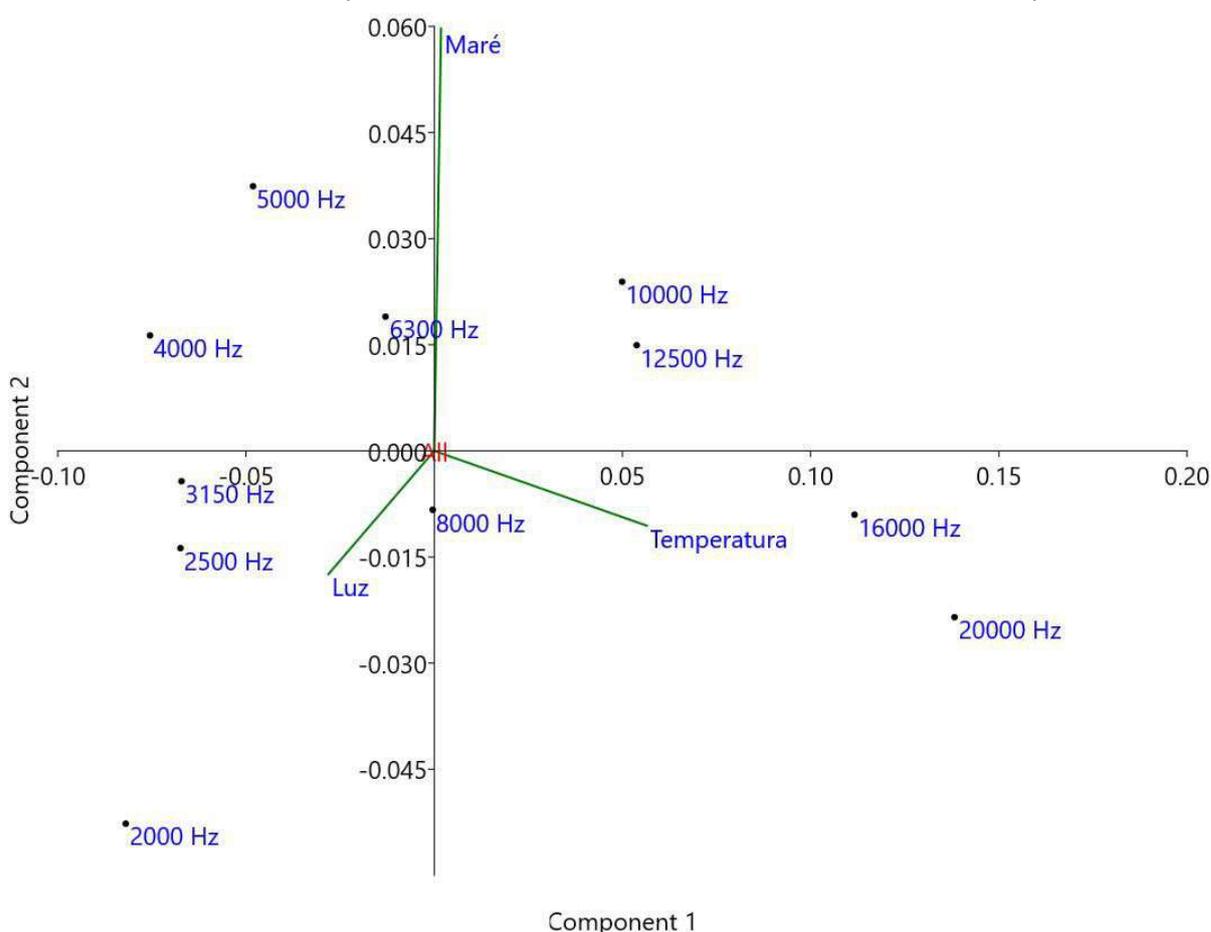


As curvas dos grupos 0 e 2 apresentam formas semelhantes (Fig. 15). O pico de frequência registrado para as assinaturas acústicas 0 e 1 foi de 3,7 kHz, e para a curva 2 foi de 4,55 kHz. No grupo 1, é possível observar que na região de maior energia, a partir do pico de frequência, o SPL tem uma diminuição mais acentuada do que a registrada nos grupos 0 e 2, mas os valores de SPL continuam superiores aos

do grupo 2. Mas na região de menor energia, a partir de 15 kHz, os valores de SPL da curva 1 se tornam inferiores aos da curva 2.

A figura 16 apresenta a análise de componentes principais, onde é possível verificar as interrelações entre as variáveis abióticas e o SPL registrado nos estalos em bandas de frequências de 1/3 de oitava. A primeira componente principal explica 88,1% da variabilidade dos dados, enquanto que a segunda explica 9,4%. Juntas, as duas componentes principais explicam 97,5% dos dados.

FIGURA 16 – Análise de componentes principais entre as variáveis abióticas e o SPL registrado nos estalos em bandas de frequências de 1/3 de oitava. Os vetores em verde representam as variáveis abióticas (temperatura, maré e radiação solar) e as amostras representam os valores de SPL em cada banda de frequência.



A primeira componente principal possui uma maior contribuição da variável temperatura. Pode ser observada uma associação entre as bandas de 1/3 de oitava com maiores frequências (de 10 a 20 kHz), e uma correlação positiva destas com a temperatura. Isso significa que quanto maior o valor de temperatura, maiores são os valores de SPL nas bandas de frequências acima de 10 kHz. Por outro lado, as bandas com menores frequências (de 2 a 8 kHz) estão correlacionadas negativamente à temperatura.

Essa divisão entre as bandas de frequência de 1/3 de oitava na primeira componente principal corresponde ao verificado nas assinaturas acústicas da figura 15. Os maiores valores de SPL registrados ocorreram nas frequências mais baixas (entre 1,5 e 8 kHz), e os menores valores nas frequências acima de 8 kHz.

A radiação solar (luz) foi correlacionada negativamente às bandas de 2, 2,5 e 3,15 kHz. Quanto menor o valor de radiação solar, maior o valor de SPL nestas bandas de frequência.

Já a segunda componente principal é fortemente influenciada pela maré, apresentando correlação positiva com as bandas de frequências de 4, 5, 6,3, 10 e 12,5. Quanto maior o valor de maré, maiores os valores de SPL nestas bandas.

5.4 DISCUSSÃO E CONCLUSÕES

A média de estalos registrada pelo detector (10.203 estalos por minuto) foi superior à maioria das taxas de estalo registradas na literatura. Por exemplo, Radford, Stanley, Tindle et al. (2010) verificaram que a taxa de estalos para o camarão-pistola variou de 3.300 a 4.500 estalos por minuto durante os crepúsculos, num ambiente dominado por ouriços-do-mar. Bohnenstiehl, Lillis e Eggleston (2016) registraram uma taxa de estalos ainda menor para o mesmo organismo, entre 1.500 a 2.000 estalos por minuto no verão, em um recife de ostras. Entretanto, Butler, Butler e Gaff (2016) relataram que em um ambiente de substrato consolidado durante o crepúsculo e na lua nova, o camarão-pistola alcançou 10.374 estalos por minuto, valor semelhante ao registrado no presente trabalho.

De acordo com as características acústicas extraídas de cada estalo, a análise de agrupamento gerou 3 grupos distintos, sendo os grupos 1 e 2 mais próximos (Fig. 14). Avaliando apenas os grupos formados, poderia se supor que seriam compostos por estalos de organismos diferentes, já que os costões rochosos de Arraial do Cabo apresentam diversos invertebrados bentônicos com potencial para a produção de sons. Entre eles, podem ser citados representantes das Classes Bivalvia (mariscos, ostras e mexilhões), Gastropoda (caramujos), Polyplacophora (quítons) (MONTEIRO et al., 2020), das Ordens Decapoda (caranguejos, ermitões, siris, camarões, lagostins, lagostas e cavaquinhas), Thoracica (cirripédios ou cracas) (KASSUGA; COSTA et al., 2020) e das Classes Asteroidea (estrelas-do-mar), Ophiuroidea (ofiuroides) e Echinoidea (ouriços-do-mar) (CORDEIRO; HARBORNE; FERREIRA, 2014; VENTURA; TAVARES, 2020).

Para o costão rochoso objeto deste estudo, Kassuga, Altvater et al. (2017) realizaram um levantamento da fauna marinha, com foco nos organismos de interesse para estudos de Bioacústica. Os autores registraram os seguintes invertebrados bentônicos:

Chtamalus sp., *Megabalanus* sp. e *Tetraclita stalactifera* (Cirripedia - cracas), *Brachidontes* sp. e *Perna perna* (Bivalvia - mexilhões), *Echinometra lucunter* e *Lytechinus variegatus* (Echinoidea - ouriços-do-mar) e *Alpheus* sp., *A. camdei* e *Synalpheus* sp. (Decapoda > Alpheidae - camarões-pistola).

Os organismos citados acima apresentam estruturas externas rígidas, como exoesqueletos rígidos feitos de quitina e carbonato de cálcio (por exemplo, decápodos), conchas externas duras formadas de carbonato de cálcio (por exemplo, bivalves e gastrópodes) e placas calcárias móveis ou fixas e/ou espinhos (equinodermos) (STORER et al., 2000). A geração de sons não intencionais pelos invertebrados ocorre através do contato entre essas estruturas e destas com o substrato, e Freeman et al. (2014) sugerem em seu estudo que devido a esse mecanismo, esses organismos criem sons semelhantes.

Para as espécies de invertebrados bentônicos registrados na área de estudo, há poucas informações acústicas, e de modo a auxiliar na discussão e na avaliação dos grupos de estalos formados, dados disponíveis na literatura científica foram compilados na tabela 1 (APÊNDICE A). Pode ser verificado que diversos destes organismos são capazes de produzir sons acima do limiar de detecção de $122 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}^2$ estabelecido no presente estudo.

Ao analisar as assinaturas acústicas correspondentes aos grupos formados pela análise de agrupamento (Fig. 15), observa-se que as mesmas apresentam padrões semelhantes. Os valores de SPL mais elevados nas três curvas se concentram entre 2 e 8 kHz, e a partir dos 8 kHz os níveis de SPL vão decaindo até os 20 kHz. O padrão observado nas três curvas é compatível com a assinatura acústica do camarão-pistola registrada por Au e Banks (1998), Versluis et al. (2000) e Song, Salas et al. (2021) em laboratório e por Freeman et al. (2014) e Song, Ou et al. (2023) em ambientes costeiros. Freeman et al. (2014) realizaram amostragens em um pier em San Diego, logo após o por do sol, período onde ocorre o coro. A curva registrada pelos autores apresenta os maiores níveis de energia entre 2 e 5 kHz, com um posterior decaimento gradual de cerca de $10 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}^2$ até os 20 kHz. Song, Ou et al. (2023) avaliaram 4 ambientes costeiros no sudeste da China, e as curvas dos estalos do camarão-pistola apresentam picos de frequência abaixo de 5 kHz e decaem até os 10 kHz.

A curva 0 apresentou os maiores níveis de SPL, e as diferenças nos níveis de energia acústica de cada curva podem estar relacionadas aos fatores descritos a seguir. Estalos produzidos por indivíduos mais distantes do hidrofone podem sofrer atenuação e serem registrados com níveis mais baixos de SPL, como nas curvas 1 e 2 (Fig. 15). Cato e Bell (1992) registraram em seu estudo que diferenças nos níveis de pressão sonora de estalos de camarões-pistola variaram entre espécies e entre indivíduos. Outro fator pode estar relacionado a fase de vida dos camarões-pistola. Song, Salas

et al. (2021) relatam que indivíduos jovens tem garras menores e não produzem estalos tão vigorosos quanto indivíduos adultos. Há também diferenças relacionadas ao sexo. Song, Salas et al. (2021) verificaram que os níveis de pressão sonora emitidos por camarões-pistola fêmeas, são inferiores aos gerados por camarões-pistola machos.

Mas mesmo as assinaturas acústicas apresentando diferenças nos níveis de energia acústica, ainda assim possuem valores de SPL bem elevados. Esta é uma observação que reforça que os grupos de estalos representados pelas assinaturas acústicas são provenientes do camarão-pistola. Os sons produzidos pelo camarão-pistola estão entre os sons mais intensos produzidos no ambiente marinho, e o nível de pressão sonora dos estalos desses invertebrados podem chegar a $210 \text{ dB re } 1\mu\text{Pa}^2$ (AU; BANKS, 1998; VERSLUIS et al., 2000; SCHMITZ, 2002).

Em relação à análise de componentes principais, a temperatura foi a variável abiótica que melhor explicou a variação dos dados. Avaliando-se a primeira componente principal, é possível observar que estalos com maiores valores de SPL em bandas de frequência abaixo de 8 kHz estiveram correlacionados aos menores valores de temperatura (Fig. 16). No mês amostrado, ocorreram eventos de ressurgência (XAVIER, 2021), e possivelmente as águas frias e ricas em nutrientes influenciaram os estalos.

Já a maré foi mais representativa na segunda componente principal, e estalos com maiores níveis de pressão sonora nas bandas de frequências de 4, 5, 6,3, 10 e 12,5 kHz apresentaram correlação com os maiores valores de maré. Os costões rochosos são divididos em três zonas principais. O supralitoral fica exposto ao ar, recebendo apenas os borrifos das ondas. O mesolitoral (ou entre-marés) é a faixa sujeita à influência da maré, e que fica submersa durante as marés altas. O infralitoral é a área que fica permanentemente submersa (COUTINHO; ZALMON, 2002).

Isso indica que esses estalos foram produzidos por organismos do mesolitoral que estavam submersos no momento da gravação. No levantamento de fauna realizado na área de estudo por Kassuga, Altvater et al. (2017), os invertebrados encontrados no mesolitoral foram cracas, bivalves e ouriços-do-mar, que apresentaram densidades de 32.149, 2.673 e 2,8 ind./m², respectivamente. Já os camarões-pistola foram registrados ocorrendo em baixas densidades (2 ind./m²), no infralitoral.

Esses organismos tiveram maior representatividade em termos de indivíduos no costão rochoso objeto deste estudo. Durante os períodos do anoitecer e do amanhecer, essa grande quantidade de indivíduos é representativa na composição do coro de invertebrados, produzindo sons de forma não intencional decorrentes da locomoção, forrageamento e da alimentação (FREEMAN et al., 2014).

A caracterização de sons biológicos é uma tarefa complexa, pois pode haver a sobreposição de sons em estudos *in situ*, sendo difícil isolar os sons característicos

de cada espécie ou grupo de organismos. Desta forma, não é possível descartar a hipótese de que as assinaturas acústicas também representem estalos produzidos por um conjunto de invertebrados. Bivalves e ouriços-do-mar, por exemplo, apresentam picos de frequência em faixas que coincidem com as do camarão-pistola (Tab. 1).

Os invertebrados que apresentaram maiores densidades na área de estudo foram as cracas. Entretanto, não há informações suficientes sobre as características acústicas destes organismos na literatura científica. Trabalhos antigos relatam a produção de sons por cirripédios, devido ao contato entre suas placas calcáreas (BUSNEL; DZIEDZIC, 1962; FISH, 1963). Para a espécie *Megabalanus coccopoma*, registrada no levantamento de fauna feito por (KASSUGA; ALTVATER et al., 2017), foi realizada uma gravação exploratória em um tanque no IEAPM, com o registro de estalos entre 2 e 24 kHz e SPL variando de 58 a 65 $dB re 1\mu Pa^2$ (MINELLO; BARROSO et al., 2022). Outros trabalhos informam apenas níveis de pressão acústica e duração, como o de Budelmann (1992), que se limita a informar que os sons provenientes das cracas são rítmicos e consistem em pulsos de 1 a 3 ms com picos de amplitude de 70 db. No artigo de Coquereau, Grall, Clavier et al. (2016) há informações sobre *Pollicipes pollicipes*, uma espécie de craca pedunculada que ocorre em costões rochosos entre o Senegal e o noroeste da França (CAMPO et al., 2010). O som produzido por esta espécie foi associado ao contato entre indivíduos, com pico de frequência entre 4 a 64 kHz e SPL entre 86 e 118 $dB re 1\mu Pa^2$ (COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016).

O mexilhão *Perna perna*, que também ocorre na área de estudo, teve sua atividade acústica caracterizada por Melo Júnior et al. (2019) em laboratório. Os sons impulsivos detectados foram associados ao movimento das valvas, com pico de frequência na banda de 4 a 6 kHz e com SPL máximo de 105 $dB re 1\mu Pa^2$. Na tabela 1 (APÊNDICE A), pode ser verificado que outras espécies de bivalves apresentam picos de frequência variando de 4 a 62 kHz e SPL entre 80 e 134 $dB re 1\mu Pa^2$ (DI IORIO et al., 2012; COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016).

Para o ouriço-do-mar *Lytechinus variegatus*, Mendes (2018) relatou que o som produzido pela alimentação destes animais em laboratório apresentou pico de frequência na faixa de 2 a 4 kHz com SPL alcançando 110,45 $dB re 1\mu Pa^2$. Esta espécie também foi registrada na área de estudo (KASSUGA; ALTVATER et al., 2017). Nos artigos que compõem a tabela 1 (APÊNDICE A), são registrados uma grande variação nos picos de frequência (1 a 72 kHz) e nos valores de SPL (60 a 142 $dB re 1\mu Pa^2$) para outras espécies de ouriços-do-mar (RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008a,b; RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010; COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016). Para Putland, Constantine e Radford (2017), os ouriços-do-mar foram os invertebrados mais representativos em termos de energia acústica em ambientes costeiros da Nova Zelândia. Os ouriços-do-mar alcançaram níveis de pressão acústica de 130

$dB re 1\mu Pa^2$, enquanto os camarões-pistola não ultrapassaram os $105 dB re 1\mu Pa^2$.

A realização de experimentos em laboratório com os animais representativos da área de estudo é uma lacuna a ser preenchida. Os sons dos animais são únicos em termos de características acústicas, e nesse sentido, experimentos com espécies individuais realizados em tanques com observações de comportamento são importantes para a compreensão do som produzido, como por exemplo os estudos realizados por Coquereau, Grall, Chauvaud et al. (2016) e Coquereau, Grall, Clavier et al. (2016). Essa caracterização é de extrema importância para que se possa distinguir as assinaturas acústicas dos invertebrados de forma mais detalhada, e assim comparar com estudos *in situ* e melhorar o método de classificação automática de estalos proposto neste estudo.

Na área de bioacústica, o aprendizado de máquina tem se tornado uma ferramenta efetiva na detecção e classificação de sinais acústicos (BIANCO et al., 2019). Quando há a identificação prévia dos sons das espécies, a classificação supervisionada pode ser utilizada para a distinção entre indivíduos, e auxiliar, por exemplo, em avaliações de densidade (KEEN et al., 2021). Entretanto, em monitoramentos acústicos passivos onde os dados são coletados por sistemas autônomos, geralmente não há ou não é realizada a identificação prévia dos sons dos animais existentes no local. Para a diferenciação entre espécies ou grupos de organismos (CLINK; KLINCK, 2021), onde a rotulação dos dados não é possível ou é desconhecida (como é o caso do presente trabalho), as técnicas de classificação não supervisionada são aplicadas.

Embora os camarões-pistola tenham sido registrados ocorrendo em baixas densidades, os resultados obtidos a partir do método de classificação de invertebrados proposto e da comparação com informações da literatura científica, indicam que estes organismos sejam os mais representativos em termos de energia acústica na área de estudo.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente trabalho destaca a importância do monitoramento da paisagem acústica submarina para o conhecimento dos ambientes costeiros brasileiros. Dos trabalhos realizados no país, poucos tem como escopo os invertebrados bentônicos, sendo a maioria voltada para o monitoramento de sons produzidos por cetáceos, peixes e para ruídos antropogênicos. Além disso, dos estudos publicados em periódicos, o período de amostragem não ultrapassa 3 meses de coleta de dados.

Desde 2017 a região de Arraial do Cabo tem atraído a atenção de pesquisadores para o estudo da paisagem acústica submarina, que foi impulsionada pelo projeto BIOCUM. Desde então têm sido realizados estudos relacionados à biofonia (peixes e invertebrados), antropofonia e também sobre a influência da ressurgência na paisagem acústica subterrânea.

No presente estudo, o foco foram os invertebrados bentônicos presentes em um costão rochoso. Foi registrado um padrão circadiano na produção de sons por esses organismos, com maior intensidade da energia acústica no nascer e no pôr do sol, seguido pela noite e pelo dia. Também foi observado um padrão sazonal, com maiores valores de SPL no verão e no início do outono.

A área de estudo apresenta uma diversidade de organismos bentônicos que contribuem para a composição da paisagem acústica submarina, emitindo sons em frequências acima de 2 kHz. Podem ser destacados organismos como o camarão-pistola, ouriços-do-mar e bivalves, que foram relacionados às bandas de frequência de 1/3 de oitava de 4, 5 e 6,3 kHz .

A radiação solar e a temperatura foram os fatores abióticos com maiores correlações com as bandas de 1/3 de oitava analisadas. Esses fatores estão diretamente relacionados ao padrão circadiano e ao metabolismo dos invertebrados bentônicos.

Em termos de energia, apesar de terem sido registrados em baixas densidades na área de estudo, os camarões-pistola foram os invertebrados bentônicos mais representativos da paisagem acústica. Foram identificados estalos acima de $122 \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2$, e as assinaturas acústicas encontradas nesse estudo são compatíveis com as de camarões-pistola registradas por outros autores.

As aplicações do monitoramento acústico passivo têm se expandido, tanto na área de biotecnologia marinha quanto na utilização de técnicas de aprendizado de máquina para a detecção automática de sons dos organismos marinhos. Entretanto, esse tipo de análise fica limitada a um grupo reduzido de animais, como cetáceos e peixes, devido a pouca quantidade de pesquisas com sons de outros grupos biológicos

ou espécies, e pela disponibilidade limitada de bibliotecas de sons de referência.

Em uma perspectiva futura, há o interesse e a necessidade em realizar experimentos em laboratório para a identificação dos sons produzidos por invertebrados individualmente e avaliar suas assinaturas acústicas. Com essas informações, será possível refinar a caracterização da paisagem acústica local, além de aprimorar o método apresentado para a classificação automática de invertebrados bentônicos.

REFERÊNCIAS

- ANSI. **American National Standard. Specification for Octave-Band and Fractional-Octave-Band Analog and Digital Filters. ANSI S1.11-2004.** [S.l.]: Melville, USA: Secretariat, Acoustical Society of America, 2009.
- AU, W.W.L.; BANKS, K. The acoustics of the snapping shrimp *Synalpheus parneomeris* in Kaneohe Bay. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 103, n. 1, p. 41–47, 1998.
- BARBOSA, M. et al. Characterisation and classification method of burst pulses produced by Guiana dolphins (*Sotalia guianensis*). **Bioacoustics**, Taylor & Francis, v. 31, n. 1, p. 69–80, 2022.
- BARKLEY, Y. et al. Whistle classification of sympatric false killer whale populations in Hawaiian waters yields low accuracy rates. **Frontiers in Marine Science**, Frontiers Media SA, v. 6, p. 645, 2019.
- BATISTA, D.; GRANTHOM-COSTA, L. V.; COUTINHO, R. **Biodiversidade Marinha dos Costões Rochosos de Arraial do Cabo: Histórico, Ecologia e Conservação.** [S.l.]: Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, 2020.
- BERTUCCI, F. et al. Acoustic indices provide information on the status of coral reefs: an example from Moorea Island in the South Pacific. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 6, p. 33326, 2016.
- BIANCO, M.J. et al. Machine learning in acoustics: Theory and applications. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 146, n. 5, p. 3590–3628, 2019.
- BITTENCOURT, L.; BARBOSA, M.; BISI, T.L. et al. Anthropogenic noise influences on marine soundscape variability across coastal areas. **Marine Pollution Bulletin**, Elsevier, v. 160, p. 111648, 2020.
- BITTENCOURT, L.; BARBOSA, M.; SECCHI, E. et al. Acoustic habitat of an oceanic archipelago in the Southwestern Atlantic. **Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers**, Elsevier, v. 115, p. 103–111, 2016.
- BITTENCOURT, L.; CARVALHO, R.R. et al. Underwater noise pollution in a coastal tropical environment. **Marine pollution bulletin**, Elsevier, v. 83, n. 1, p. 331–336, 2014.
- BITTENCOURT, L.; LIMA, I.M.S. et al. Underwater noise in an impacted environment can affect Guiana dolphin communication. **Marine Pollution Bulletin**, Elsevier, v. 114, n. 2, p. 1130–1134, 2017.

- BOHNENSTIEHL, D.R.; LILLIS, A.; EGGLESTON, D.B. The curious acoustic behavior of estuarine snapping shrimp: temporal patterns of snapping shrimp sound in sub-tidal oyster reef habitat. **PloS One**, Public Library of Science, v. 11, n. 1, e0143691, 2016.
- BOON, P.Y.; YEO, D.C.J.; TODD, P.A. Sound production and reception in mangrove crabs *Perisesarma* spp.(Brachyura: Sesarmidae). **Aquatic Biology**, v. 5, n. 2, p. 107–116, 2009.
- BORIE, A. et al. Soundscape of a management and exploitation area of benthic resources in central Chile. **Latin American Journal of Aquatic Research**, Pontificia Universidad Católica de Valparaíso, v. 43, n. 5, 2015.
- BROCKINGTON, S.; CLARKE, A. The relative influence of temperature and food on the metabolism of a marine invertebrate. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, Elsevier, v. 258, n. 1, p. 87–99, 2001.
- BROTHERS, C.J.; MCCLINTOCK, J.B. The effects of climate-induced elevated seawater temperature on the covering behavior, righting response, and Aristotle's lantern reflex of the sea urchin *Lytechinus variegatus*. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, Elsevier, v. 467, p. 33–38, 2015.
- BUDELMANN, B.U. Hearing in crustacea. In: THE evolutionary biology of hearing. [S.l.]: Springer, 1992. P. 131–139.
- BURDIC, W.S. **Underwater Acoustic System Analysis**. [S.l.]: 1 ed., New Jersey -USA, Prentice-Hall, 2003.
- BUSCAINO, G.; CERAULO, M. et al. Temporal patterns in the soundscape of the shallow waters of a Mediterranean marine protected area. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 6, n. 1, p. 1–13, 2016.
- BUSCAINO, G.; FILICIOTTO, F. et al. Acoustic behaviour of the European spiny lobster *Palinurus elephas*. **Marine Ecology Progress Series**, v. 441, p. 177–184, 2011.
- BUSNEL, R.G.; DZIEDZIC, A. Rythme du bruit de fond de la mer à proximité des côtes et relations avec l'activité acoustique des populations d'un Cirripède fixé immergé. **Cahiers océanographiques**, v. 14, p. 293–322, 1962.
- BUTLER, J.; BUTLER, M.; GAFF, H. Acoustic-based model estimation of snapping shrimp populations and the effects of a sponge die-off. **bioRxiv**, Cold Spring Harbor Laboratory, p. 056986, 2016.
- CALADO, L. et al. Características geológicas e oceanográficas. In: BIODIVERSIDADE Marinha dos Costões Rochosos de Arraial do Cabo: Histórico, Ecologia e Conservação. [S.l.]: IEAPM, 2020. P. 16–47.

- CAMPBELL, D et al. Underwater soundscape pattern during high season of nautical tourism in Cabo Frio Island, Brazil. In: ACOUSTIC SOCIETY OF AMERICA. PROCEEDINGS of Meetings on Acoustics, Volume 37, Issue 1. [S.l.: s.n.], 2019. P. 070003.
- CAMPBELL, D. et al. A Variabilidade Diurna da Paisagem Acústica Submarina da Enseada dos Anjos, Arraial do Cabo - RJ, BRASIL. In: SOCIEDADE BRASILEIRA DE ACÚSTICA. ANAIS do XXVII Encontro da Sociedade Brasileira de Acústica. [S.l.: s.n.], 2017. P. 20–29.
- CAMPBELL, D.A. **Estudo da paisagem acústica submarina na região do Arraial do Cabo, Rio de Janeiro, Brasil**. 2018. Diss. (Mestrado) – Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Universidade Federal Fluminense.
- CAMPO, D. et al. Phylogeography of the European stalked barnacle (*Pollicipes pollicipes*): identification of glacial refugia. **Marine biology**, Springer, v. 157, p. 147–156, 2010.
- CASTLE, M.J.; KIBBLEWHITE, A.C. The contribution of the sea urchin to ambient sea noise. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 58, S1, s122–s122, 1975.
- CATO, D.H. Marine biological choruses observed in tropical waters near Australia. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 64, n. 3, p. 736–743, 1978.
- CATO, D.H.; BELL, M.J. **Ultrasonic ambient noise in Australian shallow waters at frequencies up to 200 kHz**. [S.l.], 1992.
- CATO, D.H.; NOAD, M.J.; MCCAULEY, R.D. Passive acoustics as a key to the study of marine animals. Cambridge University Press, 2005.
- CHITRE, M.A.; POTTER, J.R.; ONG, S.H. Optimal and near-optimal signal detection in snapping shrimp dominated ambient noise. **IEEE Journal of oceanic engineering**, IEEE, v. 31, n. 2, p. 497–503, 2006.
- CLAUDET, J. et al. A roadmap for using the UN Decade of ocean science for sustainable development in support of science, policy, and action. **One Earth**, Elsevier, v. 2, n. 1, p. 34–42, 2020.
- CLINK, D.J.; KLINCK, H. Unsupervised acoustic classification of individual gibbon females and the implications for passive acoustic monitoring. **Methods in Ecology and Evolution**, Wiley Online Library, v. 12, n. 2, p. 328–341, 2021.
- CODARIN, A. et al. Effects of ambient and boat noise on hearing and communication in three fish species living in a marine protected area (Miramare, Italy). **Marine pollution bulletin**, Elsevier, v. 58, n. 12, p. 1880–1887, 2009.

- COELHO-SOUZA, S.A. et al. Biophysical interactions in the Cabo Frio upwelling system, Southeastern Brazil. **Brazilian Journal of Oceanography**, SciELO Brasil, v. 60, n. 3, p. 353–365, 2012.
- COQUEREAU, L.; GRALL, J.; CHAUVAUD, L. et al. Sound production and associated behaviours of benthic invertebrates from a coastal habitat in the north-east Atlantic. **Marine biology**, Springer, v. 163, n. 5, p. 127, 2016.
- COQUEREAU, L.; GRALL, J.; CLAVIER, J. et al. Acoustic behaviours of large crustaceans in NE Atlantic coastal habitats. **Aquatic Biology**, v. 25, p. 151–163, 2016.
- CORDEIRO, C.A.M.M.; HARBORNE, A.R.; FERREIRA, C.E.L. Patterns of distribution and composition of sea urchin assemblages on Brazilian subtropical rocky reefs. **Marine biology**, Springer, v. 161, n. 10, p. 2221–2232, 2014.
- COUTINHO, R.; YAGINUMA, L.E. et al. Studies on benthic communities of rocky shores on the Brazilian coast and climate change monitoring: status of knowledge and challenges. **Brazilian Journal of Oceanography**, SciELO Brasil, v. 64, spe2, p. 27–36, 2016.
- COUTINHO, R.; ZALMON, I.R. Bentos de costões rochosos. **Biologia marinha**, Interciência Press Rio de Janeiro, v. 2, p. 147–157, 2002.
- _____. Os Bentos de Costões Rochosos. In: **BIOLOGIA Marinha**. [S.l.]: Interciência, 2009. P. 281–298.
- DEMERTZIS, K.; ILIADIS, L.; ANEZAKIS, V.D. A deep spiking machine-hearing system for the case of invasive fish species. In: **IEEE. 2017 IEEE International Conference on INnovations in Intelligent SysTems and Applications (INISTA)**. [S.l.: s.n.], 2017. P. 23–28.
- DI IORIO, L. et al. Hydrophone detects cracking sounds: Non-intrusive monitoring of bivalve movement. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, Elsevier, v. 432, p. 9–16, 2012.
- DUARTE, C.M. et al. The soundscape of the Anthropocene ocean. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 371, n. 6529, eaba4658, 2021.
- DUC, P.N.H. et al. Assessing inter-annotator agreement from collaborative annotation campaign in marine bioacoustics. **Ecological Informatics**, Elsevier, v. 61, p. 101185, 2021.
- ERBE, C. et al. The effects of ship noise on marine mammals—a review. **Frontiers in Marine Science**, Frontiers Media SA, v. 6, p. 606, 2019.
- ESFAHANIAN, M.; ZHUANG, H.; ERDOL, N. On contour-based classification of dolphin whistles by type. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 76, p. 274–279, 2014.

ESFAHANIAN, M.; ZHUANG, H.; ERDOL, N. Sparse representation for classification of dolphin whistles by type. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 136, n. 1, e11–e17, 2014.

EVEREST, F.A.; YOUNG, R.W.; JOHNSON, M.W. Acoustical characteristics of noise produced by snapping shrimp. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 20, n. 2, p. 137–142, 1948.

FARINA, A. **Soundscape ecology: principles, patterns, methods and applications**. [S.l.]: Springer, 2013.

FERGUSON, B.G.; CLEARLY, J.L. In situ source level and source position estimates of biological transient signals produced by snapping shrimp in an underwater environment. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 109, n. 6, p. 3031–3037, 2001.

FISH, M.P. **Biological sources of sustained ambient sea noise**. [S.l.]: Narragansett Marine Laboratory, University of Rhode Island, 1963.

FRASIER, K.E. A machine learning pipeline for classification of cetacean echolocation clicks in large underwater acoustic datasets. **PLoS Computational Biology**, Public Library of Science San Francisco, CA USA, v. 17, n. 12, e1009613, 2021.

FREEMAN, S.E. et al. The origins of ambient biological sound from coral reef ecosystems in the Line Islands archipelago. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 135, n. 4, p. 1775–1788, 2014.

FRINGS, H.; FRINGS, M. **Animal communication**. [S.l.]: University of Oklahoma Press, 1977.

GERVAISE, C. et al. Three-dimensional mapping of the benthic invertebrates biophony with a compact four-hydrophones array. **Applied Acoustics**, Elsevier, v. 148, p. 175–193, 2019.

GHASEMI, A.; ZAHEDIASL, S. Normality tests for statistical analysis: a guide for non-statisticians. **International journal of endocrinology and metabolism**, Brieflands, v. 10, n. 2, p. 486, 2012.

GOLDSCHMIDT, R.; PASSOS, E. **Data mining: um guia prático**. [S.l.]: Gulf Professional Publishing, 2005.

HAMILTON, S. et al. Sound production mechanism in the Brazilian spiny lobsters (Family Palinuridae). **Zoomorphology**, Springer, v. 138, n. 4, p. 475–482, 2019.

HARRIS, S.A.; RADFORD, C.A. Marine soundscape ecology. In: INSTITUTE OF NOISE CONTROL ENGINEERING, 2. INTER-NOISE and NOISE-CON Congress and Conference Proceedings. [S.l.: s.n.], 2014. v. 249, p. 5003–5011.

- HAWKINS, A.D.; POPPER, A.N. A sound approach to assessing the impact of underwater noise on marine fishes and invertebrates. **ICES Journal of Marine Science**, Oxford University Press, v. 74, n. 3, p. 635–651, 2017.
- HEREU, B. Movement patterns of the sea urchin *Paracentrotus lividus* in a marine reserve and an unprotected area in the NW Mediterranean. **Marine Ecology**, Wiley Online Library, v. 26, n. 1, p. 54–62, 2005.
- HILDEBRAND, J.A. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. **Marine Ecology Progress Series**, v. 395, p. 5–20, 2009.
- HUBERT, J. et al. Effects of broadband sound exposure on the interaction between foraging crab and shrimp—A field study. **Environmental Pollution**, Elsevier, v. 243, p. 1923–1929, 2018.
- HUNTERA, A.; FILLINGERA, L.; CLARIJS, M. Passive acoustic measurements of snapping shrimp from a reef monitoring feasibility test in Aruba. In: PROCEEDINGS 2nd International Conference and Exhibition on Underwater Acoustics, UA2014, 22-27 June, Rhodes, Greece. [S.l.: s.n.], 2014. P. 895.
- JENSEN, F.H. et al. Vessel noise effects on delphinid communication. **Marine Ecology Progress Series**, v. 395, p. 161–175, 2009.
- JESUS, S.M. et al. Particle motion measurements near a rocky shore off Cabo Frio Island. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 147, n. 6, p. 4009–4019, 2020.
- JOHNSON, M.W.; EVEREST, F.A.; YOUNG, R.W. The role of snapping shrimp (*Crangon* and *Synalpheus*) in the production of underwater noise in the sea. **The Biological Bulletin**, Marine Biological Laboratory, v. 93, n. 2, p. 122–138, 1947.
- JONES, G.P.; ANDREW, N.L. Herbivory and patch dynamics on rocky reefs in temperate Australasia: the roles of fish and sea urchins. **Australian Journal of Ecology**, Wiley Online Library, v. 15, n. 4, p. 505–520, 1990.
- JORDAN, M.I.; MITCHELL, T.M. Machine learning: Trends, perspectives, and prospects. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 349, n. 6245, p. 255–260, 2015.
- KAPLAN, M.B. et al. Acoustic and biological trends on coral reefs off Maui, Hawaii. **Coral Reefs**, Springer, v. 37, n. 1, p. 121–133, 2018.
- KASSUGA, A.D.; ALTVATER, L. et al. **Levantamento de Fauna de Costão Rochoso**. [S.l.: s.n.], 2017. Relatório 1 - Hidrofone, Construção de Métodos de Sinalização com Características de Ruído Bioacústico para Comunicação Submarina, CNPq/CsF.
- KASSUGA, A.D.; COSTA, T.M.M. et al. Cirripédios e decápodos (Arthropoda: Crustacea). In: BIODIVERSIDADE Marinha dos Costões Rochosos de Arraial do Cabo: Histórico, Ecologia e Conservação. [S.l.]: IEAPM, 2020. P. 240–263.

- KEEN, S.C. et al. A machine learning approach for classifying and quantifying acoustic diversity. **Methods in ecology and evolution**, Wiley Online Library, v. 12, n. 7, p. 1213–1225, 2021.
- KNOWLTON, R.E.; MOULTON, J.M. Sound production in the snapping shrimps *Alpheus* (Crangon) and *Synalpheus*. **The Biological Bulletin**, Marine Biological Laboratory, v. 125, n. 2, p. 311–331, 1963.
- KRAUSE, B. Bioacoustics, habitat ambience in ecological balance. **Whole Earth Review**, v. 57, Winter, 1987.
- LADICH, F. Sound communication in fishes and the influence of ambient and anthropogenic noise. **Bioacoustics**, Taylor & Francis, v. 17, n. 1-3, p. 34–38, 2008.
- LALLI, C.; PARSONS, T. **Biological oceanography: an introduction**. [S.l.]: Elsevier, 1997.
- LESSA, A.A. et al. Impacts of Anthropogenic Sounds on Reef Fish. In: THE Effects of Noise on Aquatic Life. [S.l.]: Springer, 2023. P. 1–9.
- LILLIS, A.; EGGLESTON, D.B.; BOHNENSTIEHL, D.R. Estuarine soundscapes: distinct acoustic characteristics of oyster reefs compared to soft-bottom habitats. **Marine Ecology Progress Series**, v. 505, p. 1–17, 2014.
- LILLIS, A.; MOONEY, T.A. Snapping shrimp sound production patterns on Caribbean coral reefs: relationships with celestial cycles and environmental variables. **Coral Reefs**, Springer, v. 37, n. 2, p. 597–607, 2018.
- LILLIS, A.; PERELMAN, J.N. et al. Sound production patterns of big-clawed snapping shrimp (*Alpheus* spp.) are influenced by time-of-day and social context. **The Journal of the Acoustical Society of America**, ASA, v. 142, n. 5, p. 3311–3320, 2017.
- LIMA, J.A.M. et al. Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina da Bacia de Santos (PMPAS-BS): uma iniciativa brasileira em monitoramento acústico oceânico. **Revista Brasileira de Meio Ambiente**, v. 10, n. 2, 2022.
- LIN, T.H.; TSAO, Y.; AKAMATSU, T. Comparison of passive acoustic soniferous fish monitoring with supervised and unsupervised approaches. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 143, n. 4, e1278–e1284, 2018.
- LOHSE, D.; SCHMITZ, B.; VERSLUIS, M. Snapping shrimp make flashing bubbles. **Nature**, Nature Publishing Group, v. 413, n. 6855, p. 477–478, 2001.
- LOUZA, F.B. et al. Communications and Biological Monitoring Experiment in an Upwelling Environment at Cabo Frio Island Bay. In: IEEE. OCEANS 2019-Marseille. [S.l.: s.n.], 2019. P. 1–7.

- LURTON, X. **An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications**. [S.l.]: Springer Praxis Publishing, London, UK, 2010.
- MALFANTE, M.; MARS, J.I. et al. Automatic fish sounds classification. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 143, n. 5, p. 2834–2846, 2018.
- MALFANTE, M.; MOHAMMED, O. et al. Use of deep features for the automatic classification of fish sounds. In: IEEE. 2018 OCEANS-MTS/IEEE Kobe Techno-Oceans (OTO). [S.l.: s.n.], 2018. P. 1–5.
- MANNILA, H. Data mining: machine learning, statistics, and databases. In: IEEE. PROCEEDINGS of 8th International Conference on Scientific and Statistical Data Base Management. [S.l.: s.n.], 1996. P. 2–9.
- MCWILLIAM, J.N.; HAWKINS, A.D. A comparison of inshore marine soundscapes. **Journal of Experimental Marine Biology and Ecology**, Elsevier, v. 446, p. 166–176, 2013.
- MCWILLIAM, J.N.; MCCAULEY, R.D. et al. Patterns of biophonic periodicity on coral reefs in the Great Barrier Reef. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 17459, 2017.
- MELO JÚNIOR, U.G. **Uma abordagem bioacústica alternativa para o monitoramento de moluscos bivalves**. 2019. Diss. (Mestrado) – Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Universidade Federal Fluminense.
- MELO JÚNIOR, U.G. et al. Characterization of the acoustic activity of *Perna perna* (bivalve mollusc) under laboratory conditions. In: ACOUSTIC SOCIETY OF AMERICA. PROCEEDINGS of Meetings on Acoustics, Volume 37, Issue 1. [S.l.: s.n.], 2019. P. 010010.
- MENDES, D.C. **A influência da antropofonia no coro bioacústico marinho da Ilha do Cabo Frio**. 2021. Diss. (Mestrado) – Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Universidade Federal Fluminense.
- _____. **Atividade acústica do ouriço do mar, *Lytechinus variegatus* (Lamarck, 1816): caracterização e sua relação com a temperatura da água**. [S.l.: s.n.], 2018. Monografia de Especialização, Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia do Rio de Janeiro.
- MERCHANT, N.D. et al. Measuring acoustic habitats. **Methods in Ecology and Evolution**, Wiley Online Library, v. 6, n. 3, p. 257–265, 2015.

- MESSANO, L.V.R. et al. Caracterização ecológica dos ambientes de substrato consolidado. In: BIODIVERSIDADE Marinha dos Costões Rochosos de Arraial do Cabo: Histórico, Ecologia e Conservação. [S.l.]: IEAPM, 2020. P. 48–75.
- MIKSIS-OLDS, J.L.; BRADLEY, D.L.; MAGGIE NIU, X. Decadal trends in Indian Ocean ambient sound. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 134, n. 5, p. 3464–3475, 2013.
- MIKSIS-OLDS, J.L.; MARTIN, B.; TYACK, P.L. Exploring the ocean through soundscapes. **Acoust. Today**, v. 14, p. 26–34, 2018.
- MINELLO, M.; BARROSO, V.R. et al. A acústica submarina como ferramenta de monitoramento ambiental. In: GESTÃO Ambiental e Sustentabilidade em Áreas Costeiras e Marinhas: Conceitos e Práticas v. 2. [S.l.]: IVIDES.ORG, 2022. P. 433–461.
- MINELLO, M.; CALADO, L.; XAVIER, F.C. Ecoacoustic indices in marine ecosystems: a review on recent developments, challenges, and future directions. **ICES Journal of Marine Science**, Oxford University Press, v. 78, n. 9, p. 3066–3074, 2021.
- MIRANDA, L.B. Forma da correlação TS de massas de água das regiões costeira e oceânica entre o Cabo de São Tomé (RJ) e a Ilha de São Sebastião (SP), Brasil. **Boletim do Instituto Oceanográfico**, SciELO Brasil, v. 33, p. 105–119, 1985.
- MONTEIRO, J.C. et al. Moluscos (Mollusca). In: BIODIVERSIDADE Marinha dos Costões Rochosos de Arraial do Cabo: Histórico, Ecologia e Conservação. [S.l.]: IEAPM, 2020. P. 212–239.
- MOONEY, T.A. et al. Listening forward: approaching marine biodiversity assessments using acoustic methods. **Royal Society open science**, The Royal Society, v. 7, n. 8, p. 201287, 2020.
- MURCHY, K.A. et al. Impacts of noise on the behavior and physiology of marine invertebrates: A meta-analysis. In: ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 1. PROCEEDINGS of Meetings on Acoustics 5ENAL. [S.l.: s.n.], 2019. v. 37, p. 040002.
- NEDELEC, S.L. et al. Motorboat noise disrupts co-operative interspecific interactions. **Scientific Reports**, Nature Publishing Group UK London, v. 7, n. 1, p. 6987, 2017.
- NODA, J.J.; TRAVIESO, C.M.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, D. Automatic taxonomic classification of fish based on their acoustic signals. **Applied Sciences**, MDPI, v. 6, n. 12, p. 443, 2016.
- NOLAN, B.A.; SALMON, M. The behavior and ecology of snapping shrimp (Crustacea: *Alpheus heterochelis* and *Alpheus normanni*). **Forma et functio**, v. 2, p. 289–335, 1970.
- NYBAKKEN, W.J. Marine Biology An Ecological Approach. Translation Eidman et al. **Marine Ecology An Ecological approach**. New York: Scholastic, 1988.

NYSTUEN, J.A. et al. Spatial averaging of oceanic rainfall variability using underwater sound: Ionian sea rainfall experiment 2004. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 123, n. 4, p. 1952–1962, 2008.

PATEK, S.N.; SHIPP, L.E.; STAATERMAN, E.R. The acoustics and acoustic behavior of the California spiny lobster (*Panulirus interruptus*). **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 125, n. 5, p. 3434–3443, 2009.

PETROBRAS. **Projeto de Monitoramento da Paisagem Acústica Submarina na Bacia de Santos - Projeto Executivo**. [S.l.]: PETROBRAS, 2017.

PIJANOWSKI, B.C.; FARINA, A. et al. What is soundscape ecology? An introduction and overview of an emerging new science. **Landscape ecology**, Springer, v. 26, p. 1213–1232, 2011.

PIJANOWSKI, B.C.; VILLANUEVA-RIVERA, L.J. et al. Soundscape ecology: the science of sound in the landscape. **BioScience**, American Institute of Biological Sciences Circulation, AIBS, 1313 Dolley . . . , v. 61, n. 3, p. 203–216, 2011.

PIRES, A.L.M.S. et al. The effects of anthropogenic noise on cetaceans in Brazil: the need to consider recent scientific advances in environmental licensing. **Journal of Coastal Conservation**, Springer, v. 25, n. 4, p. 1–39, 2021.

POPPER, A.N.; SALMON, M.; HORCH, K.W. Acoustic detection and communication by decapod crustaceans. **Journal of Comparative Physiology A**, Springer, v. 187, p. 83–89, 2001.

PUTLAND, R.L.; CONSTANTINE, R.; RADFORD, C.A. Exploring spatial and temporal trends in the soundscape of an ecologically significant embayment. **Scientific reports**, Nature Publishing Group, v. 7, n. 1, p. 5713, 2017.

RADFORD, C.A.; JEFFS, A.G.; MONTGOMERY, J.C. Directional swimming behavior by five species of crab postlarvae in response to reef sound. **Bulletin of Marine Science**, University of Miami-Rosenstiel School of Marine, Atmospheric & Earth Science, v. 80, n. 2, p. 369–378, 2007.

RADFORD, C.A.; JEFFS, A.G.; TINDLE, C.T. et al. Resonating sea urchin skeletons create coastal choruses. **Marine Ecology Progress Series**, v. 362, p. 37–43, 2008.

_____. Temporal patterns in ambient noise of biological origin from a shallow water temperate reef. **Oecologia**, Springer, v. 156, n. 4, p. 921–929, 2008.

RADFORD, C.A.; STANLEY, J.A.; JEFFS, A.G. Adjacent coral reef habitats produce different underwater sound signatures. **Marine Ecology Progress Series**, v. 505, p. 19–28, 2014.

RADFORD, C.A.; STANLEY, J.A.; TINDLE, C.T. et al. Localised coastal habitats have distinct underwater sound signatures. **Marine Ecology Progress Series**, v. 401, p. 21–29, 2010.

- RAMOS, Y.F. **Caracterização da zona de transição acústica de costões rochosos e seu potencial como recurso biotecnológico ambiental marinho**. 2023. Diss. (Mestrado) – Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Universidade Federal Fluminense.
- RAMOS, Y.F.; MINELLO, M.; XAVIER, F.C. O som como ferramenta de estudo ambiental: Análise bibliométrica sobre estudos em paisagem acústica. **Boletim do Observatório Ambiental Alberto Ribeiro Lamego**, v. 13, n. 2, p. 317–336, 2020.
- ROBINSON, S.P.; LEPPER, P.A.; HAZELWOOD, R.A. Good practice guide for underwater noise measurement. National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate, 2014.
- ROSSI, T.; CONNELL, S.D.; NAGELKERKEN, I. Silent oceans: ocean acidification impoverishes natural soundscapes by altering sound production of the world's noisiest marine invertebrate. **Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences**, The Royal Society, v. 283, n. 1826, p. 20153046, 2016.
- SANCHEZ-GENDRIZ, I.; PADOVESE, L.R. Temporal and spectral patterns of fish choruses in two protected areas in southern Atlantic. **Ecological Informatics**, Elsevier, v. 38, p. 31–38, 2017.
- SÁNCHEZ-GENDRIZ, I.; PADOVESE, L.R. A methodology for analyzing biological choruses from long-term passive acoustic monitoring in natural areas. **Ecological Informatics**, Elsevier, v. 41, p. 1–10, 2017.
- _____. Harbor sound level estimation for assessment of underwater ship noise. In: IEEE. 2014 Oceans-St. John's. [S.l.: s.n.], 2014. P. 1–5.
- _____. Underwater sound pressure levels in the Port of Santos: Representative sample of forty-five days. In: IEEE. 2015 IEEE/OES Acoustics in Underwater Geosciences Symposium (RIO Acoustics). [S.l.: s.n.], 2015. P. 1–4.
- _____. Underwater soundscape of marine protected areas in the south Brazilian coast. **Marine pollution bulletin**, Elsevier, v. 105, n. 1, p. 65–72, 2016.
- SÁNCHEZ-JÉREZ, P. et al. Spatial distribution of the most abundant sea urchin populations on the southeast coast of Sao Paulo (Brazil). **Ciencias Marinas**, v. 27, n. 1, p. 139–153, 2001.
- SCHAFER, R.M. **The book of noise**. [S.l.]: Price Milburn CO LTD, 1970.
- _____. The tuning of the world. **McClelland and Stewart Limited, Toronto**, 1977.
- SCHMITZ, B. Sound production in Crustacea with special reference to the Alpheidae. In: SPRINGER. THE crustacean nervous system. [S.l.: s.n.], 2002. P. 536–547.
- SIMMONDS, J.; MACLENNAN, D.N. **Fisheries acoustics: theory and practice**. [S.l.]: John Wiley & Sons, 2008.

- SIMPSON, S.D. et al. Adaptive avoidance of reef noise. **PLoS One**, Public Library of Science, v. 6, n. 2, e16625, 2011.
- SINGH, R.L. **Principles and applications of environmental biotechnology for a sustainable future**. [S.l.]: Springer, 2017.
- SKINNER, L.F.; NEVES SIVIERO, F.; COUTINHO, R. Comparative growth of the intertidal barnacle *Tetraclita stalactifera* (Thoracica: Tetraclitidae) in sites influenced by upwelling and tropical conditions at the Cabo Frio region, Brazil. **Revista de Biologia Tropical**, Universidad de Costa Rica, v. 55, Su1, 2007.
- SLABBEKOORN, H. et al. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. **Trends in ecology & evolution**, Elsevier, v. 25, n. 7, p. 419–427, 2010.
- SOARS, N.; BYRNE, M.; CATO, D.H. Characterization of the sounds produced by temperate and tropical sea urchins during feeding (Diadematidae and Echinometridae). In: SPRINGER. **THE Effects of Noise on Aquatic Life II**. [S.l.: s.n.], 2016. P. 1075–1080.
- SONG, Z.; OU, W. et al. Sounds of snapping shrimp (Alpheidae) as important input to the soundscape in the southeast China coastal sea. **Frontiers in Marine Science**, Frontiers, v. 10, p. 38, 2023.
- SONG, Z.; SALAS, A.K. et al. Sound pressure and particle motion components of the snaps produced by two snapping shrimp species (*Alpheus heterochaelis* and *Alpheus angulosus*). **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 150, n. 5, p. 3288–3301, 2021.
- SOUTHWORTH, M.F. The sonic environment of cities. **Environment and Behavior**, p. 1–1, 1969.
- _____. **The sonic environment of cities**. 1967. Tese (Doutorado) – Massachusetts Institute of Technology.
- STAATERMAN, E. et al. Soundscapes from a Tropical Eastern Pacific reef and a Caribbean Sea reef. **Coral Reefs**, Springer, v. 32, n. 2, p. 553–557, 2013.
- STOCKER, M. Fish, mollusks and other sea animals' use of sound, and the impact of anthropogenic noise in the marine acoustic environment. **Journal of the Acoustical Society of America**, Citeseer, v. 112, n. 5, p. 2431, 2002.
- STORER, T.I. et al. *Zoologia Geral*.: Companhia Editora Nacional. **São Paulo**, v. 6, 2000.
- TAKEMURA, A. Studies on the Underwater Sound—II On the Diurnal Variation of the TEMPURA NOISE in the Coastal Waters of Nagasaki Prefecture. **Bulletin of the Faculty of Fisheries**, Nagasaki University, n. 28, p. 31–41, 1969.

- TESSMAR-RAIBLE, K.; RAIBLE, F.; ARBOLEDA, E. Another place, another timer: marine species and the rhythms of life. **Bioessays**, Wiley Online Library, v. 33, n. 3, p. 165–172, 2011.
- TIDAU, S.; BRIFFA, M. Review on behavioral impacts of aquatic noise on crustaceans. In: ACOUSTICAL SOCIETY OF AMERICA, 1. PROCEEDINGS of Meetings on Acoustics 4ENAL. [S.l.: s.n.], 2016. v. 27, p. 010028.
- TOLIMIERI, N.; JEFFS, A.; MONTGOMERY, J.C. Ambient sound as a cue for navigation by the pelagic larvae of reef fishes. **Marine Ecology Progress Series**, v. 207, p. 219–224, 2000.
- TOWSEY, M. et al. Visualization of long-duration acoustic recordings of the environment. **Procedia Computer Science**, Elsevier, v. 29, p. 703–712, 2014.
- VALENTIN, J.L.; COUTINHO, R. Modelling maximum chlorophyll in the Cabo Frio (Brazil) upwelling: a preliminary approach. **Ecological Modelling**, Elsevier, v. 52, p. 103–113, 1990.
- VENTURA, C.R.; TAVARES, M.R. Equinodermos (Echinodermata). In: BIODIVERSIDADE Marinha dos Costões Rochosos de Arraial do Cabo: Histórico, Ecologia e Conservação. [S.l.]: IEAPM, 2020. P. 264–295.
- VERSLUIS, M. et al. How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles. **Science**, American Association for the Advancement of Science, v. 289, n. 5487, p. 2114–2117, 2000.
- VISBECK, M. Ocean science research is key for a sustainable future. **Nature communications**, Nature Publishing Group, v. 9, n. 1, p. 1–4, 2018.
- WADDELL, E.E.; RASMUSSEN, J.H.; ŠIROVIĆ, A. Applying artificial intelligence methods to detect and classify fish calls from the Northern Gulf of Mexico. **Journal of Marine Science and Engineering**, Multidisciplinary Digital Publishing Institute, v. 9, n. 10, p. 1128, 2021.
- WARD JR, J.H. Hierarchical grouping to optimize an objective function. **Journal of the American statistical association**, Taylor & Francis, v. 58, n. 301, p. 236–244, 1963.
- WENZ, G.M. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. **The Journal of the Acoustical Society of America**, Acoustical Society of America, v. 34, n. 12, p. 1936–1956, 1962.
- WILLIAMS, R. et al. Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. **Ocean & Coastal Management**, Elsevier, v. 115, p. 17–24, 2015.
- WITTEN, I.H.; FRANK, E.; HALL, M.A. **Data Mining: Practical Machine Learning Tools and Techniques**. [S.l.]: The Morgan Kaufmann Publishers, 3rd ed., Burlington, 2011.

XAVIER, F.C. **Assinatura bioacústica de costões rochosos: caracterização, modelagem e aplicações biotecnológicas**. 2021. Tese (Doutorado) – Programa Associado de Pós-Graduação em Biotecnologia Marinha, Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Universidade Federal Fluminense.

ZHANG, L. et al. Large-scale whale-call classification by transfer learning on multi-scale waveforms and time-frequency features. **Applied Sciences**, MDPI, v. 9, n. 5, p. 1020, 2019.

APÊNDICES

APÊNDICE A – CARACTERÍSTICAS ACÚSTICAS DE INVERTEBRADOS BENTÔNICOS

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL (<i>dB re 1μPa²</i>)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Synalpheus parneomeris</i> (camarão-estalo)	2 a 200	2 a 5	189 (pico)	Fechamento da garra	Laboratório	(AU; BANKS, 1998)
<i>Alpheus</i> spp e <i>Syalpheus</i> spp (camarão-estalo)	2,5 a 20	5	-	Fechamento da garra	Nordeste da Nova Zelândia em ambientes costeiros	(RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010)
<i>Athanas nitescens</i> (camarão-estalo)	-	5 a 11 (média 9)	102 a 152 (média 145)	Fechamento da garra	Laboratório.	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
Espécie não informada (camarão-estalo)	2 a 20	-	60 a 80	Fechamento da garra	San Diego em um pier	(FREEMAN et al., 2014)
<i>Alpheus heterochaelis</i> e <i>Alpheus angulosus</i> (camarão-estalo)	0,2 a 150	4,10	158,9	Fechamento da garra	Laboratório	(SONG; SALAS et al., 2021)
Espécie não informada (camarão-estalo)	1,5 a 10	4,29	156,0	Fechamento da garra	Xiamen Bay (sudeste da China)	(SONG; OU et al., 2023)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL ($dB re 1\mu Pa^2$)	Tipo de som	Local	Referência
Espécie não informada (camarão-estalo)	1,5 a 10	2,54	172,5	Fechamento da garra	Zhao'an Bay (sudeste da China)	(SONG; OU et al., 2023)
Espécie não informada (camarão-estalo)	1,5 a 10	2,53	186,2	Fechamento da garra	Daya Bay (sudeste da China)	(SONG; OU et al., 2023)
Espécie não informada (camarão-estalo)	1,5 a 10	4,16	165,5	Fechamento da garra	Pearl River Estuary (sudeste da China)	(SONG; OU et al., 2023)
<i>Palaemon serratus</i> (camarão de costão)	-	12 a 58 (média 35)	91 a 116 (média 102)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Maja brachydactyla</i> (caranguejo)	-	5 a 11 (média 7)	127 a 145 (média 136)	Comportamento específico tipo 1	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Maja brachydactyla</i> (caranguejo)	-	3 a 5 (média 5)	132 a 150 (média 145)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL ($dB re 1\mu Pa^2$)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Cancer pagurus</i> (caranguejo)	-	2 a 35 (média 5)	100 a 121 (média 109)	Locomoção em rocha	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Cancer pagurus</i> (caranguejo)	-	2 a 44 (média 5)	99 a 130 (média 117)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Cancer pagurus</i> (caranguejo)	-	8 a 64 (média 28)	90 a 117 (média 109)	Fricção de mandíbulas	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Cancer pagurus</i> (caranguejo)	-	5 a 38 (média 13)	128 a 146 (média 142)	Comportamento específico não definido	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Cancer pagurus</i> (caranguejo)	-	3 a 65 (média 33)	89 a 105 (média 96)	Fricção de antena na zona facial	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Cancer pagurus</i> (caranguejo)	-	2 a 12 (média 6)	104 a 121 (média 110)	Comportamento específico tipo 1	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL ($dB re 1\mu Pa^2$)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Cancer pagurus</i> (caranguejo)	-	28 a 64 (média 45)	102 a 127 (média 111)	Comportamento específico não definido	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Carcinus maenas</i> (caranguejo)	-	2 a 16 (média 4)	92 a 106 (média 97)	Locomoção em rocha	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Carcinus maenas</i> (caranguejo)	-	4 a 13 (média 8)	100 a 125 (média 114)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Carcinus maenas</i> (caranguejo)	-	16 a 60 (média 39)	87 a 106 (média 97)	Fricção de mandíbulas	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Carcinus maenas</i> (caranguejo)	-	3 a 49 (média 4)	93 a 118 (média 101)	Comportamento específico tipo 1	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Necora puber</i> (caranguejo)	-	2 a 17 (média 4)	98 a 124 (média 104)	Locomoção em rocha	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL ($dB re 1\mu Pa^2$)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Necora puber</i> (caranguejo)	-	3 a 55 (média 7)	116 a 140 (média 128)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Necora puber</i> (caranguejo)	-	13 a 62 (média 34)	101 a 119 (média 109)	Fricção de mandíbulas	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Necora puber</i> (caranguejo)	-	6 a 14 (média 9)	112 a 119 (média 115)	Comportamento específico tipo 1	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Necora puber</i> (caranguejo)	-	9 a 64 (média 30)	100 a 115 (média 108)	Fricção de mandíbula com quelípede	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Necora puber</i> (caranguejo)	-	8 a 63 (média 33)	93 a 115 (média 101)	Fricção de quelípede	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Pachygrapsus marmoratus</i> (caranguejo)	-	2 a 24 (média 7)	99 a 135 (média 112)	Locomoção em rocha	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL ($dB re 1\mu Pa^2$)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Pachygrapsus marmoratus</i> (caranguejo)	-	2 a 6 (média 4)	103 a 120 (média 115)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Pachygrapsus marmoratus</i> (caranguejo)	-	3 a 29 (média 3)	103 a 126 (média 103)	Comportamento específico tipo 1	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Lophozozymus incisus</i> (caranguejo)	-	2 a 16 (média 6)	94 a 117 (média 102)	Locomoção em rocha	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Lophozozymus incisus</i> (caranguejo)	-	3 a 26 (média 7)	90 a 107 (média 97)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Lophozozymus incisus</i> (caranguejo)	-	19 a 55 (média 41)	91 a 94 (média 93)	Fricção de mandíbulas	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Lophozozymus incisus</i> (caranguejo)	-	2 a 30 (média 12)	105 a 125 (média 114)	Comportamento específico tipo 1	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL (<i>dB re 1μPa²</i>)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Pollicipes pollicipes</i> (craca lepas)	-	4 a 64 (média 40)	86 a 118 (média 103)	Contato entre indivíduos	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Galathea squamifera</i> (lagosta)	-	3 a 34 (média 6)	97 a 119 (média 103)	Locomoção em rocha	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Galathea squamifera</i> (lagosta)	-	3 a 47 (média 25)	90 a 100 (média 93)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Galathea squamifera</i> (lagosta)	-	9 a 65 (média 36)	101 a 139 (média 116)	Fricção da antena	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CLAVIER et al., 2016)
<i>Clibanarius diugeti</i> (ermião)	6 a 20	-	35 a 65	Movimentação	Laboratório	(FREEMAN et al., 2014)
<i>Lytechinus variegatus</i> (ouriço)	0,106 a 24	2 a 4	35,25 a 110,45	Alimentação	Laboratório	(MENDES, 2018)
<i>Evechinus chloroticus</i> (ouriço)	37 a 49	-	60 a 90	Alimentação	Laboratório	(RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008b)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL (<i>dB re 1μPa²</i>)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Evechinus chloroticus</i> (ou-riço)	0,8 a 2,8	-	60 a 90	Alimentação (ressonância)	Laboratório	(RADFORD; JEFFS; TINDLE et al., 2008a)
Espécie não informada (ou-riço)	0,8 a 2,5	1 a 1,2	-	Alimentação	Nordeste da Nova Zelândia em ambientes costeiros	(RADFORD; STANLEY; TINDLE et al., 2010)
<i>Echinus esculentus</i> (ou-riço)	-	9 a 63 (média 38)	93 a 130 (média 105)	Locomoção	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Echinus esculentus</i> (ou-riço)	-	23 a 62 (média 46)	103 a 142 (média 125)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Paracentrotus lividus</i> (ou-riço)	-	9 a 60 (média 39)	87 a 126 (média 100)	Locomoção	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Paracentrotus lividus</i> (ou-riço)	-	26 a 59 (média 45)	86 a 130 (média 107)	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL (<i>dB re 1μPa</i>²)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Psammechinus miliaris</i> (ouriço)	-	11 a 72 (média 47)	90 a 117 (média 100)	Locomoção	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Psammechinus miliaris</i> (ouriço)	-	42 a 57	110 a 125	Alimentação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Centrostephanus rogersii</i> (ouriço)	0,4 a >20	3 a 7	-	Alimentação	Laboratório	(SOARS; BYRNE; CATO, 2016)
<i>Heliocidaris tuberculata</i> (ouriço)	1,2 a >20	1,2 a 7	-	Alimentação	Laboratório	(SOARS; BYRNE; CATO, 2016)
<i>Echinothrix diadema</i> (ouriço)	0,7 a >20	2 a 12	-	Alimentação	Laboratório	(SOARS; BYRNE; CATO, 2016)
<i>Echinometra mathaei</i> (ouriço)	2,3 a >20	2,5 a 18	-	Alimentação	Laboratório	(SOARS; BYRNE; CATO, 2016)
<i>Perna perna</i> (bivalve)	0,14 a 23,9	4 a 6	43 a 105	Movimento das valvas	Laboratório	(MELO JÚNIOR et al., 2019)
<i>Pecten maximus</i> (bivalve)	3 a 48	20 a 27	80 a 115	Fechamento de valvas	Laboratório	(DI IORIO et al., 2012)

Continua

TABELA 1 – Compilação de características acústicas de invertebrados registradas na literatura científica.

Espécie	Faixa de frequência principal (kHz)	Pico de Frequência (kHz)	SPL ($dB re 1\mu Pa^2$)	Tipo de som	Local	Referência
<i>Pecten maximus</i> (bivalve)	-	12 a 57 (média 35)	93 a 134 (média 116)	Natação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Mimachlamys varia</i> (bivalve)	-	8 a 62 (média 35)	92 a 114 (média 100)	Natação	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Mimachlamys varia</i> (bivalve)	-	4 a 62 (média 37)	8 a 125 (média 103)	Salto (jumping)	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Crepidula fornicata</i> (gastropode)	-	8 a 63 (média 45)	91 a 121 (média 102)	Locomoção	Laboratório	(COQUEREAU; GRALL; CHAUVAUD et al., 2016)
<i>Rhynchocinetes typus</i> (camarão de costão) e <i>Loxechinus albus</i> (ouriço)	1,5 a 2,7	2,07	88	-	Área central do Chile em um costão rochoso e Laboratório	(BORIE et al., 2015)
Invertebrados em geral	11 a 17	14,3 a 14,63	62,28 a 75,59	Movimentação	Arquipélago Line Islands	(FREEMAN et al., 2014)

Conclusão

