



MARINHA DO BRASIL
INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ACÚSTICA SUBMARINA

ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM REGIÕES DE ALTA PRODUTIVIDADE NA
PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE BRASILEIRA

Yasmin Cristina Bidú dos Anjos

Dissertação de Mestrado apresentada ao
Programa de Pós-Graduação em Acústica
Submarina, PPGAS, do Instituto de Estudos
do Mar Almirante Paulo Moreira, como parte
dos requisitos necessários à obtenção do título
de Mestre em Acústica Submarina.

Orientador: Marcos Tonelli

Arraial do Cabo
Novembro de 2024

ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM REGIÕES DE ALTA PRODUTIVIDADE NA
PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE BRASILEIRA

Yasmin Cristina Bidú dos Anjos

DISSERTAÇÃO SUBMETIDA AO CORPO DOCENTE DO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM ACÚSTICA SUBMARINA DO INSTITUTO DE ESTUDOS DO MAR ALMIRANTE PAULO MOREIRA COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE MESTRE EM CIÊNCIAS EM ACÚSTICA SUBMARINA.

Orientador: Prof. Marcos Tonelli , PhD

Aprovada por: Prof. Marcos Tonelli, Ph.D.

Prof. Eduardo Esteves Vale, Ph.D.

Prof. Ubirajara Gonçalves de Melo Júnior, Ph.D.

Prof. Eduardo Barros Fagundes Netto, Ph.D.

ARRAIAL DO CABO, RJ – BRASIL

NOVEMBRO DE 2024

, Yasmin Cristina Bidú dos Anjos

Atenuação Acústica em Regiões de Alta Produtividade na Plataforma Continental Sudeste Brasileira/Yasmin Cristina Bidú dos Anjos . – Arraial do Cabo: IEAPM, 2024.

XV, 55 p.: il.; 29, 7cm.

Orientador: Marcos Tonelli

Dissertação (mestrado) – IEAPM/Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina, 2024.

Referências Bibliográficas: p. 49 – 55.

1. Atenuação acústica. 2. Zooplâncton. 3. Plataforma continental sudeste. I. , Marcos Tonelli. II. Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira, Programa de Pós-Graduação em Acústica Submarina. III. Título.

*À minha família, pela base sólida
e apoio incondicional, por serem
meu alicerce e força constante ao
longo desta jornada.*

*Sua presença e encorajamento
inabaláveis foram essenciais para
a realização deste trabalho.*

*Com eterna gratidão e carinho,
dedico a vocês o fruto de todo o
esforço.*

Agradecimentos

"Os autores agradecem à Marinha do Brasil, à empresa Petróleo Brasileiro S.A. (PETROBRAS) e à Agência Nacional do Petróleo, Gás Natural e Biocombustíveis (ANP) por tornarem possíveis os trabalhos de campo, por meio dos Termos de Cooperação SIGITEC 2018/00451-6 e 2018/00452-2."

“Se fiz descobertas valiosas, foi mais por ter paciência do que qualquer outro talento”

Isaac Newton

Resumo da Dissertação apresentada ao IEAPM como parte dos requisitos necessários para a obtenção do grau de Mestre em Ciências (M.Sc.)

ATENUAÇÃO ACÚSTICA EM REGIÕES DE ALTA PRODUTIVIDADE NA PLATAFORMA CONTINENTAL SUDESTE BRASILEIRA

Yasmin Cristina Bidú dos Anjos

Novembro/2024

Orientador: Marcos Tonelli

Programa: Acústica Submarina

Este estudo teve como objetivo avaliar a atenuação acústica em regiões de alta produtividade na plataforma continental sudeste do Brasil, com foco na influência da biomassa zooplanctônica sobre a propagação do som. A pesquisa foi conduzida em duas áreas com regimes oceanográficos distintos: Arraial do Cabo-RJ e Sepetiba-RJ. Dados oceanográficos físicos e biológicos foram coletados durante duas campanhas no âmbito do projeto Sistema Tático de Fatores Ambientais (STFA). Os resultados mostraram que a atenuação acústica causada pelo zooplâncton é baixa, mas varia conforme as frações de tamanho (macro, meso e micro) e as frequências de som analisadas. Em Arraial do Cabo, a maior biomassa de zooplâncton, especialmente macrozooplâncton, resultou em uma atenuação mais expressiva. Já em Sepetiba, a atenuação foi menos pronunciada devido às variações de temperatura e salinidade. A fluorescência se mostrou uma ferramenta promissora para estimar a concentração e a distribuição do zooplâncton, possibilitando uma melhor compreensão da atenuação acústica causada por esses organismos. O estudo sugere que para baixas frequências, como as emitidas por submarinos e navios, a influência do zooplâncton na atenuação é negligenciável. Para estudos futuros, recomenda-se a exploração de outras regiões oceânicas e a análise de fatores adicionais que possam influenciar a propagação do som no ambiente marinho, como a interação entre zooplâncton e o sedimento em suspensão.

Abstract of Dissertation presented to IEAPM as a partial fulfillment of the requirements for the degree of Master of Science (M.Sc.)

ACOUSTIC ATTENUATION IN REGIONS OF HIGH PRODUCTIVITY IN THE BRAZILIAN SOUTHEAST CONTINENTAL SHELF

Yasmin Cristina Bidú dos Anjos

November/2024

Advisor: Marcos Tonelli

Department: Underwater Acoustics

This study assessed the acoustic attenuation in high-productivity regions of the southeastern Brazilian continental shelf, specifically examining how zooplankton biomass influences sound propagation. The research was conducted in two areas with contrasting oceanographic regimes: Arraial do Cabo/RJ, known for its upwelling system, and Sepetiba/RJ, characterized by more stable coastal waters. Oceanographic and biological data were collected during two Tactical System of Environmental Factors (STFA) project campaigns. The findings indicated that although zooplankton-induced acoustic attenuation was generally low, it varied significantly depending on the size fractions of the zooplankton and the sound frequencies analyzed. Larger zooplankton contributed more to attenuation at lower frequencies, while microzooplankton had a more pronounced impact at higher frequencies. Fluorescence was identified as a valuable tool for estimating zooplankton concentration and distribution, offering insights into how these organisms influence acoustic propagation. Future research should focus on exploring additional oceanic regions and bearing a broader range of biological and physical factors that may affect sound transmission in the marine environment.

Sumário

Lista de Figuras	xi
Lista de Símbolos	xiv
1 Introdução	1
1.1 Propagação do som	3
1.1.1 Propagação do som no mar	5
1.1.2 Propagação do som e a barreira biológica	5
1.2 Atenuação acústica	6
1.2.1 Atenuação por partículas em suspensão	8
1.2.2 Zooplâncton	9
1.3 Objetivos	12
2 Metodologia	13
2.1 Área de estudo	13
2.2 Coleta de dados físicos	15
2.3 Coleta biológica	17
2.4 Cálculo da atenuação acústica	18
2.4.1 Parte I	18
2.4.2 Parte II	19
2.5 Cálculo da atenuação pela fração do zooplâncton	22
2.6 Relação da fluorescência com a atenuação acústica	22
3 Resultados e Discussões	25
3.1 Análises oceanográficas	25
3.2 Atenuação	30

3.2.1	Atenuação pelo tamanho do zooplâncton	34
3.2.2	Zooplâncton como fator atenuante do sinal acústico	39
3.3	Relação da fluorescência com a atenuação	43
4	Conclusões	46
	Referências Bibliográficas	49

Lista de Figuras

1.1	Figura esquematizada de um hidrofone, no meio subaquático, captando o som da paisagem acústica (emissor).	4
1.2	Figura esquematizada da energia incidente, mostrando a parcela refletida e espalhada (adaptada de Vorländer & Mommertz [1]).	9
1.3	Planctontes (fito e zoo) vistos ao microscópio. Pequenas células esverdeadas representam o fitoplâncton; organismos maiores e transparentes, com apêndices e antenas longas, representam o zooplâncton (copépodes) (adaptado de Hennesy et al. [2]).	10
1.4	Representação simplificada da teia alimentar marinha, mostrando a relevância do zooplâncton para a cadeia alimentar (adaptado de Hennesy et al.[2]).	11
2.1	Mapa topográfico da Região dos Lagos Fluminense e batimetria da plataforma continental, onde os pontos vermelhos/amarelos mostram estações relativa a coleta de Arraial do Cabo/Sepetiba.	14
2.2	Representação esquematizada da ressurgência costeira na região de Cabo Frio. A seta preta representa a ação do vento de NE, as setas salmão representam o transporte de Ekman <i>offshore</i> e as setas azuis representam o movimento de ascensão das águas profundas.	15
2.3	Lançamento de CTD para coleta e registro de parâmetros de estado da água do mar (Salinidade (condutividade), Temperatura e Profundidade (pressão)).	17
3.1	Perfis verticais da temperatura e da salinidade em Arraial do Cabo/RJ.	26
3.2	Perfis verticais da temperatura e da salinidade em Arraial do Cabo /RJ nas estações com profundidade de 1200 m e 1500 m.	26

3.3	Perfil vertical da velocidade do som em Arraial do Cabo (RJ), com a velocidade do som (m/s) representada no eixo x e a profundidade (m) no eixo y.	27
3.4	Perfis verticais de temperatura e salinidade nas estações 06 e 08, na região de Sepetiba.	28
3.5	Perfis verticais de temperatura, salinidade e velocidade do som nas regiões de estudo: estação 17 (Arraial do Cabo/RJ) na parte superior e estação 06 (Sepetiba/RJ) na parte inferior.	29
3.6	Atenuação do som usando as metodologias de Moore [3] e Kinssler et al. [4] nas duas regiões de estudo (Arraial do Cabo/RJ e Sepetiba/RJ). As cores representam as diferentes componentes da atenuação.	30
3.7	Atenuação do som usando as metodologias de Moore [3] e Kinsler et al. [4] nas estações 06, 08 e 14 na região de Sepetiba/RJ. As cores representam as diferentes componentes da atenuação.	31
3.8	Atenuação do som usando as metodologias de Moore [3] e Kinsler et al. [4] em Arraial do Cabo/RJ. As cores representam as diferentes componentes da atenuação.	32
3.9	Atenuação do som calculada pelas metodologias de Moore [3] e Kinsler et al. [4] nas duas regiões de estudo. Na parte superior, estão representadas as estações 06, 08 e 14 da região de Sepetiba/RJ, com profundidades de 43 m, 58 m e 161 m, respectivamente. Na parte inferior, as estações 17, 07 e 02 da região de Arraial do Cabo/RJ, com profundidades de 54 m, 68 m e 175 m, respectivamente. As cores representam as diferentes componentes da atenuação.	33
3.10	Gráfico de dispersão relacionando a atenuação pelo zooplâncton com a velocidade do som e a temperatura. A velocidade do som (m/s) é representada no eixo x, enquanto a atenuação (dB/km) é exibida no eixo y.	34
3.11	Atenuação pelo zooplâncton em diferentes tamanhos (macro, meso e micro) na região de Sepetiba (RJ), com os dados da primeira figura correspondendo à estação 06 e da segunda, à estação 08.	35

3.12	Atenuação pelo zooplâncton em diferentes tamanhos (macro, meso e micro) na região de Arraial do Cabo (RJ), com os dados da primeira figura correspondendo à estação 01 e da segunda, à estação 02.	36
3.13	Atenuação pelo zooplâncton de acordo com o seu tamanho (macro, meso e micro) nas duas regiões de estudo (Sepetiba/RJ - estação 14 e Arraial do Cabo/RJ - estação 06).	37
3.14	Atenuação pelo zooplâncton de acordo com o tamanho (macro, meso e micro) nas duas regiões de estudo (Sepetiba/RJ parte superior da figura e Arraial do Cabo/RJ parte inferior da figura), relacionando a atenuação acústica com a biomassa do zooplâncton.	38
3.15	Banda esperada para níveis espectrais de navios e submarinos (adaptada de Tramujas [5]).	39
3.16	Atenuação estimada pelo zooplâncton de um sinal de navio de grande porte (sinal superior) e de um submarino (sinal inferior) para duas frequências diferentes em Arraial do Cabo/RJ.	40
3.17	Atenuação estimada pelo zooplâncton de um sinal de navio de grande porte (sinal superior) e de um submarino (sinal inferior) para duas frequências diferentes em Sepetiba/RJ.	41
3.18	Atenuação estimada pelo zooplâncton de um sinal de navio de grande porte (sinal superior) e de um submarino (sinal inferior) para duas frequências diferentes nas duas regiões de estudo (Sepetiba/RJ e Arraial do Cabo/RJ).	42
3.19	Gráfico de dispersão mostrando a relação entre a fluorescência e a atenuação acústica (dB/km) causada por diferentes categorias de zooplâncton: macrozooplâncton (azul), mesozooplâncton (rosa) e microzooplâncton (cinza).	44
3.20	Gráfico de dispersão mostrando a relação entre a fluorescência e a atenuação acústica (dB/km) pelo zooplâncton. O gráfico ilustra como a fluorescência do zooplâncton se correlaciona com a atenuação do som.	45

Lista de Símbolos

A	mecanismo de relação química pelo ácido bórico, p. 19
B	mecanismo de relação química pelo sulfato de magnésio, p. 19
C	mecanismo de absorção da água na equação de [4], p. 19
M	biomassa do zooplâncton, p. 20
S	salinidade, p. 19
S, δ	variáveis encontradas pela simplificação da função esférica de Bessel [6], p. 21
T	temperatura, p. 19
Z	profundidade, p. 19
α	absorção do som na água do mar, p. 19
$\alpha_{p.s}$	atenuação pelo espalhamento do zooplâncton, p. 19
$\alpha_{p.v}$	atenuação pela viscosidade do zooplâncton, p. 19
αw	mecanismo de absorção da água na equação de [7], p. 19
β	razão do raio da partícula e da espessura viscosa da camada limite, p. 21
λ	comprimento da onda, p. 20
$\langle \zeta_s \rangle$	média da distribuição da constante de espalhamento do zooplâncton, p. 20

$\langle \zeta_v \rangle$	média da distribuição da constante de viscosidade do zooplâncton, p. 20
ρ_0	densidade do meio, p. 21
ρ_s	densidade do zooplâncton, p. 20
a	atenuação do som em dB/m, p. 19
a_z	diâmetro do zooplâncton, p. 20
c	velocidade do som, p. 20
f	frequência do sinal emitido, p. 19
f_1	frequência da relaxação do ácido bórico, p. 19
f_2	frequência da relaxação do sulfato de magnésio, p. 19
k	número de ondas, p. 20
ν	viscosidade cinemática, p. 21

Capítulo 1

Introdução

O som, como fenômeno físico, tem a capacidade de se propagar em diversos meios materiais, sendo usualmente caracterizado como a vibração das partículas do meio ao redor de uma fonte de oscilação. Essa propagação sonora ocorre pela interação entre partículas adjacentes do meio, que transferem energia entre si, transmitindo assim a vibração gerada por uma fonte original. Essa definição, conforme descrita por Bistafa et al. [8], está diretamente associada à natureza do som como uma onda mecânica, que depende da presença de um meio material para sua transmissão. A partir dessa perspectiva, Okuno et al. [9] destacam que a propagação sonora pode ocorrer em meios sólidos, líquidos ou gasosos, sendo as ondas mecânicas longitudinais o principal mecanismo envolvido nesse processo.

O movimento das partículas do meio, inicialmente perturbadas por uma fonte vibratória, causa a perturbação subsequente de outras partículas, num processo contínuo de transmissão de energia acústica. Esse processo de propagação depende não apenas das propriedades mecânicas do meio, mas também de sua composição e heterogeneidade, que podem influenciar a forma como a energia é transferida e dissipada ao longo do percurso. O trabalho de Fusinato et al. [10] descreve que essa transferência de energia entre as partículas, embora eficiente em meios homogêneos, está sujeita a perdas dissipativas que ocorrem principalmente sob a forma de conversão de energia acústica em calor.

Durante a propagação do som, a intensidade do sinal tende a diminuir, em função de diversos fatores ambientais e físicos. A esse fenômeno, dá-se o nome de "atenuação acústica", que pode ser explicada por dois mecanismos principais:

absorção e espalhamento. A absorção ocorre quando parte da energia acústica é transformada em calor, resultado da interação das ondas sonoras com as partículas do meio. Por outro lado, o espalhamento se refere à dispersão da onda sonora em diferentes direções, devido à presença de heterogeneidades no meio, como bolhas de ar, partículas sólidas e massas biológicas, como zooplâncton. Esse processo é amplamente discutido por Melo [11], que ressalta a importância de compreender como esses fatores afetam o comportamento das ondas sonoras em ambientes complexos.

A atenuação acústica está intrinsecamente relacionada a uma série de fatores físicos, químicos e biológicos que alteram o modo como o som se propaga. Entre os fatores físicos, destaca-se a temperatura da água, que influencia diretamente a velocidade de propagação do som. Conforme apontado por Saliba et al. [12] e Durante [13], o comportamento do som no meio marinho é fortemente influenciado pela variabilidade dos parâmetros físico-químicos, como salinidade, densidade e, especialmente, a temperatura. De fato, mudanças na temperatura podem alterar a velocidade do som, uma vez que afetam a densidade e compressibilidade do meio.

No entanto, além dos fatores físico-químicos, a atividade biológica no ambiente marinho também desempenha um papel fundamental na propagação do som. Em áreas com alta concentração de organismos planctônicos, como ocorre em regiões costeiras de elevada produtividade primária, a absorção acústica pode ser significativamente maior. O trabalho de Bradley et al. [14] demonstra que a presença de grandes quantidades de partículas biológicas em suspensão, especialmente zooplâncton, aumenta a atenuação do sinal acústico, uma vez que essas partículas interagem com as ondas sonoras, absorvendo parte de sua energia e espalhando-a em diferentes direções.

A densidade do zooplâncton, em particular, é um fator com potencial relevância na atenuação acústica, pois esses organismos constituem uma fração significativa da matéria biológica em suspensão, especialmente em áreas costeiras de alta produtividade, como Arraial do Cabo/RJ. A presença de concentrações elevadas de zooplâncton pode, portanto, interferir na propagação do som, como demonstrado por Da Silva et al. [15]. Nesses casos, a presença de organismos biológicos pode intensificar a absorção e o espalhamento acústico, resultando em maior atenuação do sinal.

Adicionalmente, microrganismos planctônicos e os subprodutos metabólicos que produzem, como gases, também influenciam a propagação acústica subaquática, especialmente em ambientes com alta concentração de plâncton [16]. Dessa forma, a distribuição espacial e a densidade do zooplâncton podem reduzir significativamente a intensidade de um sinal acústico em propagação, interferindo diretamente na qualidade dos dados acústicos obtidos. Estudos como os de Gorska [17] indicam que, embora a atenuação biológica seja relativamente pequena em condições normais, ela pode tornar-se um fator determinante em ambientes onde os organismos biológicos estão densamente agregados ou distribuídos em grande escala.

Diante dessa realidade, este estudo propõe-se a avaliar os efeitos da biomassa de zooplâncton sobre a propagação acústica no ambiente marinho, em particular sobre o fenômeno da atenuação biológica, em duas regiões costeiras do sudeste brasileiro: Arraial do Cabo/RJ e Sepetiba/RJ. Ambas as regiões são caracterizadas por regimes oceanográficos distintos, que influenciam a composição e a estrutura das comunidades planctônicas locais. O objetivo é quantificar a contribuição da biomassa de zooplâncton na atenuação do sinal acústico, comparando-a com as perdas de sinal associadas às variações de temperatura da água do mar, permitindo, assim, uma melhor compreensão dos mecanismos que influenciam a transmissão acústica em ambientes marinhos altamente produtivos.

1.1 Propagação do som

A acústica é uma ciência que se dedica ao estudo dos fenômenos relacionados ao som, abrangendo desde sua produção, propagação a partir de uma fonte emissora, até sua detecção e percepção [18]. Assim, a acústica pode ser entendida como a ciência do som, investigando não apenas a origem das ondas sonoras, mas também os mecanismos envolvidos em sua transmissão por diversos meios. O som pode ser gerado por diferentes processos físicos, como vibrações de corpos sólidos, variações no fluxo de ar, fontes de calor dependentes do tempo, ou até mesmo por fluxos supersônicos [18].

A percepção do som é o resultado dos distúrbios provocados no meio por moléculas que oscilam em resposta a uma fonte emissora. Essas oscilações se propagam sob a

forma de ondas, e o processo de propagação do som exige três componentes principais: um emissor, o meio material que propaga o som, e um receptor [19]. O emissor gera as perturbações no meio, que são transmitidas ao receptor, como no caso de um sinal acústico emitido na água (meio) por uma fonte (emissor), e captado por um hidrofone (receptor), ilustrado na Figura 1.1. Dessa forma, o som se propaga, transferindo energia e informações através do meio.



Figura 1.1: Figura esquematizada de um hidrofone, no meio subaquático, captando o som da paisagem acústica (emissor).

A propagação do som pode ocorrer em diferentes meios materiais – sólidos, líquidos ou gasosos – sendo que o que se propaga é o movimento das ondas e não as partículas individuais do meio. Como descrito por Beppu et al. [20], a onda sonora transporta energia e informações de um ponto a outro sem deslocar matéria. Por exemplo, durante uma explosão, as moléculas de ar no ponto da detonação são comprimidas, gerando uma onda de compressão que se propaga até alcançar o tímpano de uma pessoa próxima, criando uma percepção sonora no cérebro sem que partículas da explosão sejam transportadas [21].

1.1.1 Propagação do som no mar

A propagação do som em ambientes marinhos é influenciada por diversas características físico-químicas da água. Barreiras físicas, como variações de temperatura, salinidade e pressão, afetam significativamente a propagação sonora, atenuando o sinal acústico e limitando a distância que o som pode percorrer. A velocidade do som na água é fortemente dependente desses parâmetros, especialmente da temperatura, que altera a densidade do meio [22].

A temperatura da água, que pode variar tanto horizontalmente quanto verticalmente, é um dos fatores mais importantes na propagação do som. Em profundidades maiores, observa-se a existência de camadas térmicas, como a termoclina, onde a temperatura diminui rapidamente [22]. Esse gradiente térmico impacta diretamente na velocidade do som, uma vez que o som se propaga mais rapidamente em águas mais quentes.

A salinidade, por sua vez, afeta a compressibilidade da água e, conseqüentemente, a velocidade do som. Embora as variações de salinidade sejam geralmente menores do que as de temperatura, seu impacto na propagação acústica é significativo, especialmente em áreas costeiras e em regiões onde há aporte de água com baixa salinidade [23]. A pressão, convertida em profundidade, também exerce influência sobre a propagação do som, aumentando a compressão das moléculas de água em função da profundidade.

Além desses fatores físicos, barreiras biológicas, como a presença de zooplâncton, também podem atuar como atenuadores do som, refletindo ou absorvendo parte da energia acústica. Embora a magnitude desse efeito biológico seja relativamente pequena na maioria dos casos, sua relevância em áreas com alta concentração de organismos, como zonas costeiras, pode ser significativa [17].

1.1.2 Propagação do som e a barreira biológica

Os organismos presentes no oceano, além de produzirem sons próprios, podem interferir na propagação do som ao atuarem como barreiras acústicas. Essas barreiras resultam na dissipação da energia sonora, que é refletida ou absorvida quando encontra corpos sólidos ou biológicos, como cardumes de peixes ou grandes concentrações de plâncton. A quantidade de energia dissipada depende de fatores como o tamanho,

densidade e concentração dos organismos envolvidos [24].

As diferenças de densidade e compressibilidade entre a água e os organismos marinhos são responsáveis pela reflexão das ondas sonoras [25]. Microrganismos como o zooplâncton, por exemplo, podem reduzir significativamente a intensidade de um sinal acústico, dificultando sua propagação. Em alguns casos, como durante migrações de cardumes, essas barreiras biológicas podem ter um impacto significativo na atenuação do som [26].

A dispersão omnidirecional da energia sonora, associada à presença de obstáculos biológicos, limita a distância que o som pode percorrer e pode reduzir a precisão de sistemas de detecção acústica. No entanto, técnicas acústicas modernas permitem estimar remotamente a biomassa marinha, oferecendo uma valiosa ferramenta para a compreensão da dinâmica ecológica no oceano [17].

Em ambientes onde a agregação de organismos é elevada, o conhecimento da atenuação acústica causada por fatores biológicos torna-se essencial para a interpretação acurada dos dados acústicos. Isso é particularmente relevante em regiões costeiras e estuários, onde o impacto da biota marinha na propagação do som pode ser substancial [27].

1.2 Atenuação acústica

O som, como uma qualidade perceptiva, é resultante de distúrbios nas moléculas de um meio que ocorrem em um determinado espaço e tempo. Esses distúrbios se manifestam na forma de ondas durante a propagação pelo meio, o que caracteriza o som como uma onda mecânica longitudinal [19]. Diferentemente das ondas eletromagnéticas, as ondas sonoras necessitam de um meio material para se propagar e, por isso, não se propagam no vácuo [28]. Dessa forma, o som é transmitido pela vibração de uma fonte sonora, que induz vibrações nas partículas do meio, promovendo a transferência de energia entre elas até que essa energia seja totalmente dissipada.

Essa transferência de energia, conforme descrito por Kinsler et al. [4], ocorre por meio de vibrações que se propagam pelas partículas do meio, convertendo toda a energia acústica em energia térmica no final do processo. Essa dissipação pode ocorrer tanto devido às características do meio quanto devido aos limites desse meio,

sendo um fenômeno complexo influenciado por múltiplos fatores. O estudo detalhado desses processos é essencial para a compreensão da acústica submarina, dado que as condições no ambiente marinho favorecem diversas formas de atenuação do som.

A dissipação da energia sonora pode ser atribuída a perdas no meio ou a processos associados aos seus limites. As perdas no meio dividem-se em três categorias principais: viscosidade, condução térmica e processos moleculares [4]. As perdas por viscosidade estão relacionadas às forças de atrito que agem entre as partículas do meio, especialmente em líquidos, onde as forças de coesão entre moléculas são responsáveis por essa resistência ao movimento [29]. Esse atrito interno, que constitui a viscosidade do fluido, resulta em perdas de energia à medida que o som se propaga, diminuindo a intensidade do sinal acústico ao longo do tempo.

Além da viscosidade, Kinsler et al. [4] apontam que a condução de calor também contribui para a dissipação da energia sonora, ocorrendo quando há transferência de calor das regiões de maior compressão (temperaturas mais elevadas) para as áreas de rarefação (temperaturas mais baixas). Por fim, as perdas associadas a processos moleculares envolvem a conversão da energia cinética das moléculas em outros tipos de energia, como a energia rotacional, vibracional, potencial e a energia associada a processos iônicos.

No contexto marinho, Clay et al. [30] argumentam que a condução térmica na água é um fator de menor relevância e, portanto, pode ser combinada com a perda por viscosidade em um único coeficiente de atenuação, denominado coeficiente clássico. Assim, para calcular a atenuação do som no oceano, considera-se tanto o coeficiente clássico de absorção (que engloba a perda por condução térmica e por viscosidade) quanto o coeficiente relacionado a processos moleculares específicos da água do mar.

Estudos de absorção acústica em água do mar destacam dois mecanismos principais de relaxação química: o relaxamento iônico do sulfato de magnésio (MgSO_4), identificado como o principal mecanismo de absorção para frequências abaixo de 100 kHz [31], e o relaxamento químico do ácido bórico [4]. Esses dois processos são essenciais para o cálculo do coeficiente de absorção em águas marinhas, uma vez que ambos contribuem significativamente para a atenuação do som em diferentes condições ambientais.

1.2.1 Atenuação por partículas em suspensão

A atenuação de uma onda acústica refere-se à redução progressiva de sua intensidade à medida que ela percorre uma certa distância. Essa redução pode ser atribuída a diferentes mecanismos, incluindo atenuação geométrica (causada por difração e espalhamento) e atenuação devido às propriedades do meio (perdas por viscosidade, condução térmica e relaxação química) [32]. Além disso, os limites do meio, como superfícies de reflexão e transmissão, também podem contribuir para a atenuação acústica.

Meios heterogêneos, como o oceano, são particularmente propensos à atenuação acústica devido à presença de bolhas de ar, partículas em suspensão e microestruturas térmicas, que afetam a propagação do som de maneira significativa [4]. A existência dessas heterogeneidades pode acelerar o processo de atenuação da energia acústica, uma vez que a onda sonora sofre reflexões e espalhamentos ao encontrar esses obstáculos, perdendo energia ao longo do caminho.

Quando uma onda sonora incide sobre partículas em suspensão, parte de sua energia é refletida, e parte é dispersa em várias direções, um fenômeno conhecido como *backscatter*. De acordo com Pazin-Filho et al. [33], esse fenômeno multidirecional faz com que apenas uma fração da energia refletida seja captada por um transdutor, limitando a detecção precisa do sinal emitido. Esse comportamento é especialmente notável em ambientes onde partículas de dimensões micrométricas são comuns, como as partículas biológicas em suspensão presentes no ambiente marinho.

O coeficiente de atenuação de uma amostra contendo partículas em suspensão pode ser determinado pela energia perdida devido a três mecanismos principais: perda por viscosidade, perda térmica e perda por espalhamento [34][35][32]. Esses mecanismos atuam de maneira conjunta, influenciando a intensidade do sinal acústico conforme ele interage com as partículas presentes no meio.

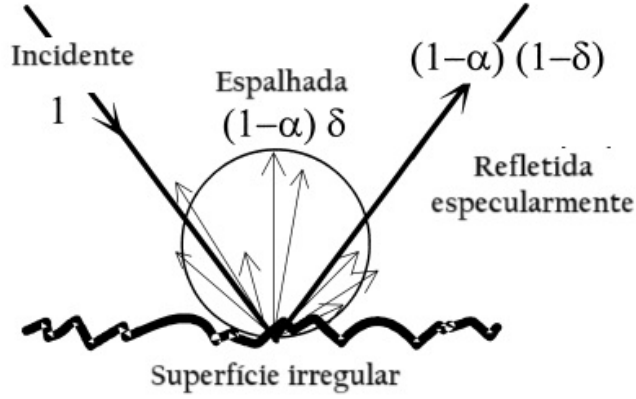


Figura 1.2: Figura esquematizada da energia incidente, mostrando a parcela refletida e espalhada (adaptada de Vorländer & Mommertz [1]).

Para calcular a atenuação causada por partículas em suspensão, o coeficiente total de atenuação pode ser decomposto em três componentes: o coeficiente de viscosidade, o coeficiente de perda térmica (também conhecido como coeficiente clássico) e o coeficiente de espalhamento. O coeficiente de espalhamento, em particular, é determinado pela quantidade de energia que é refletida fora da zona especular, ou seja, fora do ângulo de reflexão definido pela geometria da onda incidente [36]. Parte da energia incidente é refletida diretamente, enquanto outra parte sofre espalhamento, resultando em uma perda global de intensidade.

O estudo desses coeficientes de atenuação é essencial para entender como a presença de partículas em suspensão, como o zooplâncton, pode afetar a propagação sonora no oceano. Técnicas acústicas modernas permitem estimar esses coeficientes com precisão, fornecendo *insights* valiosos sobre os processos de absorção e dispersão que ocorrem em ambientes marinhos [37](Figura 1.2).

1.2.2 Zooplâncton

O zooplâncton faz parte do grupo dos planctontes, que é composto por dois subgrupos principais: os fitoplanctontes, organismos fotossintéticos como as microalgas, e os zooplanctontes, que consistem em pequenos animais encontrados na coluna d'água, incapazes de vencer as correntes marinhas [38] (Figura 1.3). Esses microrganismos desempenham um papel vital na cadeia alimentar marinha, servindo como uma importante fonte de alimento para peixes, outros zooplanctontes e uma

diversidade de organismos maiores [2] (Figura 1.4). Assim, a presença do zooplâncton no ambiente aquático é crucial para a manutenção da biodiversidade e da dinâmica trófica nos ecossistemas marinhos.



Figura 1.3: Planctontes (fito e zoo) vistos no microscópio. Pequenas células esverdeadas representam o fitoplâncton; organismos maiores e transparentes, com apêndices e antenas longas, representam o zooplâncton (copépodes) (adaptado de Hennesy et al. [2]).

O zooplâncton é um grupo diversificado de animais que habitam a coluna d'água e ocupam um papel central no fluxo de energia e ciclagem de nutrientes em ecossistemas aquáticos [39]. Esses organismos podem ser encontrados tanto em ambientes de água doce quanto em ambientes marinhos, sendo o zooplâncton marinho observado em praticamente todas as regiões costeiras [40]. Entre os grupos que compõem o zooplâncton, destacam-se os protozoários, como flagelados, sarcodinas e ciliados, além de metazoários como rotíferos, cladóceros, copépodes (crustáceos) e larvas de dípteros da família Chaoboridae [39].

A diversidade do zooplâncton abrange uma ampla gama de organismos, que variam desde os minúsculos protozoários até as fases iniciais (ovos e larvas) de peixes mais evoluídos [41]. Essa diversidade reflete as diferentes formas, tamanhos, fisiologias e comportamentos dos zooplancntes, características que também são influenciadas pelas condições físico-químicas e pelo habitat em que esses organismos se encontram. Dessa forma, a comunidade zooplanctônica é um componente extremamente dinâmico

dos ecossistemas aquáticos, adaptando-se constantemente às variações ambientais [42].



Figura 1.4: Representação simplificada da teia alimentar marinha, mostrando a relevância do zooplâncton para a cadeia alimentar (adaptado de Hennesy et al.[2]).

A distribuição do zooplâncton é amplamente determinada pela região estudada e pelas características do ambiente aquático, que podem incluir temperatura, salinidade, disponibilidade de nutrientes e presença de predadores. Assim, a composição das comunidades de zooplâncton pode variar significativamente entre diferentes corpos d'água e ao longo das estações do ano, refletindo a complexidade dos ecossistemas aquáticos.

Conforme descrito por Al-Yamani et al. [43], os zooplanctontes podem ser classificados em três categorias de acordo com o tamanho: 1) Macrozooplâncton, constituído por organismos maiores que 20 mm, como águas-vivas e decápodes jovens e adultos; 2) Mesozooplâncton, com organismos de tamanho entre 0,2 mm e 20 mm, que incluem copépodes e cladóceros; e 3) Microzooplâncton, com organismos que variam de 20 µm a 200 µm, representados por protozoários como foraminíferos e ciliados, além de alguns metazoários como rotíferos e estágios juvenis de organismos maiores, como *nauplii* de copépodes.

Outra importante distinção no zooplâncton é feita com base no estágio de vida

dos organismos. Os meroplânctontes são organismos temporários que passam apenas parte de seu ciclo de vida na forma planctônica, como as larvas que eventualmente se transformam em vermes, moluscos, crustáceos, corais, equinodermos, peixes ou insetos. Por outro lado, os holoplânctontes permanecem no estágio planctônico por toda a vida, incluindo grupos como pterópodes, quetognatos, laváceos, sifonóforos e copépodes [38].

Essa complexidade e diversidade tornam o zooplâncton um componente essencial dos ecossistemas aquáticos, não apenas pelo seu papel na cadeia alimentar, mas também por sua influência na dinâmica físico-química da coluna d'água. Através de sua interação com a matéria orgânica em suspensão, o zooplâncton contribui para processos como a atenuação do som no ambiente marinho, uma vez que sua presença pode dispersar e absorver parte da energia acústica, impactando a propagação de sinais acústicos em diferentes profundidades e regiões do oceano.

1.3 Objetivos

O presente estudo tem por objetivo avaliar a atenuação acústica provocada pela biomassa do zooplâncton na região costeira de Arraial do Cabo/RJ. Para tal, são elencados os seguintes objetivos específicos:

- 1 – Calcular a atenuação causada pelos organismos zooplânctontes na região de Arraial do Cabo/RJ;
- 2 – Estimar a relevância da atenuação pelo zooplâncton para a propagação acústica;
- 3 – Calcular a atenuação acústica em uma região sujeita a processos oceanográficos diferentes da região de estudo – Sepetiba/RJ.

Capítulo 2

Metodologia

2.1 Área de estudo

A dinâmica costeira da Região dos Lagos, no estado do Rio de Janeiro, é fortemente influenciada por condições oceanográficas particulares, onde a interação entre a ação dos ventos de nordeste (NE) e o escoamento da Corrente do Brasil (CB) favorece o estabelecimento do Sistema de Ressurgência de Cabo Frio. Esse fenômeno é caracterizado pela intrusão de águas ricas em nutrientes da Água Central do Atlântico Sul (ACAS) sobre a plataforma continental adjacente ao município de Arraial do Cabo/RJ [44][45][46]. A variabilidade da CB domina a hidrodinâmica nas regiões mais afastadas da costa [47], enquanto a circulação na plataforma interna é mais sensível ao regime sinótico de ventos [48] e à passagem de sistemas frontais [49], os quais desempenham um papel fundamental na estruturação das condições locais.

Na área de estudo (Figura 2.1), o fenômeno da ressurgência exerce uma função crucial na promoção da produtividade primária marinha, essencial para a manutenção do ecossistema local [50]. O movimento ascendente das águas frias e carregadas de nutrientes estimula o crescimento de fitoplâncton na superfície, o que resulta em um aumento na produtividade biológica, particularmente no que tange à abundância de zooplâncton. A composição e a distribuição sazonal das comunidades zooplânctônicas são altamente influenciadas pelas variações nas condições oceanográficas [51], o que pode impactar diretamente o monitoramento acústico na região, sobretudo em relação à atenuação de sinais sonoros causada pela presença de zooplâncton.

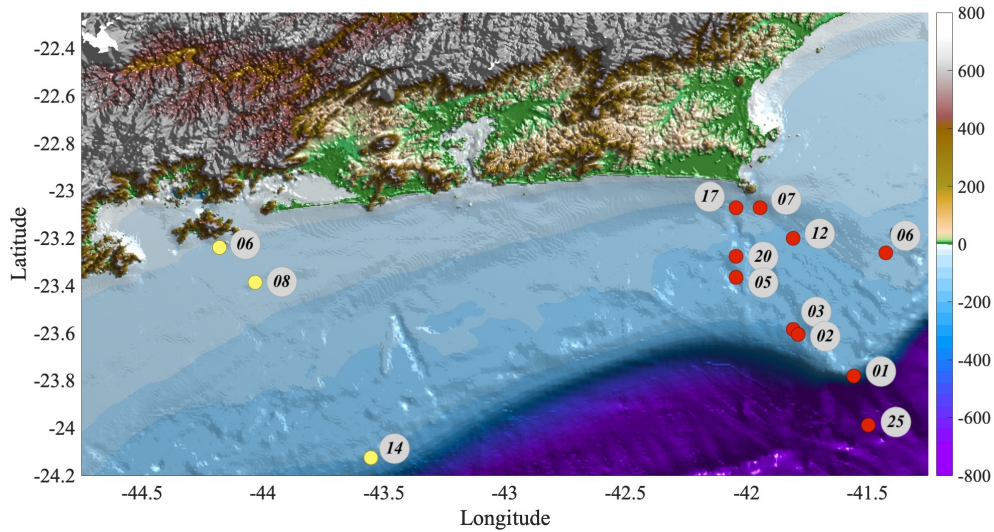


Figura 2.1: Mapa topográfico da Região dos Lagos Fluminense e batimetria da plataforma continental, onde os pontos vermelhos/amarelos mostram estações relativa a coleta de Arraial do Cabo/Sepetiba.

Dessa forma, o estudo foi realizado em duas regiões com regimes oceanográficos distintos: Arraial do Cabo e Sepetiba, a fim de avaliar os diferentes níveis de atenuação acústica causados pelo zooplâncton. A baía de Sepetiba é um corpo de água costeiro localizado no sudeste do estado do Rio de Janeiro, aproximadamente 60 km da região metropolitana [52]. A circulação das águas na baía ocorre predominantemente no sentido ciclônico, com a penetração de águas oceânicas mais frias através de sua principal conexão com o mar aberto [52], influenciando as condições locais.

Arraial do Cabo é um município costeiro situado na Região dos Lagos, também no estado do Rio de Janeiro, com altitude média de oito metros [53]. Localizada a cerca de 120 km a leste da cidade do Rio de Janeiro, a região é marcada por uma circulação atmosférica influenciada pelo anticiclone tropical do Atlântico [54]. A combinação dessas condições atmosféricas e oceanográficas torna Arraial do Cabo um ponto de elevada variabilidade hidrodinâmica, especialmente pela presença do fenômeno de ressurgência, que impacta diretamente a estrutura ecológica marinha.

A ressurgência em Arraial do Cabo promove a entrada de águas subsuperficiais frias e ricas em nutrientes (Figura 2.2), o que impacta a biologia marinha local,

criando um ambiente favorável à proliferação de fitoplâncton e, conseqüentemente, de zooplâncton. Esse aumento na produtividade biológica afeta não apenas as redes tróficas, mas também as condições de propagação acústica na região, dada a maior presença de partículas biológicas em suspensão, como o zooplâncton, que pode influenciar na atenuação de ondas sonoras.

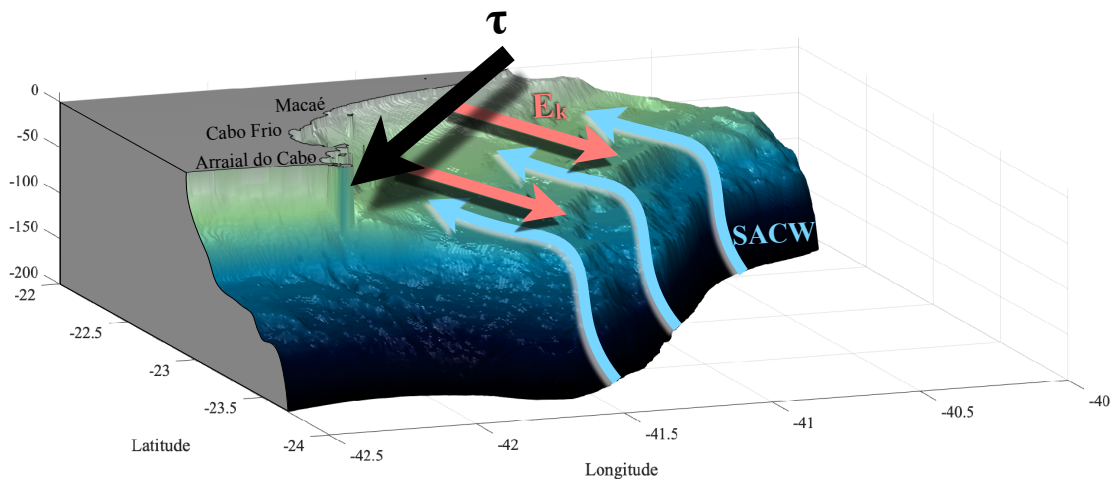


Figura 2.2: Representação esquematizada da ressurgência costeira na região de Cabo Frio. A seta preta representa a ação do vento de NE, as setas salmão representam o transporte de Ekman *offshore* e as setas azuis representam o movimento de ascensão das águas profundas.

2.2 Coleta de dados físicos

Foram analisados dados oceanográficos e biológicos coletados durante duas expedições realizadas no âmbito do projeto Sistema Tático de Fatores Ambientais (STFA), com foco no estudo das paisagens acústicas das regiões de Arraial do Cabo e Sepetiba, no estado do Rio de Janeiro:

- 1 – Paisagem Acústica I – Arraial do Cabo/RJ – fevereiro de 2021;
- 2 – Paisagem Acústica II – Sepetiba/RJ – setembro de 2022.

Essas expedições coletaram um conjunto de dados oceanográficos, que incluem perfis verticais de temperatura e salinidade da água do mar, obtidos através de um CTD (do inglês *Conductivity, Temperature, and Depth*), e amostras de biomassa de zooplâncton coletadas por meio de arrastos verticais. A comissão Paisagem Acústica I abrangeu 21 estações de coleta, enquanto a comissão Paisagem Acústica II compreendeu 3 estações, cobrindo diferentes pontos de amostragem nas duas regiões (Figura 2.3).

O CTD é um instrumento projetado para medir a condutividade, a temperatura e a profundidade da água, parâmetros críticos para determinar a estrutura da coluna d'água. Esse equipamento é amplamente utilizado em estudos oceanográficos por fornecer informações precisas sobre as propriedades físico-químicas da água, que são fundamentais para entender os padrões de circulação, estratificação e os processos biogeoquímicos da região [55].

Quando utilizado em campo, o CTD é lançado através da coluna d'água, seja da superfície até o fundo ou vice-versa, com o objetivo de criar um perfil vertical da água. À medida que desce ou sobe na coluna d'água, o equipamento registra variações nas propriedades físicas do ambiente aquático, como mudanças de temperatura e condutividade, o que permite aos pesquisadores identificarem camadas térmicas, haloclinas e outras estruturas importantes na coluna d'água [56]. A partir dos dados coletados, a salinidade é calculada com base nas medidas de condutividade e pressão, fornecendo um retrato preciso da distribuição de salinidade em diferentes profundidades, crucial para análises mais detalhadas das interações oceânicas.

Os dados obtidos nas campanhas realizadas em Arraial do Cabo e Sepetiba são essenciais para investigar a variabilidade das condições oceanográficas locais, particularmente a influência do fenômeno de ressurgência em Arraial do Cabo e o comportamento hidrodinâmico na Baía de Sepetiba. Esses perfis de temperatura e salinidade permitem uma compreensão mais profunda dos processos que afetam a distribuição das massas de água, assim como o impacto desses parâmetros na biota, especialmente na comunidade zooplanctônica.

Além das características físico-químicas, os dados biológicos sobre a biomassa de zooplâncton ajudam a compreender a dinâmica ecológica das áreas estudadas. O arrasto vertical é a técnica de coleta usada para amostrar o zooplâncton, forne-

cendo informações sobre a densidade populacional e a composição específica dessa comunidade, que varia de acordo com as condições ambientais. A biomassa do zooplâncton é um indicador da saúde do ecossistema, pois reflete a produtividade primária e secundária, além de influenciar diretamente os processos de atenuação acústica, devido ao espalhamento e absorção de sinais sonoros por esses organismos.

Esses dados integrados oferecem uma base sólida para avaliar os impactos das variáveis oceanográficas e biológicas na propagação de sinais acústicos subaquáticos, contribuindo para o monitoramento ambiental e o avanço no entendimento da paisagem acústica dessas regiões costeiras.

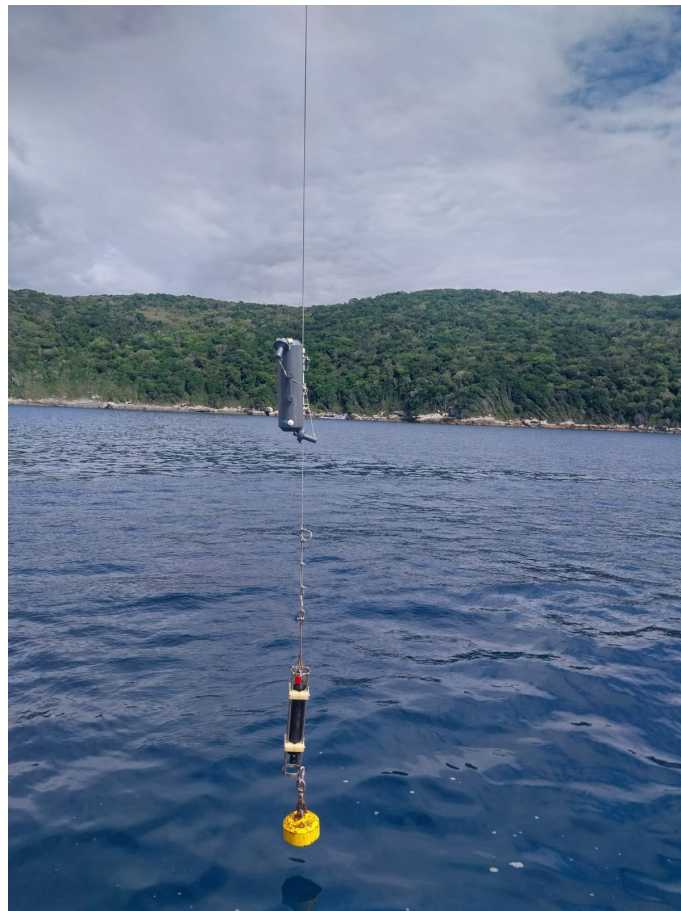


Figura 2.3: Lançamento de CTD para coleta e registro de parâmetros de estado da água do mar.

2.3 Coleta biológica

As coletas do zooplâncton foram realizadas por meio de arrastos verticais utilizando redes cilindro-cônicas com uma malha de 200 μm . O volume filtrado foi

obtido empregando um fluxômetro, e uma equação específica recomendada [57]. Após a coleta, as amostras foram fixadas em solução de água do mar com formaldeído 4/100 neutralizado e armazenadas em frascos devidamente identificados para serem analisadas posteriormente, seguindo a metodologia proposta por Haney et al. [57].

As amostras foram fracionadas no laboratório utilizando um Fracionador de Folsom, onde 1/4 do material foi utilizado para determinação da biomassa (úmida e seca) e o sobressalente foi utilizado para as análises qualitativas e quantitativas em estereomicroscópio (Discovery V8-ZEISS) como descrito por Boltovskoy et al. [58]. A biomassa foi obtida a partir da utilização de filtros de nylon com 150 μm de abertura de malha. Os filtros foram umedecidos com água destilada e pesados em balança analítica, posteriormente, foram inseridos em estufa a 60°C por 24 h e pesados novamente.

Os filtros utilizados para a filtragem da amostra foram pesados e levados à estufa por 24 h. Após a secagem, os filtros com as amostras secas foram pesados novamente, permitindo que as diferenças dos valores fossem obtidas e apresentadas em mg.m^{-3} considerando a fração da amostra e extrapolando para a amostra total. Esses dados biológicos foram utilizados para o cálculo da atenuação por viscosidade e espalhamento pelo zooplâncton, considerando microrganismos acima de 200 μm divididos em grupos para a obtenção de sua densidade e biomassa.

2.4 Cálculo da atenuação acústica

2.4.1 Parte I

A atenuação pode ser calculada usando os valores das constantes físicas apropriadas para a temperatura da água do mar. Há processos de relaxação química adicionais, onde o primeiro é do Sulfato de Magnésio (MgSO_4) e o segundo é do Ácido Bórico [59]. Assim, Kinsler et al. [4] (2000) descreveram uma forma de calcular a atenuação 2.1, composta por três componentes, cujas duas primeiras são baseadas nas frequências associadas ao ácido bórico (f_1) e ao sulfato de magnésio (f_2) e a terceira está relacionada com os mecanismos de absorção da água. As frequências relacionadas com os dois primeiros parâmetros são dependentes da temperatura 2.2 2.3. Além disso, para a obtenção da perda por absorção em dB/m o valor de α deve

ser multiplicado por 8.7 como mostrado na equação 2.7.

$$\left[\frac{A}{f_1^2 + f^2} + \frac{B}{f_2^2 + f^2} + C \right] f^2 = \alpha \quad (2.1)$$

$$780e^{\frac{T}{29}} = f1 \quad (2.2)$$

$$42000e^{\frac{T}{18}} = f2 \quad (2.3)$$

$$0.083 \frac{S}{35} e^{[T/31 - Z/91 + 1.8(pH - 8)]} = A \quad (2.4)$$

$$22 \frac{S}{35} e^{[T/14 - Z/6]} = B \quad (2.5)$$

$$4.9 \times 10^{-10} e^{(-\frac{T}{26} - \frac{Z}{25})} = C \quad (2.6)$$

$$8.7\alpha = a \quad (2.7)$$

2.4.2 Parte II

Na acústica submarina, o termo atenuação refere-se à redução da amplitude de uma onda sonora [30][3]. Quando a onda sonora se propaga através de um meio fluido, como a água do mar, sua amplitude diminui devido a fatores como perda por viscosidade e perdas clássicas [3]. Esses parâmetros são aplicados no cálculo da atenuação usando o método proposto por Vinnâ et al. [7], que decompõe a atenuação acústica em três termos, conforme mostrado na equação 2.8.

$$\alpha_w + \alpha_{p.s} + \alpha_{p.v} = \alpha \quad (2.8)$$

Onde α_w representa o parâmetro de atenuação da água do mar como descrito por Fisher et al. [60], $\alpha_{p.s}$ consiste na perda pelo espalhamento de partículas (biomassa do zooplâncton) e $\alpha_{p.v}$ representa a perda pela viscosidade associada ao zooplâncton [3].

O termo α_w é obtido a partir dos dados de temperatura da água em °C (T) e da frequência em Hz (f), conforme a equação 2.9. Esta parcela, neste trabalho, terá somente um efeito comparativo, onde ela será equiparada com os resultados obtidos na atenuação calculada pela metodologia de Kinsler et al. [4], com o objetivo de mostrar a efetividade da metodologia testada.

$$(55.9 - 2.37T + 4.77 \times 10^{-2}T^2 - 3.48 \times 10^{-4}T^3) \times 10^5 f^2 = \alpha_w \quad (2.9)$$

De acordo com Moore [3], a atenuação pelo espalhamento da biomassa $\alpha_{p.s}$ é obtida pela equação 2.10, onde M representa a concentração do Zooplâncton e $\langle \zeta_s \rangle$ representa a média da distribuição da constante de espalhamento:

$$M \langle \zeta_s \rangle = \frac{3M \langle a_z^2 X \rangle}{4\rho_s \langle a_z^3 \rangle} \quad (2.10)$$

$$\frac{0.29x^4}{0.95 + 1.28x^2 + 0.25x^4} = X \quad (2.11)$$

Onde, a_z representa o diâmetro do zooplâncton, que, neste caso, será considerado uma malha de 200 μm , ρ_s consiste na densidade do zooplâncton, e x representa parâmetros da atenuação da onda, sendo obtido pelo produto do número de ondas (k) e do raio da partícula (sendo substituído, neste caso, pelo diâmetro do zooplâncton) [61], conforme o desenvolvimento 2.12 2.13:

$$\frac{2\pi}{\lambda} = k \quad (2.12)$$

$$\frac{c}{f} = \lambda \quad (2.13)$$

c consiste na velocidade do som calculada a partir dos parâmetros (profundidade, salinidade e temperatura) obtidos pelo CTD. De acordo com Medwin et al. [59] a velocidade do som é determinada pela temperatura, salinidade e profundidade através da equação simplificada de Medwin [62] que pode ser aplicada para os intervalos $0 < T(^{\circ}C) < 32$ e $22 < S < 45$ para profundidades menores que 1000 m, visto que a equação é uma simplificação da equação empírica desenvolvida por Del Grosso et al. [63]. A simplificação apresenta menos que 0.2 m/s de erro em comparação à de Del Grosso

para os intervalos especificados acima.

$$1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016Z = c \quad (2.14)$$

Tendo obtido atenuação pelo aquecimento da água e a atenuação por espalhamento de partículas (zooplâncton), é necessário, para calcular a atenuação total, a última parcela: a atenuação pela viscosidade das partículas ($\alpha p \cdot v$) 2.15.

$$M\langle\zeta_v\rangle = \alpha p \cdot v \quad (2.15)$$

M representa a concentração de massa do zooplâncton e $\langle\zeta_v\rangle$ representa a média da distribuição da constante de viscosidade. De acordo com Urick [6], é possível calcular a absorção do som por uma pequena partícula em suspensão por meio de um desenvolvimento teórico mostrado anteriormente por Sewell [64], onde a partícula, o zooplâncton, é considerada uma pequena esfera rígida.

Assim, de acordo com Urick [6], $\langle\zeta_v\rangle$ pode ser obtido usando a equação 2.16, onde σ consiste em uma relação de densidades (meio e partícula), sendo a densidade do meio (ρ_0) obtida pelo CTD 2.17.

$$\frac{kS(\sigma - 1)^2}{2\rho_s(S^2 + (\sigma - \delta)^2)} = \zeta_v \quad (2.16)$$

$$\frac{\rho_s}{\rho_0} = \sigma \quad (2.17)$$

As variáveis S e δ são variáveis que podem ser encontradas por equações simplificadas do resultado da expansão dos termos de primeira e segunda ordem da função esférica de Bessel para a velocidade potencial [6]. De acordo com Hay [65], o parâmetro β é a razão do raio da partícula à espessura viscosa da camada limite 2.18 2.19, onde v consiste na viscosidade cinemática estabelecida com o valor de $1.3 \times 10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$. Desta forma, é possível obter os valores de atenuação (m^{-1}), sendo necessário convertê-lo para dB/m usando a 2.7.

$$\frac{9}{4\beta az}(1 + (1/\beta az)) = S \quad (2.18)$$

$$\frac{1}{2}(1 + (9/2\beta az)) = \delta \quad (2.19)$$

$$\sqrt{\frac{2\pi f}{v}} = \beta \quad (2.20)$$

2.5 Cálculo da atenuação pela fração do zooplâncton

Considerando a divisão por tamanho proposta por Al-Yamani et al. [43], os zooplantontes coletados foram separados em três grupos: macro, meso e micro-zooplâncton. Sendo que para cada um destes foi estabelecido um tamanho médio baseado na medida do microrganismo mais representativo de cada grupo. Assim, foi estabelecido 21.00 mm para o macro, 4.32 mm para o meso e 0.18 mm para o micro baseado na classificação de Al-Yamani et al. [43].

Esta separação possibilita a compreensão da dinâmica ecológica dos ecossistemas aquáticos, já que zooplantontes de diferentes tamanhos apresentam papéis ecológicos distintos, interagindo assim, de maneiras variadas com outros organismos. Por exemplo, zooplantontes menores, como os copépodes, frequentemente servem de alimento para larvas de peixes e outros predadores filtradores, enquanto que zooplantontes maiores, como cladóceros, consomem organismos do fitoplâncton[66] [67].

A partir da classificação com base nas categorias de tamanho do zooplâncton, os cálculos da atenuação pela viscosidade e espalhamento dos zooplantontes foram repetidos considerando as variações do tamanho do zooplâncton. Assim, com base na metodologia proposta, foi calculada uma atenuação que observasse os diferentes tamanhos dos zooplantontes (macro, meso e micro), objetivando a observação da relação da atenuação com a medida do zoo em diferentes faixas de frequência.

2.6 Relação da fluorescência com a atenuação acústica

A fluorescência é um fenômeno físico no qual certas substâncias emitem luz quando expostas à radiação eletromagnética de uma determinada faixa de comprimento de onda. Esse fenômeno é amplamente utilizado em diversas áreas da

ciência, incluindo a biologia marinha, onde a fluorescência de organismos aquáticos pode ser detectada e registrada em diferentes profundidades da coluna d'água [68]. No contexto marinho, a fluorescência permite identificar a presença de pigmentos biológicos, como aqueles presentes no fitoplâncton e no zooplâncton, proporcionando informações sobre a distribuição e densidade desses organismos em tempo real.

Em estudos oceanográficos, a fluorescência é frequentemente medida através de sensores acoplados ao dispositivo CTD, que além de registrar variáveis físicas como temperatura, salinidade e densidade, também captura a intensidade da fluorescência em diversas profundidades. Isso se torna especialmente relevante para o estudo da comunidade zooplancônica, já que muitos desses microrganismos possuem pigmentos biológicos que emitem fluorescência ao interagir com a luz, permitindo inferências sobre sua presença e concentração na coluna d'água [66].

A relação entre a densidade da comunidade zooplancônica e a atenuação acústica é um ponto central na análise da propagação do som no meio marinho. Dado que o zooplâncton pode atuar como um agente dispersor e absorvedor de energia acústica, a densidade desses organismos, inferida através da fluorescência, pode ser diretamente correlacionada à atenuação do som. No presente estudo, os dados de fluorescência coletados pelo CTD nas áreas de Arraial do Cabo e Sepetiba foram analisados em profundidade, permitindo uma visão detalhada da distribuição vertical e da biomassa da comunidade zooplancônica nas duas regiões de estudo.

Os valores de fluorescência foram analisados em função da profundidade para examinar como as camadas de água mais ricas em biomassa de zooplâncton estão distribuídas. Essa análise é crucial, pois camadas mais densas de zooplâncton tendem a causar uma maior atenuação do som, tanto por mecanismos de viscosidade quanto por espalhamento, impactando a transmissão de sinais acústicos. Assim, ao correlacionar a intensidade da fluorescência com a atenuação acústica, foi possível estabelecer uma relação linear entre a biomassa zooplancônica e a parcela de atenuação acústica causada por esses microrganismos, criando uma base sólida para modelar as perdas acústicas devido à presença biológica na coluna d'água.

Posteriormente, a análise de atenuação foi refinada com base nas diferentes categorias de tamanho do zooplâncton: microzooplâncton, mesozooplâncton e macrozooplâncton. Essa distinção permitiu uma segmentação mais precisa das contribuições

para a atenuação, com cada faixa de tamanho apresentando uma influência distinta sobre o espalhamento e a absorção acústica. O mesozooplâncton, por exemplo, tende a causar uma atenuação significativa devido à sua maior densidade e tamanho em comparação ao microzooplâncton. Já o macrozooplâncton, embora menos abundante, pode ter um impacto relevante em regiões de alta agregação biológica.

A correlação entre fluorescência e atenuação acústica, portanto, não apenas fornece informações sobre a estrutura da comunidade zooplancônica, mas também auxilia a compreensão dos mecanismos de perda de energia sonora em ambientes marinhos densamente povoados por esses organismos. Esse conhecimento pode ser útil para aprimorar modelos acústicos e melhorar a interpretação de dados em sistemas de monitoramento subaquático.

Capítulo 3

Resultados e Discussões

3.1 Análises oceanográficas

O regime oceanográfico observado na área de estudo em Arraial do Cabo revelou perfis de temperatura e salinidade que apresentam semelhanças estruturais em termos de suas variações verticais. Tanto a temperatura quanto a salinidade exibem uma redução gradativa conforme a profundidade aumenta, sem a presença de mudanças abruptas ou gradientes muito intensos, indicando uma estratificação estável nas estações estudadas (Figura 3.1). Essa configuração é particularmente relevante para o cálculo da velocidade do som na região, uma vez que ambos os parâmetros influenciam diretamente essa variável física. Nas estações de maior profundidade, como a estação 1 (com 1200 m de profundidade) e a estação 25 (com 1500 m), foram registradas temperaturas relativamente baixas, inferiores a 10°C, além de uma salinidade reduzida, com valores inferiores a 35, contrastando com as estações de águas mais rasas (Figura 3.2).

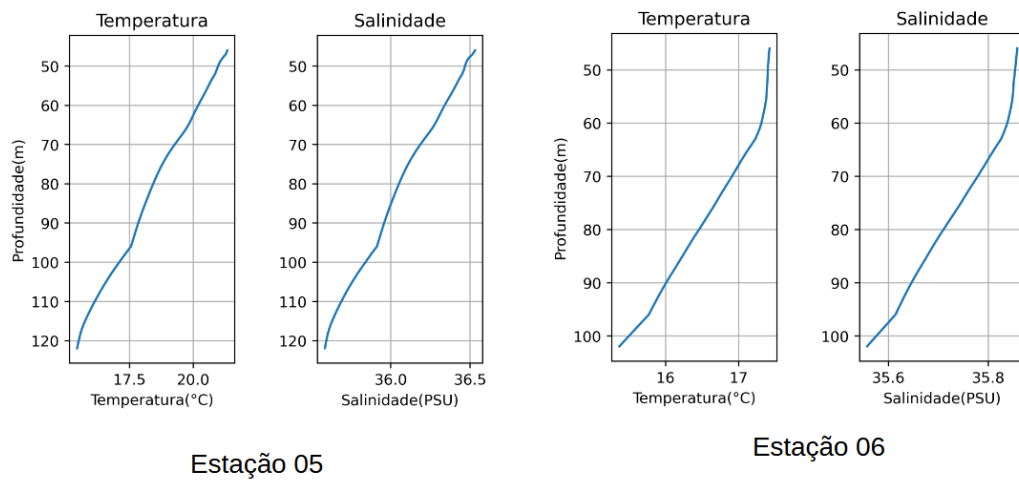


Figura 3.1: Perfis verticais da temperatura e da salinidade em Arraial do Cabo (RJ), destacando que a estação 05 possui profundidade máxima de 120 m, enquanto a estação 06 alcança uma profundidade máxima de 100 m.

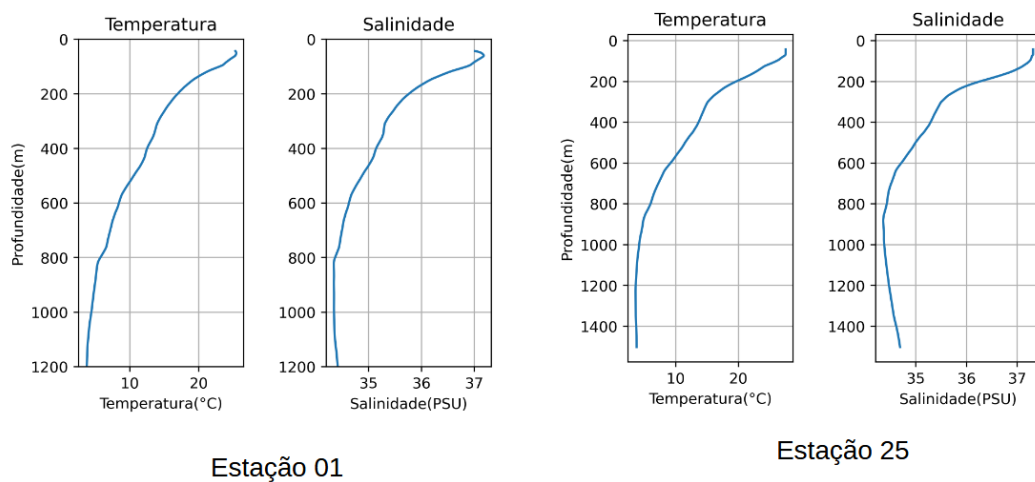


Figura 3.2: Perfis verticais da temperatura e da salinidade em Arraial do Cabo/RJ com profundidade de 1200 m (estação 01) e 1500 m (estação 25).

Essa relação entre profundidade, temperatura e salinidade impacta de maneira significativa o perfil da velocidade do som, conforme esperado, dado que a velocidade do som no oceano é uma função dependente desses parâmetros. À medida que a profundidade aumenta, observa-se uma redução na velocidade do som, com valores inferiores a 1500 m/s em profundidades superiores a 500 m (Figura 3.3).

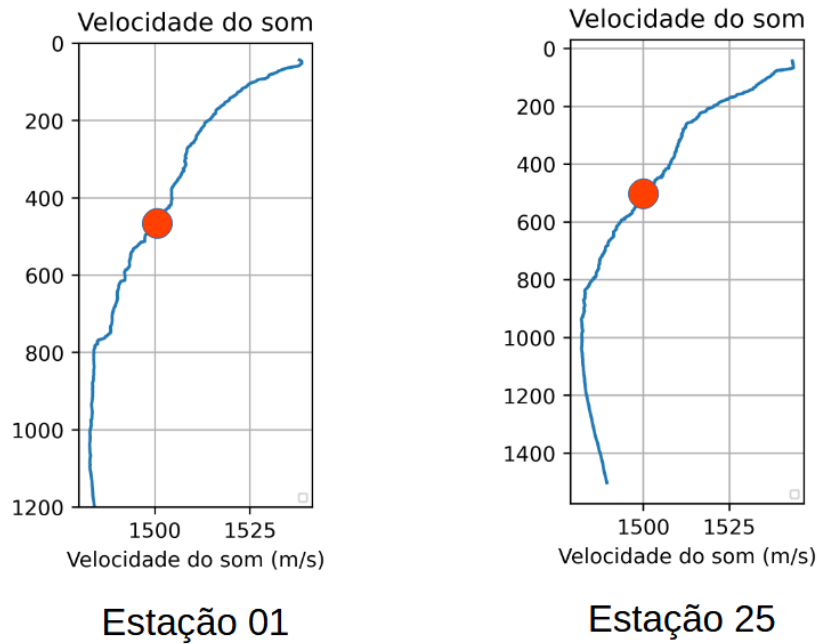


Figura 3.3: Perfil vertical da velocidade do som em Arraial do Cabo (RJ), apresentando a velocidade do som (m/s) no eixo x e a profundidade (m) no eixo y. O ponto vermelho destaca o valor padrão da velocidade do som na água do mar (1500 m/s).

Segundo Kinsler et al. [4], a velocidade padrão do som na água do mar é geralmente considerada em torno de 1500 m/s para uma temperatura de 13 °C e densidade de 1026 kg/m³, sendo essa uma referência amplamente utilizada para estimativas de propagação sonora em ambientes oceânicos. Portanto, as variações observadas em Arraial do Cabo se alinham às expectativas teóricas para regiões com ressurgência de águas frias e profundas.

Em contrapartida, a região de Sepetiba apresenta perfis oceanográficos distintos, caracterizados por uma camada de mistura bem definida, que se estende entre 30 e 60 metros de profundidade, com um gradiente térmico e salino acentuado logo abaixo dessa camada (Figura 3.4). Nas águas mais rasas, observou-se um

comportamento oposto para os perfis de temperatura e salinidade após a camada de mistura: enquanto a temperatura diminui com o aumento da profundidade, a salinidade aumenta (Figura 3.4). Esse comportamento sugere uma influência de águas mais densas e salinas advindas de regiões oceânicas mais profundas, característica comum em baías costeiras que se conectam ao mar aberto.

A velocidade do som em Sepetiba segue a variação da temperatura, como esperado para águas rasas, onde esse parâmetro tem uma influência preponderante no cálculo da velocidade do som [23]. Assim, a velocidade do som nesta região é diretamente impactada pelas variações térmicas, exibindo um comportamento semelhante ao observado em Arraial do Cabo (Figura 3.5).

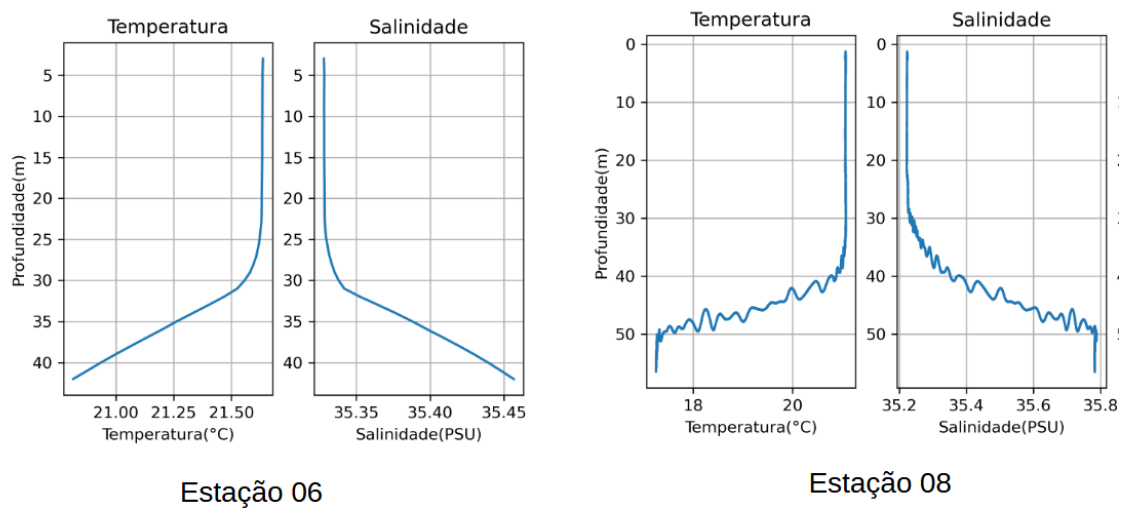
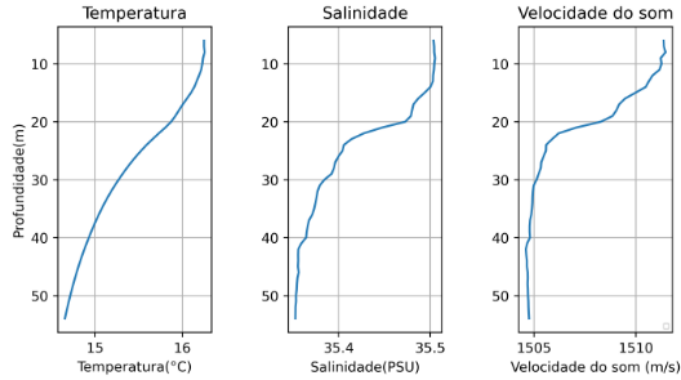


Figura 3.4: Perfis verticais de temperatura e salinidade nas estações 06 e 08, na região de Sepetiba/RJ.

Arraial (estação 17)



Sepetiba (estação 06)

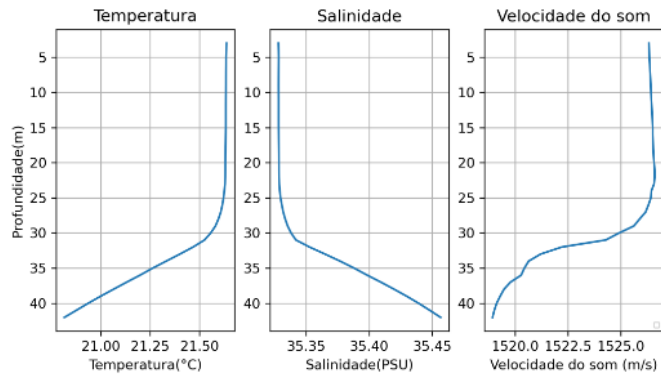


Figura 3.5: Perfis verticais de temperatura, salinidade e velocidade do som nas regiões de estudo: estação 17 (Arraial do Cabo/RJ) na parte superior e estação 06 (Sepetiba/RJ) na parte inferior.

A análise comparativa entre as duas regiões revela diferenças oceanográficas marcantes. Em Arraial do Cabo, a ressurgência de águas frias e menos salinas leva a um decréscimo tanto na temperatura quanto na salinidade com a profundidade, enquanto em Sepetiba, a salinidade aumenta em águas mais profundas. Essas variações são fundamentais para entender a distribuição espaço-temporal das comunidades zooplânctônicas, uma vez que os organismos planctônicos são sensíveis às propriedades físicas e à composição química do ambiente em que vivem [69]. As diferenças na estratificação e nas características da água podem afetar diretamente a densidade e a distribuição do zooplâncton, impactando os níveis de atenuação acústica nas duas regiões, o que deverá ser levado em consideração nas análises subsequentes.

3.2 Atenuação

A atenuação do som, de maneira geral, apresentou-se mais intensa nas frequências mais elevadas, sendo particularmente significativa na faixa de 100 kHz quando consideradas as estações com profundidades de até 175 metros (Figura 3.6). Este comportamento está em consonância com o esperado, já que as frequências mais altas tendem a sofrer maior atenuação devido a processos de espalhamento e absorção. No caso da atenuação provocada pelo zooplâncton, observou-se um padrão de aumento proporcional à frequência, com a atenuação sendo maior nas frequências mais elevadas, como 1000 kHz, nas estações de ambas as regiões estudadas (Figura 3.6). Esse comportamento sugere que a interação entre as ondas acústicas e as partículas de zooplâncton é mais pronunciada em frequências altas, o que reforça a importância de considerar a biota marinha no cálculo de atenuação acústica em águas costeiras.

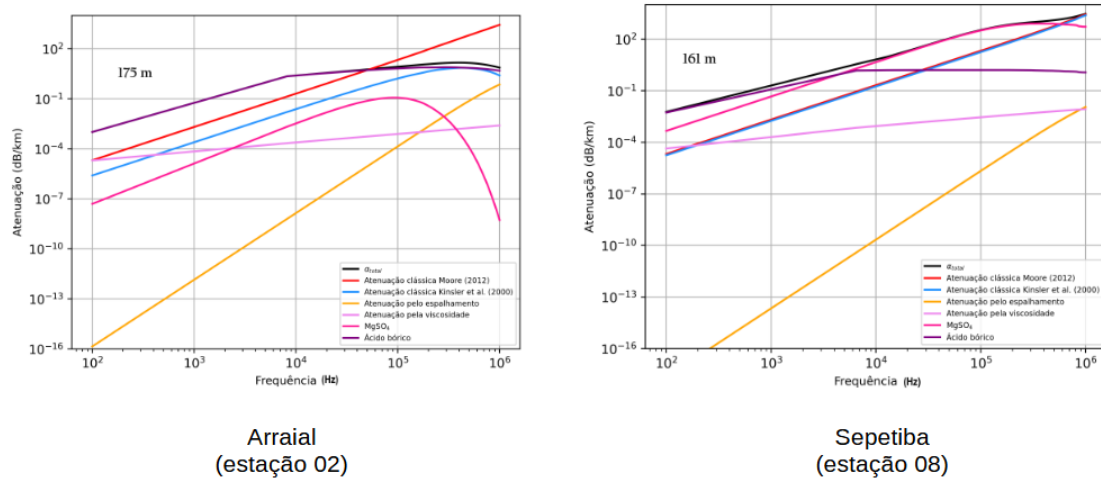


Figura 3.6: Atenuação do som usando as metodologias de Moore [3] e Kinsler et al. [4] nas duas regiões de estudo (Arraial do Cabo/RJ - estação 02 e Sepetiba/RJ - estação 08). As cores representam as diferentes componentes da atenuação.

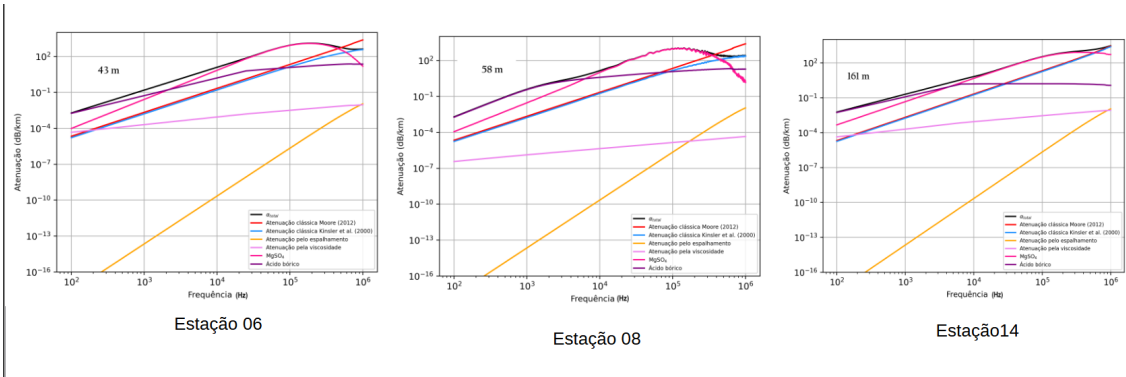
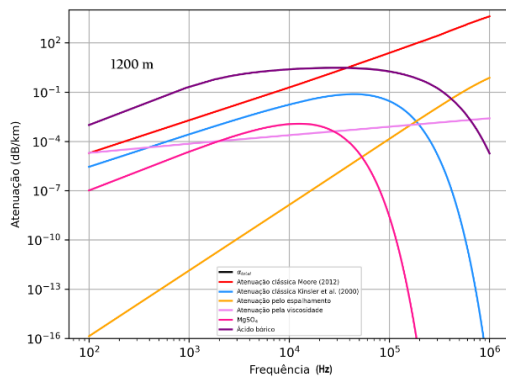


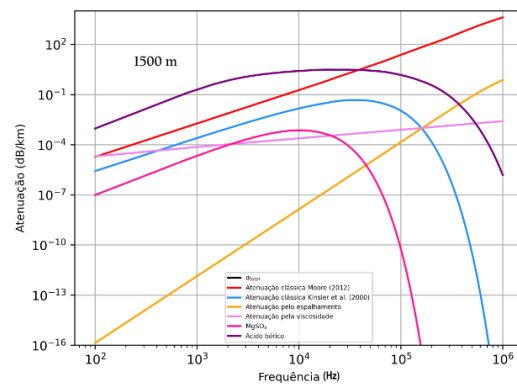
Figura 3.7: Atenuação do som usando as metodologias de Moore [3] e Kinsler et al. [4] nas estações 06, 08 e 14 na região de Sepetiba/RJ. As cores representam as diferentes componentes da atenuação.

Na região de Sepetiba, a comparação entre os métodos de atenuação descritos por Moore [3] e Kinsler et al. [4] revelou similaridades entre os resultados, com as curvas de atenuação se sobrepondo completamente na estação 14 e parcialmente até a faixa de 100 kHz nas estações 06 e 08 (Figura 3.7).

Sugere que, em regiões de águas rasas e com perfis relativamente estáveis de salinidade e temperatura, os dois métodos podem ser utilizados de maneira intercambiável. No entanto, essa sobreposição não foi observada em Arraial do Cabo, onde as metodologias divergem consideravelmente. A variação salina característica do regime oceanográfico da região parece ser o fator que interfere nos cálculos de atenuação pelo método de Kinsler et al. [4], especialmente em águas profundas, como nas estações de 1200 e 1400 metros, onde o desacoplamento entre as metodologias é mais pronunciado (Figura 3.8).



Estação 01



Estação 25

Figura 3.8: Atenuação do som usando as metodologias de Moore [3] e Kinsler et al. [4] nas estações 01 e 25 na região de Arraial do Cabo/RJ. As cores representam as diferentes componentes da atenuação.

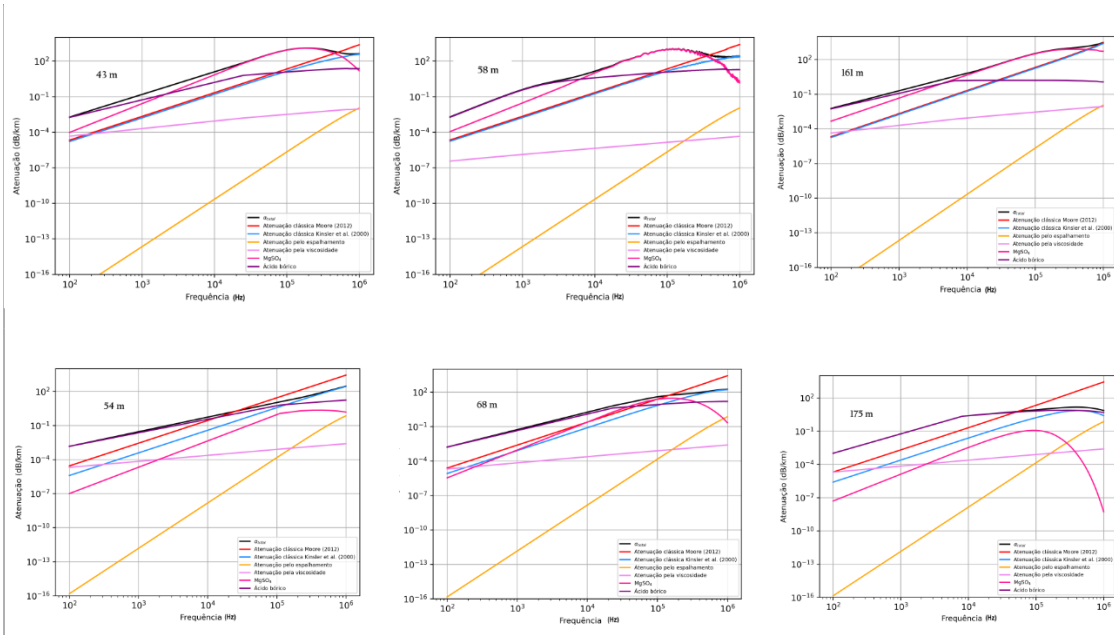


Figura 3.9: Atenuação do som calculada pelas metodologias de Moore [3] e Kinsler et al. [4] nas duas regiões de estudo. Na parte superior, estão representadas as estações 06, 08 e 14 da região de Sepetiba/RJ, com profundidades de 43 m, 58 m e 161 m, respectivamente. Na parte inferior, as estações 17, 07 e 02 da região de Arraial do Cabo/RJ, com profundidades de 54 m, 68 m e 175 m, respectivamente. As cores representam as diferentes componentes da atenuação.

Quando analisada a atenuação pela viscosidade do zooplâncton em Arraial do Cabo, os resultados indicam uma grande similaridade entre as diferentes estações. Independentemente da profundidade, a atenuação mostrou-se relativamente constante, com uma tendência de aumento à medida que as frequências aumentam, refletindo a influência direta da viscosidade nas frequências mais elevadas. Por outro lado, em Sepetiba foi possível observar variações significativas entre as estações. Em duas das estações analisadas, a atenuação começou em torno de 10^{-4} dB/km, enquanto em outra estação os valores foram drasticamente menores, em torno de 10^{-7} dB/km. Essa variação pode estar diretamente relacionada com as mudanças observadas após a camada de mistura, onde o perfil de temperatura e salinidade se altera de forma mais acentuada (Figura 3.9).

Além disso, verificou-se que a atenuação do zooplâncton está fortemente correlacionada com a temperatura e, conseqüentemente, com a velocidade do som (Figura

3.10). De modo geral, menores atenuações foram observadas em regiões onde a velocidade do som e as temperaturas eram mais elevadas, enquanto maiores atenuações ocorreram em locais com temperaturas mais baixas. Essa correlação pode ser um indicador útil para a detecção de zooplâncton e para a estimativa de sua biomassa, sugerindo que o cálculo da atenuação acústica pode ser usado para inferir a presença de zooplâncton. Essa abordagem abre a possibilidade de realizar o caminho inverso: estimar a biomassa do zooplâncton a partir da análise das variações na atenuação acústica.

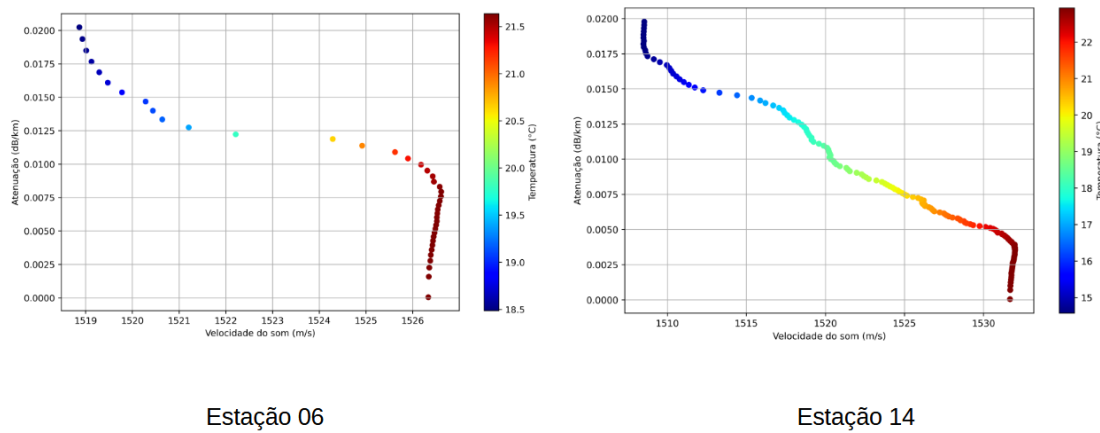


Figura 3.10: Gráfico de dispersão relacionando a atenuação pelo zooplâncton com a velocidade do som e a temperatura. A velocidade do som (m/s) é representada no eixo x, enquanto a atenuação (dB/km) é exibida no eixo y.

3.2.1 Atenuação pelo tamanho do zooplâncton

Os zooplanctontes, independentemente do tamanho, tendem a atenuar mais as ondas acústicas em frequências elevadas. Em Sepetiba, observa-se que o microzooplâncton apresenta uma maior atenuação à medida que a frequência se aproxima de 1000 kHz. Já no intervalo entre 1 kHz e 100 kHz, o macrozooplâncton é o principal responsável pela maior parte da atenuação (Figura 3.11). Esse comportamento indica que, em frequências mais baixas, o macrozooplâncton, devido ao seu tamanho e densidade, tem um papel mais significativo na dissipação da energia acústica, enquanto o microzooplâncton passa a dominar em frequências mais elevadas, o que pode

estar relacionado à maior suscetibilidade dessas partículas menores ao espalhamento de ondas de alta frequência.

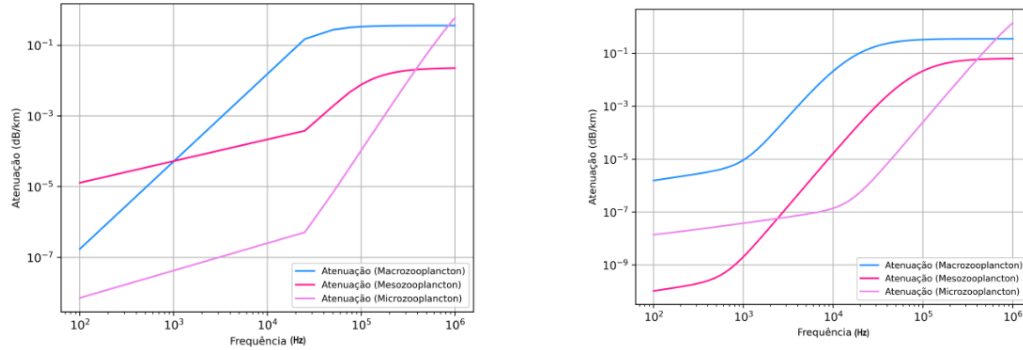


Figura 3.11: Atenuação pelo zooplâncton em diferentes tamanhos (macro - representada de azul, meso - representada de rosa e micro - representada de lilás) na região de Sepetiba (RJ), com os dados da primeira figura correspondendo à estação 06 e da segunda, à estação 08.

Em contrapartida, nas estações de Arraial do Cabo, o macrozooplâncton se destacou como o principal atenuador de ondas acústicas em todas as faixas de frequência analisadas. Em praticamente todas as estações, a atenuação causada por essa categoria de zooplâncton foi superior às demais, independentemente da frequência, indicando que a abundância de macrozooplâncton na região, associada ao regime de ressurgência, exerce uma influência decisiva sobre a propagação do som (Figura 3.12).

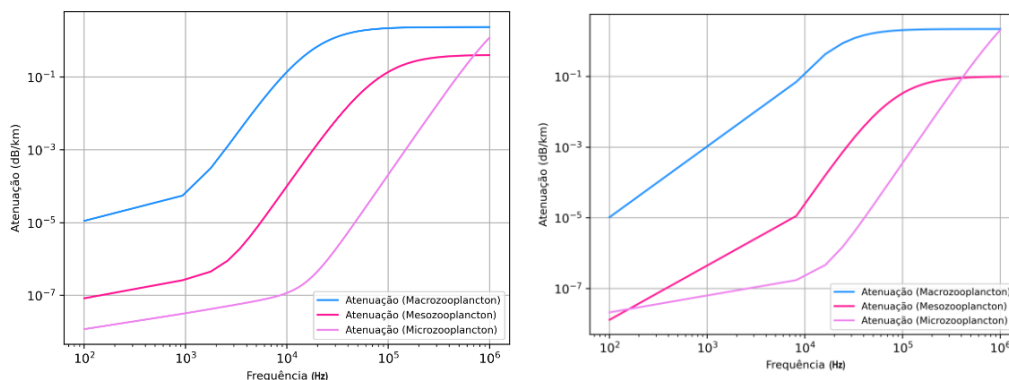


Figura 3.12: Atenuação pelo zooplâncton em diferentes tamanhos (macro - representada de azul, meso - representada de rosa e micro - representada de lilás) na região de Arraial do Cabo (RJ), com os dados da primeira figura correspondendo à estação 01 e da segunda, à estação 02.

Outro aspecto relevante observado é que a magnitude da atenuação pelo macrozooplâncton em Arraial do Cabo é significativamente maior do que em Sepetiba. Em Arraial, os valores de atenuação chegam a ultrapassar 10 dB/km em algumas estações, enquanto que em Sepetiba nenhuma das estações atingiu valores superiores a 1 dB/km (Figura 3.13). Essa diferença substancial destaca o impacto das condições oceanográficas distintas entre as duas regiões, onde o fenômeno da ressurgência em Arraial do Cabo favorece o aumento da biomassa zooplanctônica, intensificando a atenuação acústica.

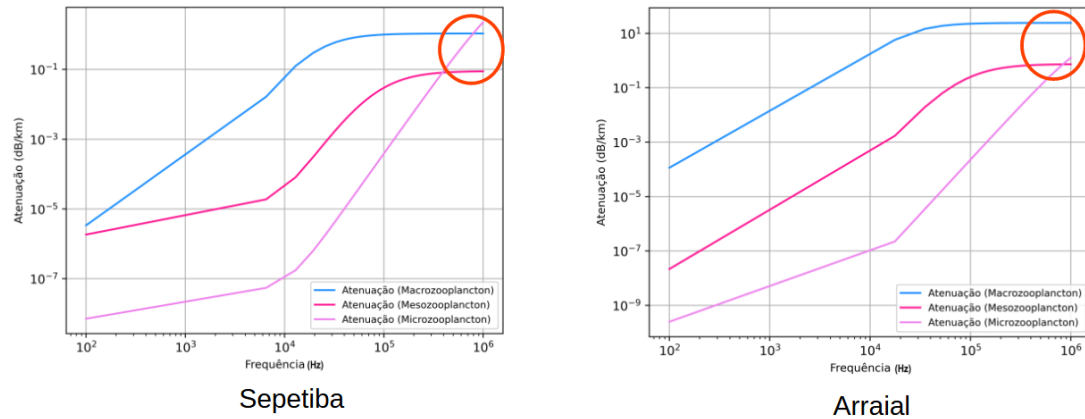


Figura 3.13: Atenuação pelo zooplâncton de acordo com o seu tamanho (macro - representada de azul, meso - representada de rosa e micro - representada de lilás) nas duas regiões de estudo (Sepetiba/RJ - estação 14 e Arraial do Cabo/RJ - estação 06).

Analisando os dados e as equações aplicadas no cálculo da atenuação, é possível inferir que essa disparidade nos resultados entre as regiões de estudo está relacionada à densidade de zooplâncton. Em Arraial do Cabo, a ressurgência de águas ricas em nutrientes cria condições ideais para a proliferação do zooplâncton, resultando em uma biomassa superior à observada em Sepetiba. Consequentemente, a maior concentração de zooplâncton em Arraial do Cabo se traduz em uma atenuação mais acentuada do som (Figura 3.14).

Esse comportamento demonstra como as características físico-químicas da coluna d'água influenciam a distribuição e a densidade do zooplâncton, e como isso, por sua vez, afeta a propagação acústica. A maior biomassa zooplancônica observada em Arraial do Cabo amplifica a atenuação do som, evidenciando a relação direta entre a ecologia marinha e os processos físicos de propagação acústica no ambiente marinho.

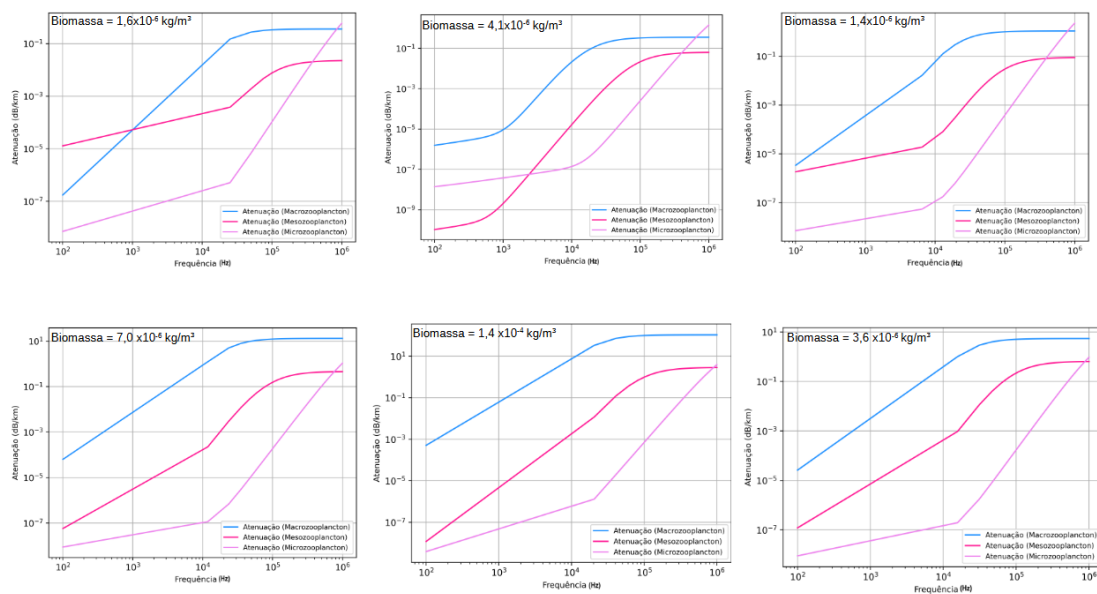


Figura 3.14: Atenuação pelo zooplâncton de acordo com o tamanho (macro - representada de azul, meso - representada de rosa e micro - representada de lilás) nas duas regiões de estudo (Sepetiba/RJ parte superior da figura e Arraial do Cabo/RJ parte inferior da figura), relacionando a atenuação acústica com a biomassa do zooplâncton.

3.2.2 Zooplâncton como fator atenuante do sinal acústico

Com base nos resultados apresentados, pode-se concluir que o zooplâncton atua como um atenuador do sinal acústico, sendo essa atenuação influenciada pela frequência do sinal emitido. Observou-se que, à medida que a frequência aumenta, a atenuação causada pelo zooplâncton se torna mais relevante. Assim, para analisar a interação entre a frequência do sinal e a atenuação resultante, é fundamental conhecer a frequência do sinal emitido, conforme ilustrado na Figura 3.15.

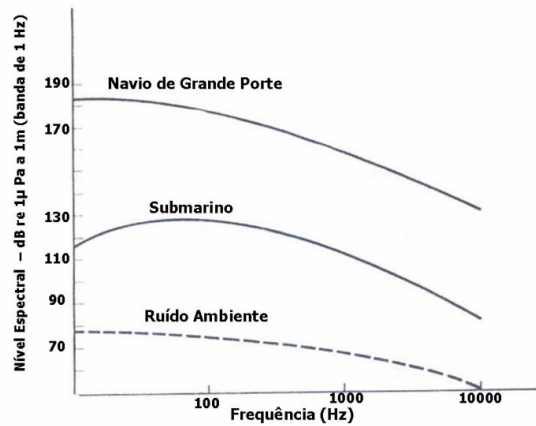
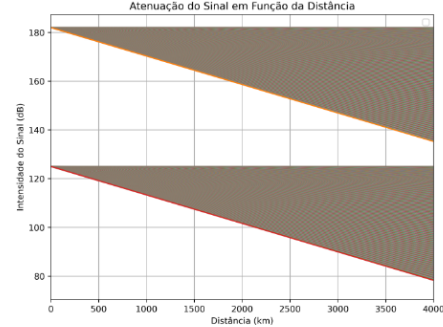
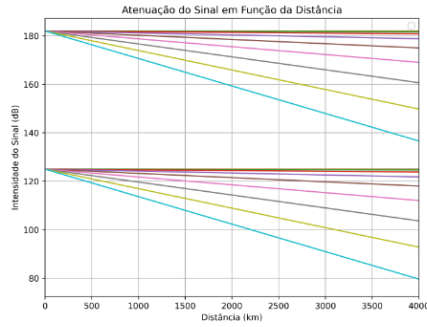


Figura 3.15: Banda esperada para níveis espectrais de navios e submarinos (adaptada de Tramujas [5]).

Essa abordagem permite estimar a relevância da atenuação provocada pelo zooplâncton em diferentes cenários, como o sinal emitido por submarinos e navios de grande porte, tanto na região de Arraial do Cabo (Figura 3.16) quanto na Baía de Sepetiba (Figura 3.17).

100 Hz



10000 Hz

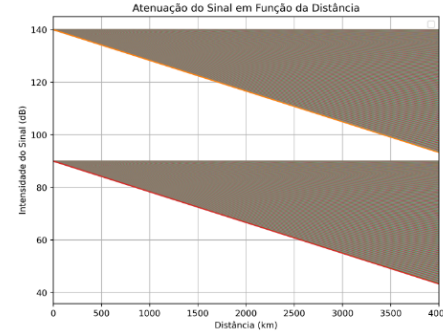
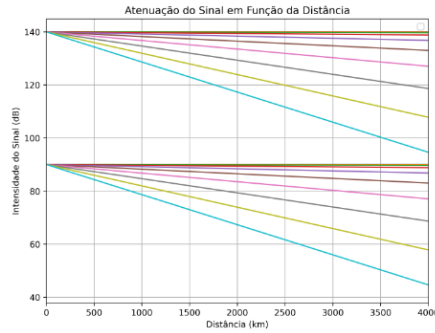
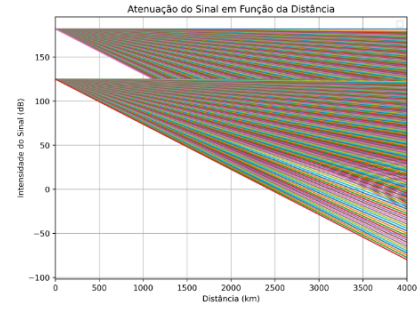
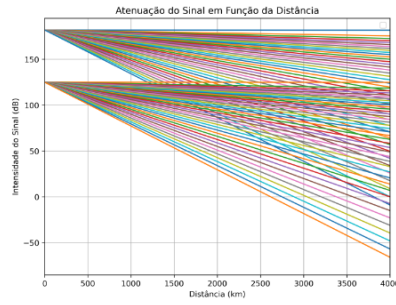


Figura 3.16: Atenuação estimada pelo zooplâncton de um sinal de navio de grande porte (sinal superior) e de um submarino (sinal inferior) para duas frequências diferentes em Arraial do Cabo/RJ. Os dados correspondem à estação 17 (à esquerda) e à estação 25 (à direita).

Os resultados indicam que as frequências observadas para submarinos e navios, que variam entre 100 Hz e 10 kHz, não resultam em uma atenuação significativa do sinal pelo zooplâncton. Isso ocorre porque, nessas faixas de frequência, a atenuação causada pelo zooplâncton é de ordem de grandeza negativa, o que implica em uma redução mínima do sinal. Portanto, em condições normais, se a atenuação do sinal dependesse unicamente da presença de zooplâncton no ambiente marinho, o sinal teria a capacidade de se propagar por longas distâncias, com pouca interferência biológica.

100 Hz



10000 Hz

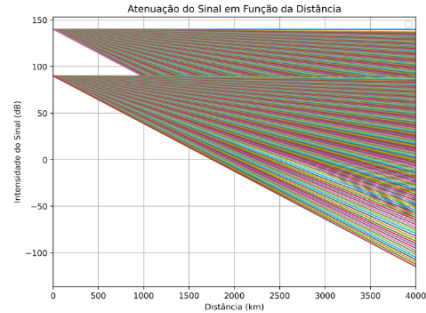
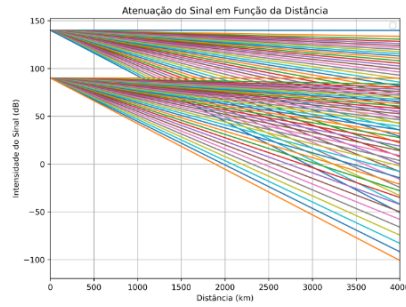


Figura 3.17: Atenuação estimada pelo zooplâncton para sinais acústicos de um navio de grande porte (sinal superior) e de um submarino (sinal inferior) em duas frequências distintas, na região de Sepetiba (RJ). Os dados correspondem à estação 06 (à esquerda) e à estação 14 (à direita).

Entretanto, a atenuação do sinal acústico emitido por submarinos, cuja intensidade é inferior à dos navios, mostrou-se mais sensível à presença de zooplâncton (Figura 3.18). Isso sugere que, para sinais de menor intensidade, como os gerados por submarinos, a atenuação pelo zooplâncton pode ter um papel mais relevante, embora ainda não seja o fator predominante na redução do alcance do sinal. Já no caso dos navios de grande porte, cuja intensidade de sinal é significativamente maior, a atenuação pelo zooplâncton é menos expressiva, devido à maior energia associada ao sinal emitido, o que permite sua propagação por maiores distâncias sem sofrer grandes perdas.

A atenuação foi analisada tanto em baixas frequências, como 100 Hz, quanto em frequências mais altas, como 10 kHz. A primeira faixa de frequência está associada principalmente ao ruído mecânico gerado por submarinos, uma característica comum dessas embarcações, que apresentam ruídos significativos nessa faixa. Submarinos mais antigos, como o modelo IKL 209, por exemplo, apresentam uma cavitação

localizada entre 1000 Hz e 5000 Hz, o que torna essa faixa particularmente relevante para a análise de atenuação em ambientes marinhos [70].

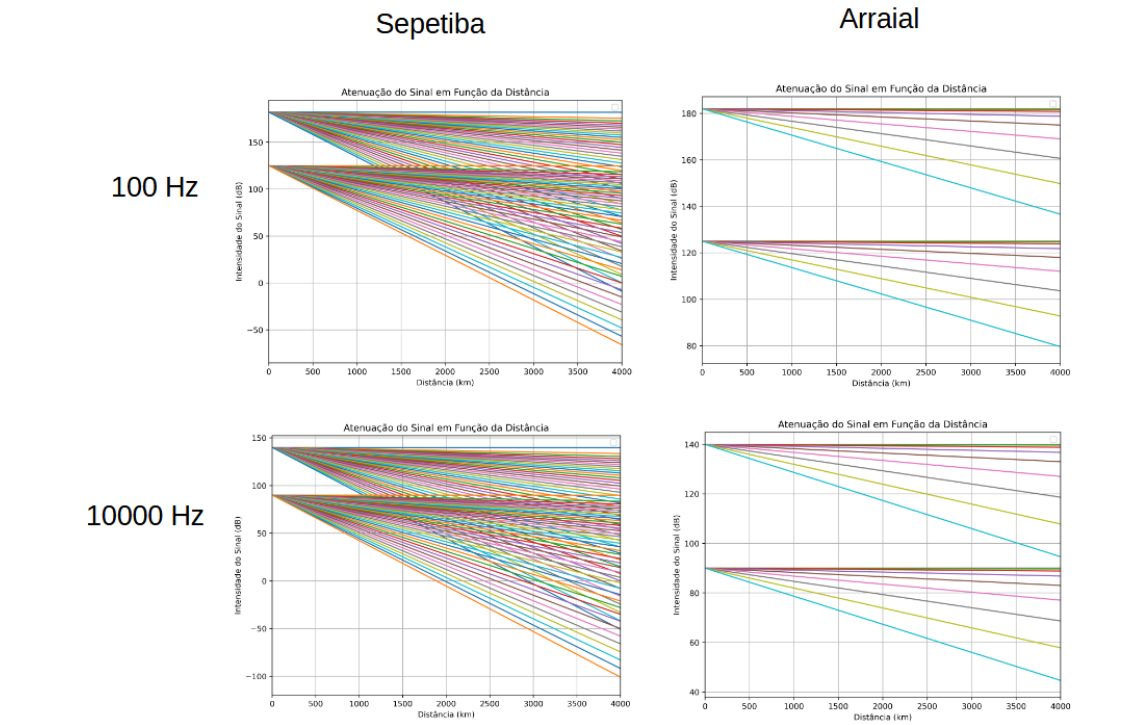


Figura 3.18: Atenuação estimada pelo zooplâncton de um sinal de navio de grande porte (sinal superior) e de um submarino (sinal inferior) para duas frequências diferentes nas duas regiões de estudo (Sepetiba/RJ - estação 06 e Arraial do Cabo/RJ - estação 17).

3.3 Relação da fluorescência com a atenuação

Como mencionado anteriormente, a fluorescência é um fenômeno físico em que certas substâncias, ao serem expostas à radiação eletromagnética, emitem luz [71]. Esse fenômeno pode ser observado em diversos micro-organismos, como os zooplânctons, que possuem pigmentos capazes de emitir luz quando excitados por uma fonte de radiação. No contexto deste estudo, a fluorescência foi relacionada à atenuação acústica em diferentes grupos de zooplâncton, e os resultados revelam padrões distintos de comportamento entre as categorias de tamanho analisadas.

Observou-se que, para o macro e mesozooplâncton, a atenuação acústica permanece relativamente constante, independentemente da quantidade de energia luminosa emitida. Ou seja, esses organismos, que possuem maiores dimensões, parecem não sofrer variações na atenuação conforme a intensidade da fluorescência (Figura 3.19). Em contrapartida, no caso do microzooplâncton, verificou-se uma relação de proporcionalidade direta entre a atenuação acústica e a energia luminosa emitida. Quanto maior a intensidade da fluorescência registrada, maior a atenuação acústica observada para esse grupo.

Essa diferença pode ser explicada pela concentração e distribuição dos organismos nas diferentes faixas de tamanho. No caso do macrozooplâncton, a alta concentração de organismos em uma faixa estreita resulta em uma atenuação mais elevada e restrita a determinados intervalos de frequência. Já o microzooplâncton, que apresenta uma distribuição mais ampla em termos de tamanho e concentração, causa uma atenuação mais dispersa, com uma maior variabilidade de valores ao longo da extensão do gráfico 3.19.

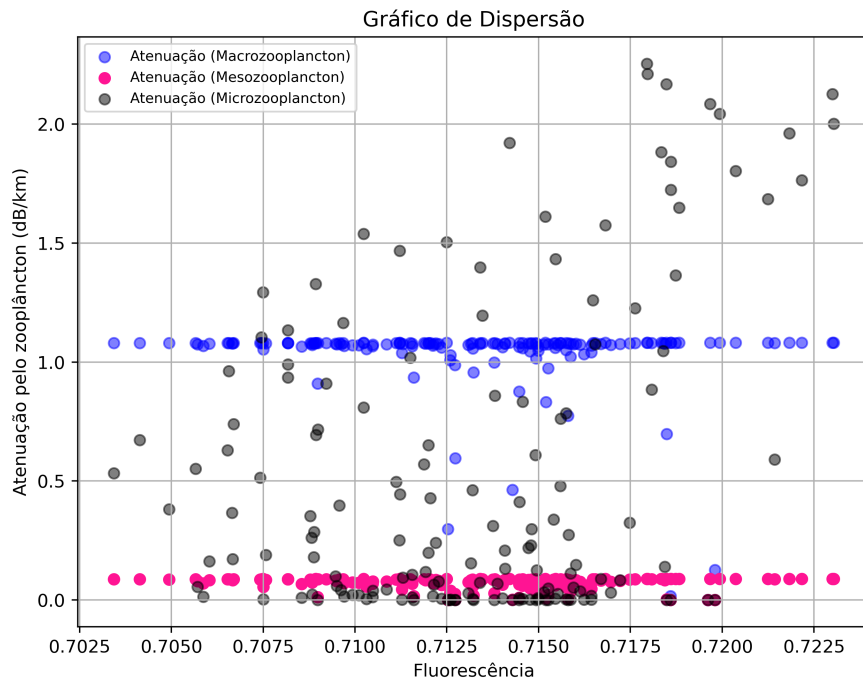


Figura 3.19: Gráfico de dispersão mostrando a relação entre a fluorescência e a atenuação acústica (dB/km) causada por diferentes categorias de zooplâncton: macrozooplâncton (azul), mesozooplâncton (rosa) e microzooplâncton (cinza).

As diferenças observadas na relação entre fluorescência e atenuação estão associadas ao tamanho dos organismos. Zooplâncton de maior porte, como o macrozooplâncton, tende a dispersar mais energia sonora devido ao seu maior volume e massa, enquanto que o microzooplâncton, por sua maior densidade e dispersão, provoca uma atenuação mais diversificada e com picos de intensidade em áreas de alta concentração. Essa correlação foi especialmente evidente nas regiões onde a densidade de microzooplâncton era elevada, resultando em uma faixa de atenuação acústica mais extensa.

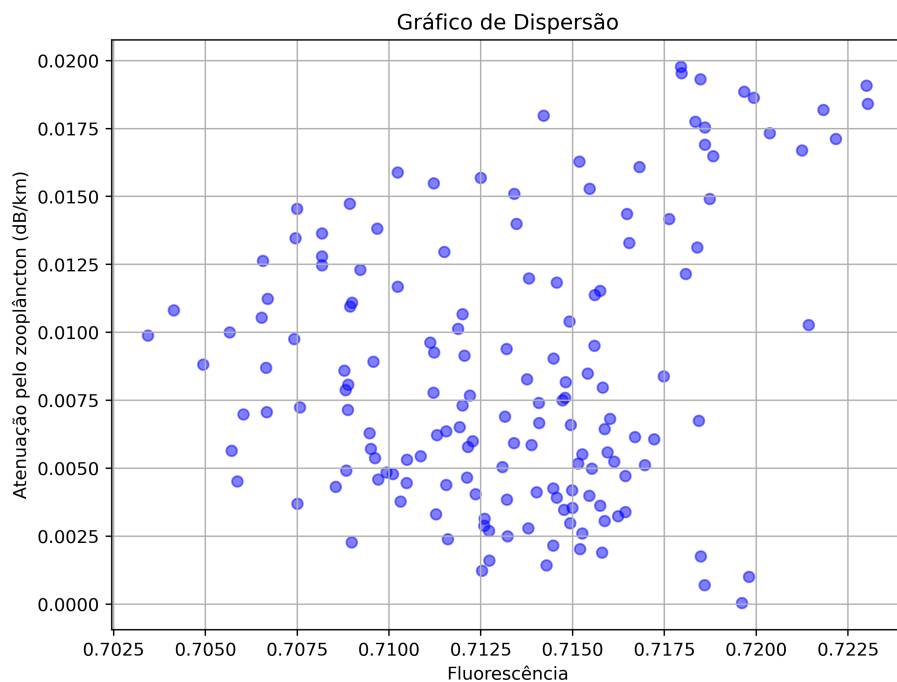


Figura 3.20: Gráfico de dispersão mostrando a relação entre a fluorescência e a atenuação acústica (dB/km) pelo zooplâncton. O gráfico ilustra como a fluorescência do zooplâncton se correlaciona com a atenuação do som.

A análise separada dos zooplanctontes por tamanho (macro, meso e micro) também mostrou que o tamanho adotado na metodologia inicial (200 μm) produziu resultados similares aos obtidos para o microzooplâncton (Figura 3.20). Isso se deve ao fato de que o tamanho da malha de amostragem utilizada para capturar os organismos estava dentro da faixa de dimensões consideradas como microzooplâncton. No entanto, o gráfico referente ao tamanho da malha apresentou valores dez vezes menores do que os observados no gráfico do microzooplâncton, uma diferença que pode ser atribuída à menor densidade de organismos detectada nesse intervalo.

Portanto, a fluorescência tem potencial para ser utilizada como um *proxy* eficiente na determinação da concentração de zooplâncton e de suas diferentes classes de tamanho, o que permite estimar a atenuação acústica causada por esses organismos. Além disso, a fluorescência pode ser utilizada para inferir características ecológicas importantes, como a biomassa e a densidade do zooplâncton, o que contribuiria para a modelagem acústica e para a interpretação de dados subaquáticos em sistemas de monitoramento ambiental.

Capítulo 4

Conclusões

As análises realizadas neste estudo demonstraram que a atenuação acústica no ambiente marinho é influenciada pela presença de zooplâncton, cuja biomassa e distribuição espacial variam conforme as condições oceanográficas locais. Foi possível estabelecer uma correlação direta entre a densidade de microzooplâncton e a atenuação do som, particularmente em frequências mais elevadas, enquanto o macrozooplâncton mostrou-se dominante nas faixas de frequência mais baixas, como as observadas entre 1 kHz e 100 kHz. Esses resultados são consistentes com a hipótese de que os organismos maiores tendem a causar uma atenuação mais significativa devido ao seu tamanho e capacidade de dispersar energia sonora.

Nas regiões de estudo, Arraial do Cabo e Sepetiba, as diferenças nas condições oceanográficas resultaram em perfis de atenuação acústica distintos. Em Arraial do Cabo, a ressurgência de águas frias e ricas em nutrientes criou um ambiente com maior biomassa zooplânctônica, o que resultou em uma atenuação mais pronunciada em todas as frequências, superando os 10 dB/km em profundidades superiores. Por outro lado, Sepetiba, com sua camada de mistura bem definida e gradientes térmicos menos intensos, apresentou atenuações mais modestas, nunca ultrapassando 1 dB/km nas estações analisadas. Esses achados sugerem que a hidrodinâmica e a variação de salinidade são fatores-chave que modulam a distribuição de zooplâncton e, consequentemente, a atenuação acústica nas diferentes regiões.

Adicionalmente, a fluorescência, como *proxy* para a concentração de zooplâncton, mostrou-se um indicador útil na estimativa da biomassa desses organismos e sua relação com a atenuação do som. Embora a fluorescência tenha apresentado maior

correlação com o microzooplâncton, ela oferece potencial para inferir a presença de diferentes classes de tamanho de zooplâncton, particularmente em regiões de alta concentração biológica. Isso sugere que o uso de fluorescência pode ser aprimorado como uma ferramenta de monitoramento subaquático, permitindo o desenvolvimento de modelos acústicos mais precisos para prever a atenuação em ambientes marinhos densamente povoados por plâncton.

As análises da atenuação acústica por diferentes métodos também indicaram uma variação regional importante. Em Sepetiba, os métodos descritos por Moore [3] e Kinsler et al. [4] mostraram alta compatibilidade, enquanto em Arraial do Cabo, as discrepâncias entre os métodos foram mais pronunciadas, principalmente em águas mais profundas, onde a variação da salinidade interfere significativamente nos cálculos de atenuação. Esse achado destaca a importância de ajustar os modelos de atenuação às características físico-químicas locais para melhorar a precisão das previsões em diferentes cenários oceanográficos.

Os resultados deste estudo têm implicações para o monitoramento acústico em áreas costeiras, sugerindo que, em frequências mais baixas, a atenuação causada pelo zooplâncton é menos significativa para sinais acústicos emitidos por navios e submarinos. No entanto, em submarinos de menor intensidade de sinal, o impacto do zooplâncton sobre a propagação sonora torna-se mais relevante, especialmente em regiões com alta concentração biológica, como em Arraial do Cabo. O desenvolvimento de modelos de propagação do som na água do mar que integrem dados de biomassa zooplânctônica, fluorescência e parâmetros oceanográficos pode fornecer previsões mais precisas, contribuindo para a compreensão dos padrões de propagação acústica nesses ambientes.

Dessa forma, este estudo contribui para um melhor entendimento da interação entre a biologia marinha e os processos de propagação acústica, reforçando a necessidade de considerar a variabilidade ecológica e oceanográfica para a modelagem acústica em regiões costeiras e de plataforma continental. Foi proposta a criação do termo "atenuação zooplânctônica" para identificar de forma mais clara a parcela da atenuação atribuída ao zooplâncton, considerando sua viscosidade e a dispersão sonora causada por esses organismos. Tal nomenclatura facilitaria a categorização desse fenômeno em futuros estudos e na modelagem acústica.

Por fim, para expandir o entendimento sobre o tema, estudos futuros poderiam investigar a atenuação acústica em uma variedade maior de regiões oceânicas, com diferentes condições oceanográficas e biológicas. Além disso, seria valioso explorar a interação entre zooplâncton e outros componentes, como sedimentos em suspensão, e avaliar a influência de diferentes tipos de zooplâncton na propagação acústica. A implementação de tecnologias mais avançadas para medições *in situ* de fluorescência e atenuação também poderia aumentar a precisão dos resultados e abrir novas possibilidades de aplicação prática desse conhecimento em áreas como o monitoramento ambiental e a acústica submarina.

Referências Bibliográficas

- [1] VORLÄNDER, M., MOMMERTZ, E. “Definition and measurement of random-incidence scattering coefficients”, *Applied acoustics*, v. 60, n. 2, pp. 187–199, 2000.
- [2] HENNESY, A., BARROS, A., WINDER, M. “Minúsculos, mas poderosos: quem são os menores animais que vivem na água”, *Unesp para jovens*, 2022. Disponível em: <<https://parajovens.unesp.br/minusculos-mas-poderosos-quem-sao-os-menores-animais-que-vivem-na-agua/>>.
- [3] MOORE, S. *Suivi des flux d’eau et de matières en suspension dans les cours d’eau par profilers acoustiques Doppler horizontaux*. Tese de Doutorado, Grenoble, 2011.
- [4] KINSLER, L. E., FREY, A. R., COPPENS, A. B., et al. *Fundamentals of acoustics*. River street, Hoboken, NJ 07030, John wiley & sons, 2000.
- [5] TRAMUJAS, R. *PROJETO DE UM SISTEMA ACÚSTICO DE BAIXO CUSTO PARA A MEDIÇÃO DE RUÍDOS IRRADIADOS POR NAVIOS E SUBMARINOS*. Tese de Doutorado, UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO DE JANEIRO, 2008.
- [6] URICK, R. “The absorption of sound in suspensions of irregular particles”, *The Journal of the acoustical society of America*, v. 20, n. 3, pp. 283–289, 1948.
- [7] VINNÅ, L. R., BOUFFARD, D. “A method for using ADCP echo intensity to track particle movements in Lake Biel”, *9th International Symposium on Ultrasonic Doppler Methods for Fluid Mechanics and Fluid Engineering*, 2014.
- [8] BISTAFA, S. R. *Acústica aplicada ao controle do ruído*. São Paulo, Editora Blucher, 2018.
- [9] OKUNO, E., CALDAS, I. L., CHOW, C. “Física para ciências biológicas e biomédicas”. In: *Física para ciências biológicas e biomédicas*, São Paulo : Harbra, c1986, pp. 490–490, São Paulo, 1986.

- [10] FUSINATO, V. “APOSTILA (ACÚSTICA E VIBRAÇÃO)”. In: *Mini-curso de ACÚSTICA e ruídos do Departamento de física da Universidade Estadual de Maringá, Paraná*, 2005.
- [11] MELO, L. *Estudo da Capacidade de Atenuação ACÚSTICA da Manta de Resíduos de Acetato de Vinila Etil (EVA) em Escala Absoluta*. Relatório técnico, Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, Cruz das Almas, Bahia-Brasil, 2017.
- [12] SALIBA, T. M. *Manual prático de avaliação e controle do ruído: PPRA*, v. 12. São Paulo, LTr Editora, 2021.
- [13] DURANTE, G. *Desenvolvimento de uma rede de sensores sem fio para processamento de sinais acústicos marinhos*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2018.
- [14] BRADLEY, D. L., STERN, R. R. *Underwater sound and the marine mammal acoustic environment: A guide to fundamental principles*. Washington, D.C., Marine Mammal Commission, 2008.
- [15] DA SILVA, A. M., DA SILVA LEONEL, A. P., VEIT, J., et al. “Semi Preserved of Marine Fish, Physical-Chemical, Microbiological and Nutritional Characterization”, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science*, v. 6, n. 10, 2019.
- [16] HANSEN, P. G., BARHAM, E. G. “RESONANT CAVITY MEASUREMENTS OF THE EFFECTS OF “RED WATER” PLANKTON ON THE ATTENUATION OF UNDERWATER SOUND”, *Limnology and Oceanography*, v. 7, n. 1, pp. 8–13, 1962.
- [17] GORSKA, N., CHU, D. “Some aspects of sound extinction by zooplankton”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 110, n. 5, pp. 2315–2325, 2001.
- [18] ROSSING, T. *Springer handbook of acoustics*. New York, Springer Science & Business Media, 2007.
- [19] LAZZARINI, V. E. “Elementos de acústica”, *apostila do Departamento de Artes da UEL, Londrina*, 1998.
- [20] BEPPU, F. T., NUNES E SOUZA, J. G., KUSASKARIBA, T. *Conversão de energia sonora para energia elétrica utilizando alto-falantes*. B.S. thesis, Universidade Tecnológica Federal do Paraná, 2015.

- [21] CORRÊA, A. B., OTHERS. *Uma proposta de modelagem matemática utilizando os conceitos de ondas sonoras*. Tese de Mestrado, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2016.
- [22] POZZO, L. H. *Estudo da propagação de feixes acústicos no oceano*. Tese de Mestrado, Universidade Estadual Paulista (Unesp), 2017.
- [23] COSTA, E. S., MEDEIROS, E. B. “ESTUDO SOBRE A PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM ÁGUAS RASAS”. In: *Congresso de Métodos Numéricos em Engenharia*, 2015.
- [24] POGGIO, G. “Guia de Guerra Anti-Submarina”, *Conhecimentos*, 2007.
- [25] VITOY, R., OTHERS. *Propagação do som em lâminas de águas rasas por acústica de raios*. Tese de Mestrado, UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA, 1999.
- [26] FERNANDES, D. V. *Análise da refletividade do sinal acústico pelo fundo marinho no espectro das comunicações submarinas*. Tese de Mestrado, Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra – UFF, Niterói., 2022.
- [27] WIEBE, P. H., GREENE, C. H., STANTON, T. K., et al. “Sound scattering by live zooplankton and micronekton: Empirical studies with a dual-beam acoustical system”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 88, n. 5, pp. 2346–2360, 1990.
- [28] BORGES, P. D. “Apostila de física”, *Santa Maria*, 2009.
- [29] FRANCO GUZMÁN, É. E. *Análise do método de medição de viscosidade de líquidos por ultra-som usando a reflexão de ondas de cisalhamento*. Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo, 2006.
- [30] CLAY, C. S., MEDWIN, H. “Acoustical oceanography: principles and applications”, *(No Title)*, 1977.
- [31] URICK, R. J. “Principles of underwater sound”, *(No Title)*, 1983.
- [32] BACANELI, F., FURUKAWA, C. M., ADAMOWSKI, J. C. “Determinação do teor de gordura no leite através de parâmetros acústicos”, *Simpósio Brasileiro de Automação Inteligente, São Paulo, Brasil*, 1998.
- [33] PAZIN-FILHO, A., SCHMIDT, A., ALMEIDA-FILHO, O. C., et al. “Caracterização ultra-sônica tecidual miocárdica”, *Arquivos Brasileiros de Cardiologia*, v. 81, pp. 319–325, 2003.

- [34] ALLEGRA, J., HAWLEY, S. “Attenuation of sound in suspensions and emulsions: Theory and experiments”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 51, n. 5B, pp. 1545–1564, 1972.
- [35] EPSTEIN, P. S., CARHART, R. R. “The absorption of sound in suspensions and emulsions. I. Water fog in air”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 25, n. 3, pp. 553–565, 1953.
- [36] DOS SANTOS, C. *Influência do espalhamento acústico na percepção auditiva de espaços: métodos e desenvolvimentos*. Tese de Doutorado, [sn], 2011.
- [37] PILCH, A., KAMISIŃSKI, T. “The effect of geometrical and material modification of sound diffusers on their acoustic parameters”, *Archives of Acoustics*, pp. 955–966, 2011.
- [38] BIO, M. “Zooplâncton”, *Marine Bio*, 2020.
- [39] DE ASSIS ESTEVES, F. *Fundamentos de limnologia*. Rio de Janeiro, Interciência, 1998.
- [40] JOHNSON, W. S., ALLEN, D. M. *Zooplankton of the Atlantic and Gulf coasts: a guide to their identification and ecology*. Baltimore, JHU Press, 2012.
- [41] SANTANDER, H., LUYO, G., BARRERA, S. C., et al. “Catálogo de zooplankton en el mar peruano. Primera parte: área Pisco-San Juan”, *Boletín Instituto del Mar del Perú*, v. 6, n. 1, pp. 1–75, 1981.
- [42] SÁNCHEZ-COLOMER, M. G. “Las comunidades de zooplancton de los embalses españoles”, *Ecosistemas*, v. 10, n. 2, 2001.
- [43] AL-YAMANI, F. Y., SKRYABIN, V., GUBANOVA, A., et al. “Marine zooplankton practical guide”, *Kuwait Institute for Scientific Research, Kuwait*, v. 399, 2011.
- [44] STRAMMA, L., ENGLAND, M. “On the water masses and mean circulation of the South Atlantic Ocean”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 104, n. C9, pp. 20863–20883, 1999.
- [45] SILVEIRA, I. C. A. D., SCHMIDT, A. C. K., CAMPOS, E. J. D., et al. “A corrente do Brasil ao largo da costa leste brasileira”, *Revista Brasileira de Oceanografia*, v. 48, pp. 171–183, 2000.
- [46] DA SILVEIRA, I., CALADO, L., CASTRO, B., et al. “On the baroclinic structure of the Brazil Current–Intermediate Western Boundary Current system at 22–23 S”, *Geophysical research letters*, v. 31, n. 14, 2004.

- [47] CASTRO, B. M. D., MIRANDA, L. B. D., SILVA, L. D. S., et al. “Processos físicos: hidrografia, circulação e transporte”, *Oceanografia de um ecossistema subtropical*, 2008.
- [48] CASTRO, B. M. “Summer/winter stratification variability in the central part of the South Brazil Bight”, *Continental Shelf Research*, v. 89, pp. 15–23, 2014.
- [49] CASTRO FILHO, B. M. D., MIRANDA, L. B. D. “Physical oceanography of the western atlantic continental shelf located between 4 graus N and 34 graus S: Coastal segment (4, W)”, *The sea, vol. 11*, 1998.
- [50] FERREIRA, C., GONÇALVES, J., COUTINHO, R. “Ship hulls and oil platforms as potential vectors to marine species introduction”, *Journal of Coastal Research*, pp. 1340–1345, 2006.
- [51] VALENTIN, J. L. “Spatial structure of the zooplankton community in the Cabo Frio region (Brazil) influenced by coastal upwelling”, *Tropical Zooplankton*, pp. 183–199, 1984.
- [52] CORTEZ, R. H. D. C., OTHERS. *Caracterização oceanográfica de um canal de maré e da zona costeira adjacente: canal de Barra de Guaratiba, Baía de Sepetiba, RJ*. Tese de Mestrado, Universidade do Estado do Rio de Janeiro, 2014.
- [53] TOPOGRAPHIC. “MapaTopográficoArraialdoCabo”, *topographic*, 2018.
- [54] FONSECA, R. B. M. D. *Classificação da linha de costa e Evolução Holocênica da ilha do Cabo Frio, Arraial do Cabo-Rio de Janeiro*. Tese de Mestrado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, 2009.
- [55] FRAGA, R. “CTD”, *Muito curioso*, 2018.
- [56] NOAUTHOR. “Marine Conductivity Temperature Depth”, *Indonesia Marine Equipment - INAMEQ*, 2019.
- [57] HANEY, J. F., HALL, D. J. “Sugar-coated Daphnia: A preservation technique for Cladocera 1”, *Limnology and Oceanography*, v. 18, n. 2, pp. 331–333, 1973.
- [58] BOLTOVSKOY, D., OTHERS. “Atlas del zooplancton del Atlántico Sudoccidental y métodos de trabajo con el zooplancton marino”, *(No Title)*, 1981.

- [59] MEDWIN, H., CLAY, C. S. *Fundamentals of acoustical oceanography*. San Diego, Elsevier, 1998.
- [60] FISHER, F., SIMMONS, V. “Sound absorption in sea water”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 62, n. 3, pp. 558–564, 1977.
- [61] THOSTESON, E. D., HANES, D. M. “A simplified method for determining sediment size and concentration from multiple frequency acoustic backscatter measurements”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 104, n. 2, pp. 820–830, 1998.
- [62] MEDWIN, H. “Speed of sound in water: A simple equation for realistic parameters”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 58, n. 6, pp. 1318–1319, 1975.
- [63] DEL GROSSO, V. A. “New equation for the speed of sound in natural waters (with comparisons to other equations)”, *The Journal of the Acoustical Society of America*, v. 56, n. 4, pp. 1084–1091, 1974.
- [64] SEWELL, C. “The extinction of sound in a viscous atmosphere by small obstacles of cylindrical and spherical form”, *Proceedings of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical and Physical Character*, v. 83, n. 566, pp. 547–548, 1910.
- [65] HAY, A. E. “On the remote acoustic detection of suspended sediment at long wavelengths”, *Journal of Geophysical Research: Oceans*, v. 88, n. C12, pp. 7525–7542, 1983.
- [66] MANGEL, M., CLARK, C. W. *Dynamic modeling in behavioral ecology*, v. 8. William Street Princeton, NJ 08540 USA, Princeton University Press, 1988.
- [67] KIMMERER, W. “Effects of freshwater flow on abundance of estuarine organisms: physical effects or trophic linkages?” *Marine Ecology Progress Series*, v. 243, pp. 39–55, 2002.
- [68] MCNAUGHT, A. D., WILKINSON, A., OTHERS. *Compendium of chemical terminology*, v. 1669. Oxford, UK, Blackwell Science Oxford, 1997.
- [69] FELIPE SANTIAGO, M., OTHERS. “Dinâmica e interações das comunidades planctônicas na Bacia Portuária do Recife (Pernambuco-Brasil)”, *Universidade Federal de Pernambuco*, 2010.

- [70] TEIXEIRA, M. C., DE LIMA, W. B. “A engenharia mecânica na concepção de um submarino”, *Revista Tecnológica da Universidade Santa Úrsula*, v. 2, n. 2, pp. 137–149, 2020.
- [71] CUGNASCA, B. D. S., SANTOS, A. A. D. “Fluorescência: princípios e algumas aplicações”. In: *9º Workshop do Programa de Mestrado Profissional Tecnologia em Química e Bioquímica da USP-AMPT*, 2021.