

UNIVERSIDADE FEDERAL FLUMINENSE
INSTITUTO DE GEOCIÊNCIAS
DEPARTAMENTO DE GEOLOGIA
MESTRADO EM DINÂMICA DOS OCEANOS E DA TERRA

Vanessa Bach Rodrigues

Propagação acústica em um vórtice ciclônico de
mesoescala da Corrente do Brasil

Niterói-RJ

2017

VANESSA BACH RODRIGUES

PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM UM VÓRTICE CICLÔNICO DE MESOESCALA DA
CORRENTE DO BRASIL

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra da Universidade Federal Fluminense, como requisito parcial para obtenção do Grau de Mestre. Área de Concentração: Geologia e Geofísica Marinha.

Orientador: Dr. LEANDRO CALADO

Co-orientador: MSc FÁBIO CONTRERA XAVIER

Niterói-RJ

2017

R696

Rodrigues, Vanessa Bach

Propagação acústica em um vórtice ciclônico de mesoescala da Corrente do Brasil / Vanessa Bach Rodrigues. – Niterói : [s.n.], 2017.

97 f.

Dissertação (Mestrado em Dinâmica dos Oceanos e da Terra) – Universidade Federal Fluminense, 2017.

1.Modelagem acústica. 2.Vórtices. 3.Perdas de propagação.
4.Geofísica Marinha. I.Título.

CDD 622.1592

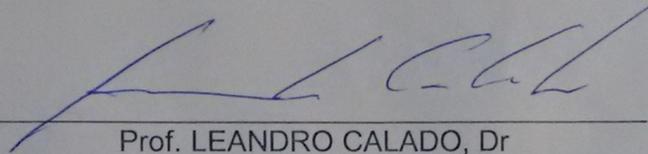
VANESSA BACH RODRIGUES

PROPAGAÇÃO ACÚSTICA EM UM VÓRTICE CICLÔNICO DE MESOESCALA DA
CORRENTE DO BRASIL

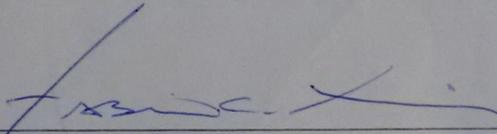
Dissertação apresentada ao Programa de Pós-
Graduação em Dinâmica dos Oceanos e Terra, da
Universidade Federal Fluminense, como requisito
parcial para obtenção do grau de Mestre.
Área de Concentração: Geologia e Geofísica Marinha

Aprovada em 23 de janeiro de 2017.

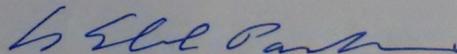
BANCA EXAMINADORA



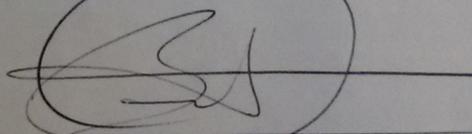
Prof. LEANDRO CALADO, Dr
Deptº de Geologia/LAGEMAR-UFF
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)



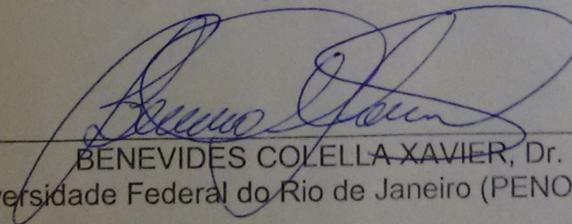
Prof. FABIO CONTRERA XAVIER, MSc.
Instituto Federal do Rio de Janeiro (IFRJ)
Instituto de Estudos do Mar Almirante Paulo Moreira (IEAPM)



Prof. CARLOS EDUARDO PARENTE RIBEIRO, Dr.
Universidade Federal do Rio de Janeiro (COPPE/UFRJ)



LEONARDO MARTINS BARREIRA, Dr.
Instituto de Pesquisas da Marinha (IPqM)



BENEVIDES COLELLA XAVIER, Dr.
Universidade Federal do Rio de Janeiro (PENOCOPPE)

'À minha mãe, Vanice, por ter sido exemplo e por considerar o estudo dos filhos sua maior prioridade. '

Agradecimentos

Ao meu orientador, Leandro Calado, por ter me aceitado como orientanda e, antes disso, como bolsista de apoio técnico. Pelos seus conhecimentos em modelagem hidrodinâmica e por ter me dado a oportunidade de participar do meu primeiro Cruzeiro Oceanográfico, a bordo do Aviso de Pesquisa Aspirante Moura.

Ao meu coorientador, MSc Fabio Contrera, por ter aceitado entrar 'neste barco' quando já estava em movimento e não ter hesitado em 'vestir a camisa'. Agradeço ainda por ter se empolgado com a ideia do meu trabalho, por ter me incentivado, por todas as explicações sobre acústica submarina (especialmente, aquelas relacionadas ao modelo TRACEO), mesmo antes de se tornar coorientador oficialmente.

À banca examinadora por ter aceitado o convite para criticar, sugerir e, com toda certeza, acrescentar muito a este trabalho.

Aos meus colegas de IEAPM (Mayumi, Lucas, Elaine, Natália, Lorrene e Simone), pela amizade e por tornarem o primeiro ano de mestrado mais leve e descontraído.

Em especial, à minha querida amiga Gabriela Nalini, que me acompanhou em toda a caminhada na Oceanografia, desde a UFPR até o fim de mestrado. Sempre muito presente, oferecendo ajuda, mesmo estando em outro continente. Obrigada, Bibi!

Tão especial quanto a Bibi, gostaria de agradecer ao meu fiel amigo (ou ex amigo?), Augusto Pereira. Por ter me acolhido para morar com ele no meu primeiro dia em Arraial do Cabo, sem nunca ter me visto na vida, e por ter sido companheiro em, absolutamente, todas as coisas. Obrigada, Gu!

Ao amigo Gabriel Codato, por ter me ajudado a dar os meus primeiros passos na acústica submarina e por ter me passado tudo que aprendeu ao decorrer do desenvolvimento do seu mestrado. Muito deste trabalho, se deve a tua ajuda. Super valeu, Coala!

Às minhas colegas Renata, Catarina e Natália, por se preocuparem e não me deixarem desanimar. Obrigada, gurias!

Aos colegas do CHM-12, por toda a torcida pelo meu mestrado! Por terem vibrado junto quando eu comecei a ver um frestinho de 'luz no fim do túnel'. Agradeço ao meu amigo e chefe, Rodrigo Barreto, pela compreensão durante este período. Obrigada!

À minha mãe e ao meu irmão, por terem cedido seus ouvidos para a minha 'choradeira', pelo apoio incondicional e pelo amor. Obrigada, mãezinha e Fi. Amo vocês!

Por fim, e com muita importância, agradeço a meu namorado, Tobias. Obrigada por ter vivido este mestrado comigo, abrindo mão de finais de semana, feriados, de momentos com a família e amigos. Obrigada por não ter me deixado virar sequer uma noite sozinha, por ter sido meu companheiro, indiscutivelmente. Obrigada por ter lido, revisado, comentado, discutido, cada pedacinho deste trabalho. Obrigada por se preocupar. Obrigada por cuidar. Te amo muito!

Todos sabem que, ao longo de um mestrado, todo apoio conta. Qualquer ajuda, significa toda ajuda do mundo. Sendo assim, chegando a esta parte dos agradecimentos, fiquei pensando o quanto sou cercada de pessoas boas e o quanto torceram por mim. Do fundo do coração, eu agradeço a todos que cruzaram o meu caminho durante este período.

Conteúdo

Agradecimentos	v
Lista de Figuras	xv
Resumo	xvi
Abstract	xviii
1 Introdução	1
1.1 O Vórtice de Cabo Frio	6
2 Objetivos	10
2.1 Geral	10
2.2 Específicos	10
3 Metodologia	11
3.1 O Modelo Regional Orientado por Feições	12
3.2 O Modelo Numérico Hidrodinâmico	16
3.3 Campo de Velocidade do Som	18
3.4 Dados Oceanográficos do Projeto DOCAAR	19
3.5 O Modelo de Propagação Acústica	21
3.6 Cenário I	26

3.7	Cenário II	27
4	Resultados e Discussão	30
4.1	Cenário I	30
4.1.1	Vórtice ciclônico de mesoescala simulado através do Modelo Hidro- dinâmico	30
4.1.2	Vórtice ciclônico de mesoescala caracterizado através de dados <i>in</i> <i>situ</i> do Projeto Oceanográfico DOCAAR	46
4.2	Cenário II	55
5	Considerações Finais	67

Lista de Figuras

1.1	Relação entre os perfis de temperatura (a) e velocidade do som (b) para águas profundas (Xavier, 2005)	3
1.2	Trajetórias da onda acústica numa coluna de água, considerando duas posições para uma fonte sonora. Interessante observar que, para a fonte na superfície, a refração que os raios sonoros sofrem ao incidirem na termoclina criam uma zona de sombra. Adaptado de Miguens (2006)	3
1.3	Sucessão de Vórtice ciclônicos e anticiclônicos pelo meandramento da Corrente do Brasil extraído de Calado (2006). Centros de baixa pressão (B) relacionados com meandros anticiclônicos (rotação anti-horária) e de alta pressão (A) nos meandros ciclônicos (rotação horária). As siglas VV, VCST e VCF, representam os vórtices de Vitória, Cabo de São Tomé e Cabo Frio, respectivamente.	8
3.1	Representação esquemática da entrada de dados, dos métodos aplicados neste trabalho e dos resultados.	12
3.2	Grade do Modelo de Feições para a Corrente do Brasil e com o anticiclone associado. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM.	13
3.3	Esquema de construção do modelo de feições. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM.	14
3.4	Campo inicial de temperatura após análises objetivas e redimensionalização utilizando dados orbitais de TSM para níveis sigma acima de 550 m. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM.	16

- 3.5 Grade utilizada nos experimentos numéricos, evidenciando resultados de saída de modelos numéricos referentes ao projeto REMO como: temperatura da superfície do mar, intensidade de direção dos vetores de velocidade, escala de vento e a formação de um vórtice de mesoescala. Fonte: Projeto REMO - IEAPM. 18
- 3.6 Imagem da Temperatura da Superfície do Mar evidenciando a presença do vórtice de Cabo Frio durante a campanha do Projeto DOCAAR. A trajetória editada em cinza é uma interpretação qualitativa da assinatura térmica frontal do vórtice. Fonte: Soutelino *et al.* (2013). 21
- 3.7 Perfis de dados XBT (temperatura e profundidade) coletados durante o Projeto DOCAAR correspondentes a cada um dos pontos de amostragem do vórtice ciclônico observado. 22
- 3.8 Representação das principais configurações do modelo acústico: posição da fonte, diretividade dos raios emitidos pela fonte, frequências de emissão do sinal acústico, hidrofones, os campos iniciais de velocidade do som e as características do fundo marinho. É importante salientar que os hidrofones estão dispostos ao longo de toda a seção, em uma grade de 201 linhas e 501 colunas. Adaptado de Codato (2015). 23
- 3.9 Representação esquemática dos experimentos acústicos realizados ao longo de dois conjunto de dados, utilizando duas frequências e em situações com a presença ou não do vórtice ciclônico. 27
- 3.10 Representação das principais configurações do modelo acústico referente ao cenário II: posição da fonte, diretividade dos raios emitidos pela fonte, frequências de emissão do sinal acústico, hidrofones (dispostos ao longo de toda grade do modelo), os campos iniciais de velocidade do som e as características do fundo marinho. 29
- 4.1 Campo sinótico horizontal de temperatura da superfície do mar (TSM) e vetores de velocidade da corrente na superfície no dia 15 de fevereiro de 2012. 30

4.2	Campo sinótico horizontal de altura da superfície do mar no dia 15 de fevereiro de 2012.	32
4.3	Campo sinótico horizontal de temperatura da superfície do mar (TSM) no dia 15 de fevereiro de 2012, com destaque para o posicionamento da seção vertical atravessando o vórtice ciclônico de Cabo Frio que foi utilizada para as simulações com o modelo acústico	33
4.4	Seção zonal de temperatura ao longo do Vórtice de Cabo Frio no dia 15 de fevereiro de 2012. As linhas vermelhas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. . .	34
4.5	Seção zonal de velocidades geostróficas (positivas e negativas) ao longo do Vórtice de Cabo Frio; configurando um giro ciclônico. As linhas vermelhas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.	34
4.6	Imagens da Temperatura Superfície do Mar em três escalas espaciais: representando a atividade de mesoescala da Corrente do Brasil, seus meandros, o vórtice e a ressurgência costeira de Cabo Frio no dia 15 de fevereiro de 2012. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto - IEAPM.	35
4.7	Imagem orbital da Temperatura da Superfície do Mar ao largo da costa brasileira e da região oceânica, no dia 15 de fevereiro de 2012. Fonte: INPE	36
4.8	a) Perfil vertical de temperatura da água com a presença do VCF; b) velocidade do som com a presença do VCF; c) perfil vertical de temperatura da água sem o VCF; e d) velocidade do som sem o VCF. As linhas vermelhas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.	37
4.9	<i>Transmission loss</i> (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.	38

- 4.10 *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 100 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação. 39
- 4.11 Diferença de *transmission loss* (TL) entre o perfil com vórtice e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 40
- 4.12 Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice simulado (70 km). 41
- 4.13 *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 42
- 4.14 *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 1500 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação. 43
- 4.15 Diferença de *transmission loss* (TL) entre o perfil com vórtice e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido a uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 44

- 4.16 Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido a uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (70 km). 45
- 4.17 Seção zonal de temperatura ao longo do vórtice de Cabo Frio do Projeto DOCAAR no dia 12 de setembro de 2012. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 47
- 4.18 a) Perfil vertical de temperatura da água com a presença do VCF; b) perfil vertical de temperatura da água sem o VCF; c) velocidade do som com a presença do VCF e; d) velocidade do som sem o VCF. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 48
- 4.19 *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico observado para um sinal emitido na frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 50
- 4.20 *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, para um sinal emitido na uma frequência de 100 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação. 51
- 4.21 Diferença de *transmission loss* entre o perfil com o vórtice observado e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 52

- 4.22 Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (30 km). 53
- 4.23 *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico observado, para um sinal emitido na uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 54
- 4.24 *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, para um sinal emitido na frequência de 1500 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação. 54
- 4.25 Diferença de *transmission loss* (TL) entre o perfil com o vórtice observado e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido na frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. 55
- 4.26 Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido na frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (30 km). 56
- 4.27 Campo sinótico horizontal de temperatura para a profundidade de 50 metros. 57
- 4.28 Campo sinótico horizontal de velocidade do som para a profundidade de 50 metros. 58
- 4.29 Variação da batimetria ao longo das seções horizontais semicirculares. . . . 59

4.30	Perfil horizontal de TL na profundidade de 50 metros para o sinal emitido na frequência de 100 Hz. O círculo vermelho representa os limites horizontais do vórtice.	61
4.31	Campo sinótico horizontal de temperatura para a profundidade de 200 metros.	62
4.32	Campo sinótico horizontal de velocidade do som para a profundidade de 200 metros.	63
4.33	Perfil horizontal de TL na profundidade de 200 metros para o sinal emitido na frequência de 100 Hz. O círculo vermelho representa os limites horizontais do vórtice.	64

Resumo

Vórtices ciclônicos de mesoescala podem causar influências significativas no campo acústico e, conseqüentemente, nas perdas na propagação do som ao longo da coluna d'água. Estas feições de mesoescala são recorrentes na região sudeste do Brasil, como o vórtice de Cabo Frio (VCF), e podem alterar a estrutura termohalina das camadas superficiais do oceano através da elevação das isopícnais e ocasionar intensos gradientes de temperatura entre o centro e as bordas. Neste trabalho, foi avaliado o efeito do intenso gradiente termohalino do VCF, através de dados reais e simulados, na propagação de sinais acústicos. Para isso, dois conjuntos de dados foram utilizados como campo inicial para o modelo acústico (Traceo): dados provenientes de um modelo hidrodinâmico (ROMS) - para simular o campo de velocidade do som - e dados coletados *in situ*. No modelo acústico foram realizadas simulações nas frequências de 100 Hz e de 1500 Hz. Para analisar as perdas na propagação através de diferentes perspectivas, os resultados foram separados em dois cenários. No cenário I, as perdas na propagação foram analisadas ao longo de um perfil vertical que atravessa o vórtice, em uma análise 2D. No Cenário II, foi realizada uma análise Nx2D, a partir de seções semi circulares horizontais nas profundidades de 50 e 200 metros, que correspondem a camada de mistura e a termoclina, respectivamente. Por fim, foram gerados mapas de probabilidade de detecção para ambos os cenários. O VCF apresentou influência na perda do sinal acústico emitido nas frequências de 100 Hz e 1500 Hz; onde o início das perdas de propagação do sinal ocorreu quando os raios acústicos encontraram a frente de temperatura, na borda do vórtice e tornaram-se ainda mais significativa a partir do centro do vórtice. O vórtice observado (proveniente de dados *in situ*) causou menores perdas na propagação de sinal (de até 120 dB) quando comparado ao

vórtice simulado (de até 160 dB). De uma maneira geral, a presença de vórtices ciclônicos causaram uma perda média de propagação de até 20 dB a mais que na ausência dessas feições, principalmente devido a refração das ondas acústicas a partir do máximo gradiente térmico. Pode-se afirmar então que os vórtices ciclônicos provenientes de modelagem numérica e de dados *in situ* influenciaram da mesma forma as perdas na propagação em uma coluna de água e as chances de um alvo submarino ser detectado; o que confirma que modelos numéricos hidrodinâmicos podem certamente ser utilizados para representar a estrutura de feições de mesoescala em experimentos acústicos.

Palavras-chave: Vórtices; Perdas de Propagação; Modelagem Acústica.

Abstract

Mesoscale cyclonic eddies may cause significant influences in the acoustic field and in the transmission loss of sound along a water column. These mesoscale features are common in the southeastern region of Brazil, such as the Cabo Frio eddy. These features change thermohaline structure of the ocean surface layers by raising the isopycnals and cause intense temperature gradients between the center and edges. The goal of this work is to study the effect of the intense thermohaline gradient of the Cabo Frio eddy, using real and simulated data, in the propagation of acoustic signals. Thus, two sets of data were used as the initial field for the acoustic model (Traceo): hydrodynamic model (ROMS) data - to simulate the sound velocity field - and *in situ* data. Several acoustic model simulations were performed for frequencies of 100 Hz and 1500 Hz, and transmission loss variations were analyzed through different perspectives (Scenarios). In the first Scenario, the transmission loss was studied along a vertical 2D profile section which crosses the eddy, while in second one was semicircular horizontal sections were performed at depths of 50 and 200 meters, which correspond to a mixed layer and a thermocline, respectively. From results, one can check that Cabo Frio eddy has influenced the acoustic signal loss in both frequencies of transmission; and the raising of transmission loss occurred when the acoustic rays encountered the temperature front at the edge of the eddy, becoming even more significant from the center of the eddy. The observed eddy has caused less transmission loss (up to 120 dB) than the simulated eddy (up to 160 dB). In general, cyclonic eddies caused an average transmission loss of 20 dB more than when it is not present, mainly due to acoustic waves refraction from the maximum thermal gradient. It can be said that eddies provenient both from numerical modeling and data *in situ*

influenced in the same way the transmission loss in a column water and the chances of a target being detected, confirming that hydrodynamic numerical models can be used to represent the structure of mesoscale features in acoustic experiments.

Keywords: Eddies; Transmission Loss; Acoustic Modeling.

1. Introdução

Os primeiros estudos relacionados a acústica submarina foram desenvolvidos para dar suporte a operações militares durante o período da Segunda Guerra Mundial, por meio do Sistema de Sonar (*Sound Navigation and Ranging*). Posteriormente, foram desenvolvidas técnicas para a previsão do alcance deste Sistema, criando cenários hipotéticos para simular e planejar novas táticas (Etter, 2013).

Ao longo dos anos, a aplicação das técnicas de acústica submarina passou também a ser amplamente utilizada no ambiente oceanográfico operacional, na indústria offshore, na navegação e também nas atividades de pesquisa. Entre as aplicações mais representativas da acústica submarina, estão: detecção, classificação e localização de objetos na coluna de água; desvio de obstáculos; navegação utilizando eco sondas para reconhecer a topografia do solo marinho; transmissão e recepção de sinais; fundeio de equipamentos oceanográficos, para mensurar o volume da coluna de água; e, de uma maneira geral, para o monitoramento acústico do ambiente marinho (Xavier, 2005; Etter, 2013).

Conforme a acústica submarina foi se tornando menos restrita e estendendo-se a diferentes áreas de aplicação, modelos numéricos passaram a ser implementados como ferramenta para a previsão do campo acústico submarino. Etter (2013) afirma que, inicialmente, os modelos utilizados eram basicamente físicos, baseados em uma representação teórica ou conceitual dos processos atuantes. Entretanto, com a evolução computacional, com o desenvolvimento de métodos matemáticos mais robustos, códigos computacionais mais refinados e com uma grande evolução nos bancos de dados, ocorreu uma gradativa transição destes modelos físicos para modelos numéricos.

Sabe-se que na acústica submarina a variável mais importante é a velocidade do som que, em média, é da ordem de 1500 m/s. Todavia, este valor apresenta variações

diretamente associadas às características da coluna de água, tais como a densidade e consequente estratificação do oceano. A densidade provém da medida da estabilidade hidrostática do meio e está relacionada à temperatura, salinidade e pressão (Fofonoff, 1985). O conhecimento destas características pode auxiliar na compreensão da variabilidade do perfil de velocidade do som no oceano (Etter, 2013), conforme observado na figura 1.1.

Usualmente, estes dados de temperatura, salinidade e pressão são obtidos por meio de coleta de dados *in situ*. Porém, esta atividade demanda recursos para a realização de cruzeiros oceanográficos, utilização de equipamentos devidamente calibrados e de alto custo de aquisição; além de que, muitas vezes, dados coletados *in situ* não conseguem capturar qualitativa e quantitativamente feições de mesoescala (Heathershaw *et al.*, 1991; Carrière *et al.*, 2010). Desta forma, modelos de previsão numérica hidrodinâmica podem ser uma vantagem em representar estruturas termohalinas de meso e larga escala em um amplo espectro temporal e espacial (Etter, 1989; Small *et al.*, 1997). A utilização de modelos numéricos hidrodinâmicos em caráter multidisciplinar só tem a acrescentar à compreensão da interação da energia sonora com o meio, o oceano.

Como consequência das variações da velocidade do som, os raios sonoros sofrem encurvamentos na direção das regiões em que a velocidade é menor; tal encurvamento é descrito matematicamente pela Lei de Snell e é justificado pelo fenômeno da refração. Numa coluna de água com uma termoclina bem definida (indicadora de diferenças significativas na densidade) as ondas acústicas sofrem efeitos diferentes, dependendo da profundidade da fonte (figura 1.2).

Na camada de mistura, a camada mais próxima da superfície, a temperatura é constante (influenciada pelas trocas de calor com a atmosfera e pela ação dos ventos e ondas), o que causa um gradiente de velocidade positivo (figura 1.2). Esta camada homogênea, também conhecida como camada sônica, pode se comportar como um duto sonoro de superfície, propagando as ondas acústicas por longas distâncias (Jones *et al.*, 2013).

Abaixo da camada de mistura encontra-se a termoclina, região da coluna de água onde a temperatura diminui rapidamente com a profundidade; esta região é caracterizada

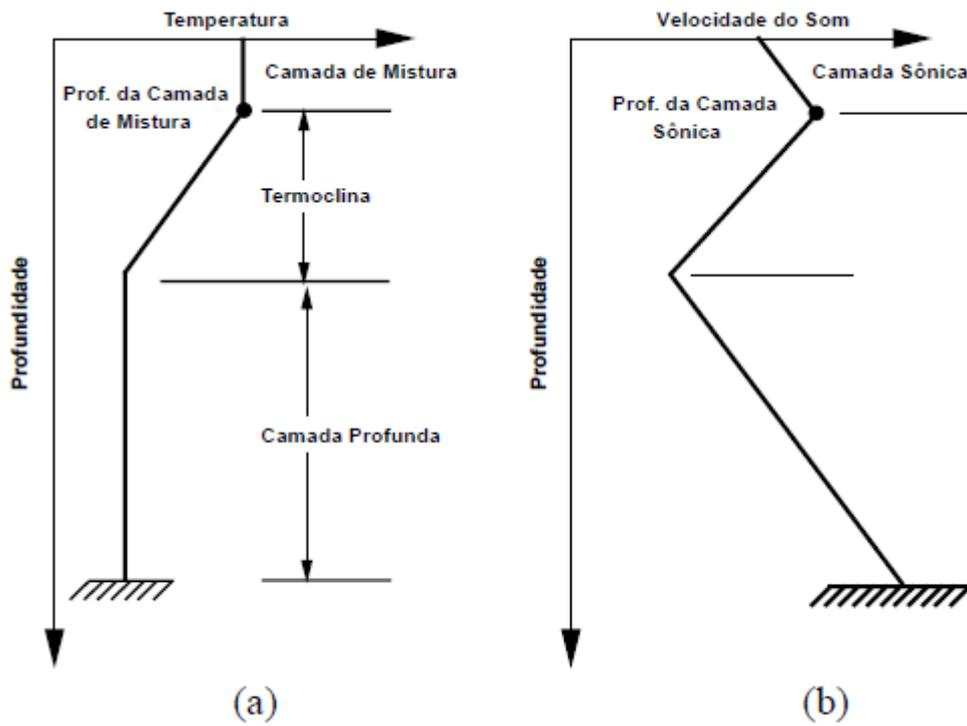


Figura 1.1: Relação entre os perfis de temperatura (a) e velocidade do som (b) para águas profundas (Xavier, 2005)

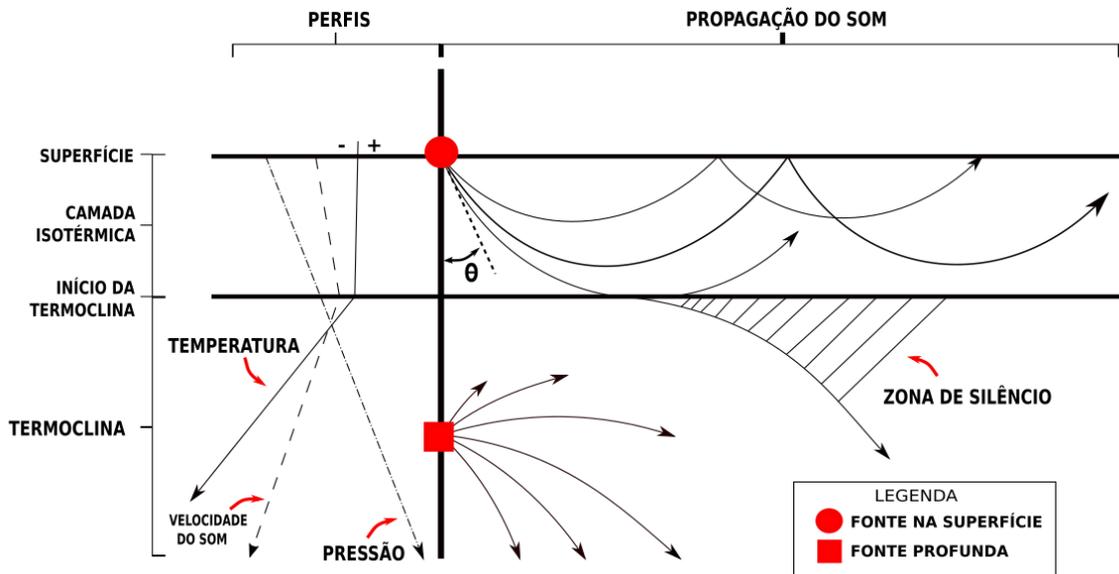


Figura 1.2: Trajetórias da onda acústica numa coluna de água, considerando duas posições para uma fonte sonora. Interessante observar que, para a fonte na superfície, a refração que os raios sonoros sofrem ao incidirem na termoclina criam uma zona de sombra. Adaptado de Miguens (2006)

por um gradiente negativo de velocidade do som. Quando um raio sonoro incide na termoclina, dependendo do ângulo de incidência, este pode ser refratado em direção à superfície ou penetrar e se dirigir a maiores profundidades. A profundidade na qual ocorre essa bifurcação do feixe sonoro é chamada de profundidade de camada, que se caracteriza pela presença de gradientes positivos ou isotérmicos, seguidos de um gradiente negativo (Miguens, 2006).

Entre estes raios que são direcionados para a superfície ou para o fundo, constata-se uma zona de silêncio (ou zona de sombra), na qual a presença de energia sonora é muito pequena (figura 1.2). Esta zona tem importância no contexto da guerra antissubmarino, já que alvos submarinos podem escapar à detecção navegando imediatamente abaixo da termoclina (Miguens, 2006). Há ainda, uma camada isothermal profunda abaixo da termoclina, onde a temperatura é constante e a velocidade do som aumenta com a profundidade (figura 1.2).

Desta maneira, na propagação acústica submarina, o sinal pode percorrer múltiplos caminhos (*multipath*) devido a estratificação do meio. Além disso, ele pode sofrer atenuações devido a alguns mecanismos de perda, como: perda por espalhamento, absorção na coluna de água, atenuação no fundo e interferências (devido ao *multipath*). A atenuação depende das propriedades físico-geoquímicas da água do mar e é um dos principais fatores que limitam o alcance da propagação em altas frequências (Jensen *et al.*, 2011). Além disso, a absorção na coluna de água também apresenta uma relação direta com a frequência, razão pela qual frequências elevadas não são utilizadas em sistemas-sonar de longo alcance (Miguens, 2006). A medida da redução na intensidade do sinal desde a fonte até o receptor, na acústica submarina, é conhecida como perda na propagação, do termo em inglês (*transmission loss*).

Esta perda de sinal pode ser potencializada quando as ondas acústicas encontram um intenso gradiente de temperatura e são refratadas, como o que ocorre na presença de frentes, vórtices e correntes (Munk, 1980; Jones *et al.*, 2013). Vórtices oceânicos de mesoescala causam uma intensa variação do ambiente acústico (Vastano & Owens, 1973); as maiores variações nas perdas de sinal ocasionadas pela presença destas feições estão

relacionadas à alteração da espessura da camada de mistura e às mudanças no gradiente de velocidade do som na termoclina (Jones *et al.*, 2013).

A influência de vórtices oceânicos de mesoescala na propagação de raios acústicos também foi observada por muitos autores (Parker, 1971; Vastano & Owens, 1973; Gemmill & Khedouri, 1974; Henrick *et al.*, 1977; Weinberg & Zabalgoeazcoa, 1977; Munk & Wunsch, 1979; Itzikowitz *et al.*, 1982; Li *et al.*, 1998; Wu *et al.*, 2001; Jian *et al.*, 2009).

Jian *et al.* (2009) avaliaram os efeitos na variação da velocidade do som induzidos por um vórtice anticiclônico no Mar do Sul da China e por três vórtices ciclônicos da Corrente do Golfo e encontraram variações na perda de sinal induzidos pelas feições mesoescala. Baer (1980) calculou a propagação do som em um vórtice ciclônico da Corrente do Golfo, com frequências de 25 Hz e 100 Hz e observou que a presença do vórtice causou diferenças significativas no campo acústico. Ren *et al.* (2012) avaliou a influência de vórtices de mesoescala na propagação acústica submarina utilizando um modelo computacional teórico forçado por um campo inicial baseado em dados (*in situ*) e observou que estes vórtices podem ocasionar perdas intensas no campo acústico, bem como o estreitamento (núcleo frio) ou aumento da camada de mistura (núcleo quente).

Em um estudo sobre as consequências das variações no campo de velocidade do som induzidas por um vórtice, e utilizando um modelo teórico de raios, Itzikowitz *et al.* (1982) observaram mudanças de amplitude e de fase em um sinal emitido, na frequência de 400 Hz e, conseqüentemente, nas perdas na propagação. Heathershaw *et al.* (1991) utilizaram um modelo de traçado de raios para estudar o efeito da frente de temperatura, ocasionada por um vórtice, nas perdas na propagação, e concluiu que estas aumentam na presença da feição e que os resultados são dependentes da localização da fonte e dos receptores.

No caso do Brasil, a ocorrência dessas feições, como o vórtice ciclônico de Cabo Frio (VCF), também pode afetar a propagação acústica; entretanto, não há estudos préteritos que avaliem a influência desta feição de mesoescala no ambiente acústico. Foram realizados apenas estudos contemplando a influência da ressurgência costeira de Cabo Frio (RCF) no campo de velocidade do som. Codato (2015) avaliou o efeito da frente

de ressurgência costeira de Cabo Frio (RCF) nas características de propagação de um sistema de sonar ativo. Os resultados indicaram que a RCF não somente diminuiu a probabilidade de detecção de alvos, como bloqueou o sinal emitido. Codato *et al.* (2013) discutiram o impacto da ressurgência costeira na localização de fontes e constataram que a RCF induz um intenso direcionamento de energia do sinal para o fundo e deteriora a coerência da energia propagante. Dessa forma, causa desvios significativos das estimativas da profundidade verdadeira.

Neste contexto, este trabalho pretende avaliar a influência da presença do VCF na propagação do som. Cabe aqui ressaltar que esta feição altera significativamente a estrutura de densidade tanto da região oceânica quanto costeira de Cabo Frio. O conhecimento de suas características intrínsecas (descritas na próxima seção) podem conferir a este trabalho um caráter singular, quando comparado a outros estudos de propagação do som em vórtices.

1.1 O Vórtice de Cabo Frio

A origem do VCF está diretamente relacionada com a Corrente do Brasil (CB), que é a corrente de contorno oeste (CCO) associada ao Giro Subtropical do Atlântico Sul. A CB se origina a partir da bifurcação da Corrente Sul Equatorial ($14,5^{\circ}\text{S}$) e flui ao largo da costa sul-americana, até a região da Convergência Subtropical (33 a 38°S) (Soutelino, 2008). Seu transporte médio é da ordem de $5-8$ Sv ao largo do sudeste brasileiro, com um aumento do transporte em direção ao sul (Müller *et al.*, 1998).

A literatura mostra que vórtices de mesoescala são mais recorrentes junto às CCO (Campos, 1995; Schmid *et al.*, 1995; Campos *et al.*, 1995; Silveira *et al.*, 2000, 2004). De fato, a CB possui essa característica de apresentar intensa atividade de mesoescala (Silveira *et al.*, 2004), o que resulta na formação e presença de meandros e vórtices recorrentes. Essas feições são principalmente observadas ao sul da Cadeia Vitória-Trindade, em três regiões: 20°S (Vórtice de Vitória, ou VV) (Schmid *et al.*, 1995), 22°S (Vórtice de Cabo de São Tomé, ou VCST) e 23°S (Vórtice de Cabo Frio, ou VCF) (Calado, 2006). Estas

feições são consideradas de mesoescala por possuírem variabilidade temporal de semanas a meses, e variabilidade espacial de dezenas a centenas de quilômetros, com dimensões da ordem de 100 a 400 km de diâmetro (Sartori Neto *et al.*, 2005).

As feições relatadas anteriormente já foram estudadas e relatadas por diversos autores (Mascarenhas *et al.*, 1971; Garfield, 1990; Campos *et al.*, 1995, 1996; Silveira *et al.*, 2000; Calado *et al.*, 2008; Fernandes *et al.*, 2009; Calado *et al.*, 2010; Palóczy *et al.*, 2014).

A partir de então, começaram a surgir hipóteses para explicar a formação e o crescimento dos vórtices da CB. Campos *et al.* (1995) relacionaram a ocorrência de meandramentos ciclônicos observados ao largo da região de Cabo Frio à mudança da orientação da linha de costa e do gradiente de topografia de fundo na região de plataforma abrupta e estreita ao norte de Cabo Frio, e extensa e suave na Bacia de Santos. Calado (2006) apontou que essas características fazem com que, ao sul de Cabo Frio, a CB se afaste da quebra da plataforma e flua inercialmente para águas mais profundas, desenvolvendo vorticidade potencial e um meandro ciclônico.

Por meio de modelagem numérica, Calado (2001) mostrou que os meandros gerados são mais sensíveis à mudança na orientação da linha de costa do que a mudanças topográficas. Assim, as mesmas razões dinâmicas também explicam o meandramento que ocorre ao norte do cabo de São Tomé (CST) (Campos *et al.*, 1995; Silveira *et al.*, 2000). Silveira *et al.* (2000) apontou que meandros ciclônicos e anti-ciclônicos se alternam em direção a bacia de Santos, como uma onda de Rossby. Como consequência, a CB apresenta fortes variações no seu padrão médio, o que foi evidenciado em estudos que avaliaram a variação da frente costeira da CB ao longo do tempo (Garfield, 1990; Silveira *et al.*, 2008; Lorenzetti *et al.*, 2009).

No entanto, esta explicação não pode ser aplicada aos meandramentos que ocorrem na região de Vitória (20°S). Calado (2006), complementando o estudo desenvolvido por Campos *et al.* (1995), concluiu que os vórtices podem ter sua origem desde 19°S, propagando-se para Sul. Concomitantemente, as feições se distribuem como um trem de ondas que engloba o VV, VCST e o VCF, onde o gatilho inicial para a ocorrência

do meandramento são presença de feições topográficas, como o Banco de Abrolhos e a Cadeia Vitória Trindade (Calado, 2006) (figura 1.3). Soutelino (2008) relatou que os meandramentos da CB podem se iniciar mais ao norte, nas proximidades do banco de Royal Charlotte (14°S) devido ao delineamento topográfico desta região.

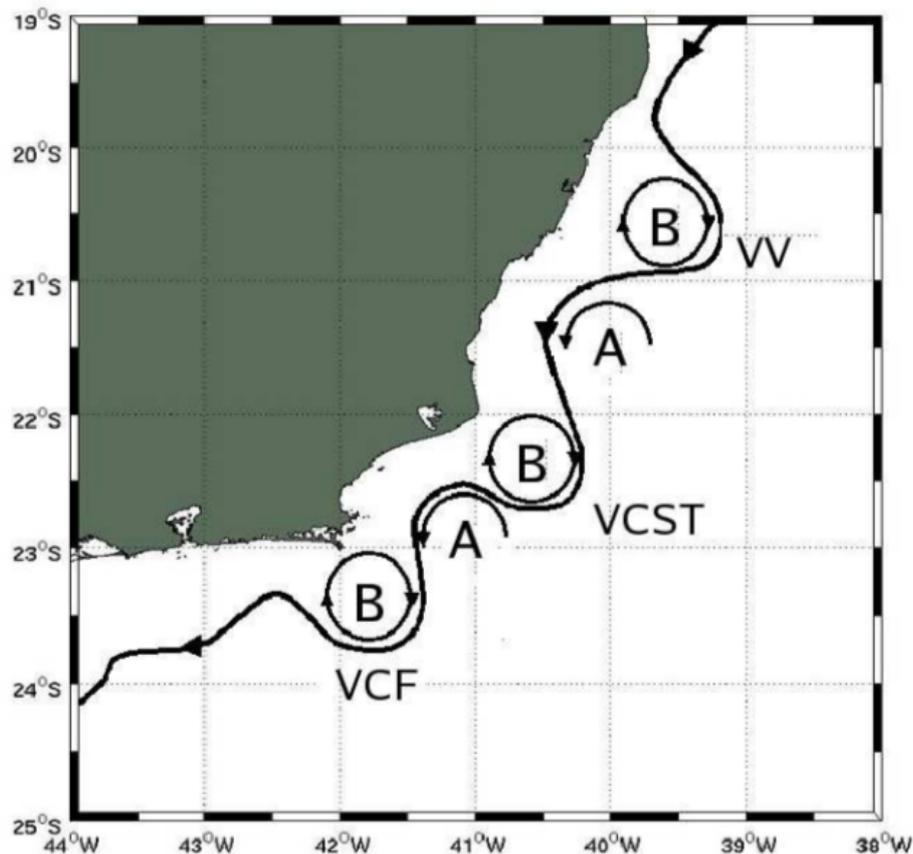


Figura 1.3: Sucessão de Vórtice ciclônicos e anticiclônicos pelo meandramento da Corrente do Brasil extraído de Calado (2006). Centros de baixa pressão (B) relacionados com meandros anticiclônicos (rotação anti-horária) e de alta pressão (A) nos meandros ciclônicos (rotação horária). As siglas VV, VCST e VCF, representam os vórtices de Vitória, Cabo de São Tomé e Cabo Frio, respectivamente.

No que se refere às dimensões do VCF, a literatura mostra que seu crescimento está associado à instabilidade baroclínica (Silveira *et al.*, 2004, 2008; Calado, 2001; Mano *et al.*, 2009). Essa instabilidade está estritamente relacionada com o cisalhamento vertical entre a CB e a Corrente de Contorno de Intermediária (CCI) (Calado *et al.*, 2008; Silveira *et al.*, 2008), onde a primeira flui para sudoeste enquanto a segunda flui para norte, subjacente a CB. Este processo resulta em ondas baroclínicas da CB e da CCI interagindo fora de fase, contribuindo para a evolução e crescimento dos meandramentos da CB e,

consequentemente, para a origem dos vórtices de mesoescala (Calado *et al.*, 2008).

Mais especificamente sobre o VCF, o meandramento da CB ocasiona a formação de um vórtice ciclônico, com rotação horária e núcleo frio (Campos *et al.*, 2000). Além disto, caracteriza-se por dimensão horizontal aproximada de 100km (Campos *et al.*, 1996), tende a ser estacionário (Rocha *et al.*, 2014) e com dimensão vertical da ordem de 500 metros (Soutelino *et al.*, 2013). No que tange à velocidade das correntes, a literatura mostra que seus valores são da ordem de 0,7 m/s nas bordas mais costeiras e mais amarradas (Signorini, 1978; Campos *et al.*, 1995; Silveira *et al.*, 2004).

Vórtices de núcleo frio como o VCF, podem alterar a estrutura termohalina das camadas superficiais do oceano através da elevação das isopicnais. Isto pode resultar em mudanças significativas na propagação do som em regiões com recorrente presença dessas feições e, consequentemente, na propagação acústica submarina, conforme já observado por diversos autores em outros vórtices oceânicos (Munk & Wunsch, 1979; Vastano & Owens, 1973; Lü *et al.*, 2006; Weinberg & Zabalgoeazcoa, 1977; Ren *et al.*, 2012; Parker, 1971).

2. Objetivos

2.1 Geral

Avaliar os efeitos do intenso gradiente termohalino de um vórtice ciclônico de mesoescala, através de dados reais e simulado, na propagação de sinais acústicos.

2.2 Específicos

Como objetivos específicos, pretende-se:

- Caracterizar o cenário realístico de um vórtice ciclônico através dos dados de saída de um modelo hidrodinâmico e de dados observacionais;
- Verificar o efeito do intenso gradiente de temperatura do vórtice ciclônico simulado nas perdas na propagação do som; e
- Verificar o efeito de um vórtice ciclônico observado nas perdas na propagação do som (obtido através de dados *in situ*).

3. Metodologia

Este trabalho avalia a influência de um vórtice ciclônico na propagação de um sinal acústico por meio de um modelo de traçado de raios. Para a realização destas simulações, foi escolhido o Vórtice de Cabo Frio (VCF), feição de mesoescala formada a partir do meandramento da Corrente do Brasil (CB).

Para representar realisticamente a estrutura termohalina do VCF foram utilizados os dados de saída de simulações com um modelo numérico hidrodinâmico, o *ROMS* (*Regional Ocean Modeling System*). A base destas simulações foi a técnica de Modelos Regionais Orientados por Feições (MROF). Também foram utilizados dados de temperatura da água do mar coletados *in situ*, que serão descritos ao longo deste capítulo.

Ressalta-se aqui que os campos termohalinos não foram simulados ou coletados no escopo deste trabalho. Atribui-se os devidos créditos aos seguintes projetos:

- Rede de Modelagem Oceanográfica (REMO), por meio do qual foram realizadas as simulações no modelo numérico hidrodinâmico ROMS. Este projeto objetivou simulações realísticas da CB, em caráter sinótico, representando adequadamente o caminho da Corrente e de seus meandros e vórtices; e

- Dados Oceanográficos com Aeronave de Asa Rotativa (DOCAAR), através do qual foram obtidos os dados *in situ* de temperatura.

A figura 3.1 apresenta as etapas descritas nesta metodologia, desde os dados de entrada (campos termohalinos provenientes de modelagem numérica e de dados coletados *in situ*), método aplicado para a conversão do campo termohalino em campo de velocidade do som, os modelos utilizados (*ROMS* e *TRACEO*), até os resultados encontrados.

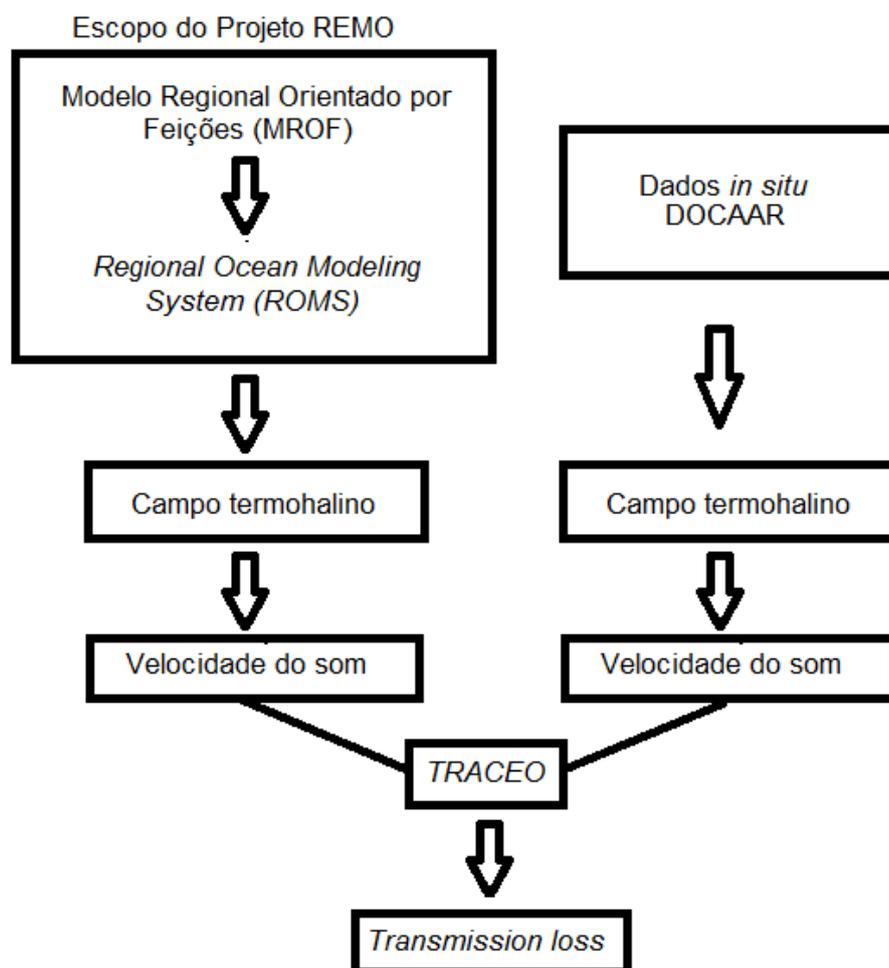


Figura 3.1: Representação esquemática da entrada de dados, dos métodos aplicados neste trabalho e dos resultados.

3.1 O Modelo Regional Orientado por Feições

O Modelo Regional Orientado por Feições (MROF) utiliza o conhecimento prévio de feições oceanográficas (através de dados sinóticos *in situ* e de satélites) para construir modelos tridimensionais de feições, com base em uma abordagem paramétrica - também chamado de modelos de feição (MF).

Esta técnica foi descrita pela primeira vez por Robinson *et al.* (1988) e pode ser considerada uma maneira realística de simular a estrutura termohalina oceânica na falta de dados reais. A partir de então, esta metodologia passou a ser utilizada por outros autores (Fox, 1992; Gangopadhyay *et al.*, 1997; Robinson, 1999) na previsão e assimilação de dados, principalmente para o Atlântico Norte ocidental.

Para este trabalho, o objetivo do MROF foi representar, com acurácia, os cenários

sinóticos da Corrente do Brasil, seus meandros e vórtices associados. Para o sudeste brasileiro, esta técnica foi descrita por Gangopadhyay & Robinson (2002), e aperfeiçoada por Calado *et al.* (2008). Estes autores elaboraram um protocolo para simulações baseadas na técnica MROF. A primeira etapa consistiu na identificação das feições, a elaboração dos MFs individuais, seja para CB ou para os vórtices, e a construção de uma grade tridimensional, conforme apresentado na figura 3.2.

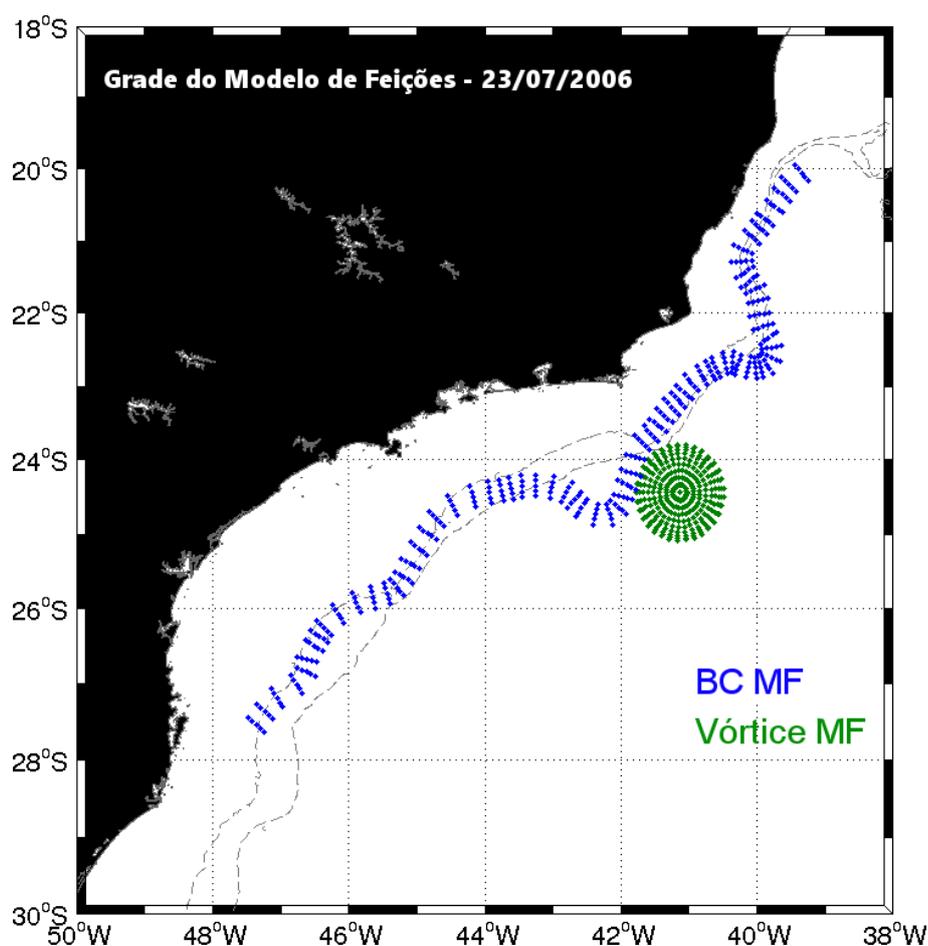


Figura 3.2: Grade do Modelo de Feições para a Corrente do Brasil e com o anticiclone associado. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM.

Para a CB, a grade do modelo foi construída de forma a coincidir exatamente com o seu caminho previamente identificado. O eixo 'x' é perpendicular a costa e o eixo 'y' é na direção do caminho da CB. O vórtice foi parametrizado utilizando o MF da CB, a partir da evolução de um meandro. A grade do vórtice foi construída de acordo com sua posição e seu diâmetro, onde o eixo 'x' representa as seções radiais e o 'y' significa a posição das seções angulares.

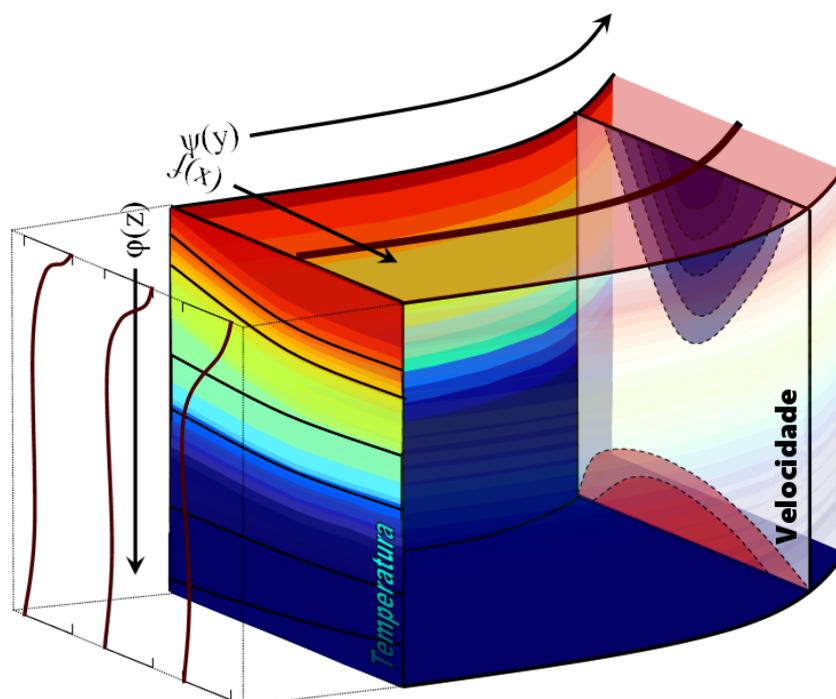


Figura 3.3: Esquema de construção do modelo de feições. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM.

A técnica da construção do MF está ilustrada na figura 3.3. Após o ajuste da grade tridimensional, foram utilizadas três funções paramétricas para construir o MF. A primeira é o $\varphi(z)$, e representa três perfis adimensionais baseados em informações passadas de temperatura e salinidade: T-S costeiro, T-S central e T-S oceânico. Destas, a T-S oceânico foi ajustada de modo que representasse os campos climatológicos de julho do *World Ocean Atlas 2005 (WOA'05)* (Locarnini *et al.*, 2006) em Análises Objetivas posteriores. As outras duas funções são chamadas funções de transferência, onde o $f(x)$ foi ajustado para ser linear e o $\Psi(y)$ uma constante.

Desta maneira, o MF permite construir a estrutura tridimensional da corrente, com base em qualquer distribuição horizontal de traçador na superfície, usando a seguinte relação:

$$T_i(z) = [T_{i_s} - T_{i_b}]\varphi_i(z) + T_{i_b} \quad (3.1)$$

Onde o índice i denota a posição da seção no MF, e os subíndices s e b referem-se ao valor de superfície e de fundo do traçador hidrográfico (temperatura e salinidade, por exemplo).

Nesta etapa, o MF da CB e do vórtice são mesclados com a climatologia, neste caso, de Julho do *WOA '05* (Locarnini *et al.*, 2006) através de um esquema de análise objetiva de múltipla escala (Calado *et al.*, 2006, 2008). Esta estrutura, então, foi redimensionada, utilizando uma imagem de satélite de temperatura da superfície do mar (TSM) de forma a resultar em um campo termohalino tridimensional, aninhado com as feições observadas.

Este campo termohalino inclui os modelos de feições individuais, a climatologia e os dados satelitais, transformando-se no MROF propriamente dito. Este atua como condições iniciais termohalinas para o ROMS, que efetuará a evolução deste campo, produzindo a interação dinâmica entre a corrente do Brasil e seus vórtices (Fig. 3.4). Para maiores detalhes, Calado *et al.* (2008).

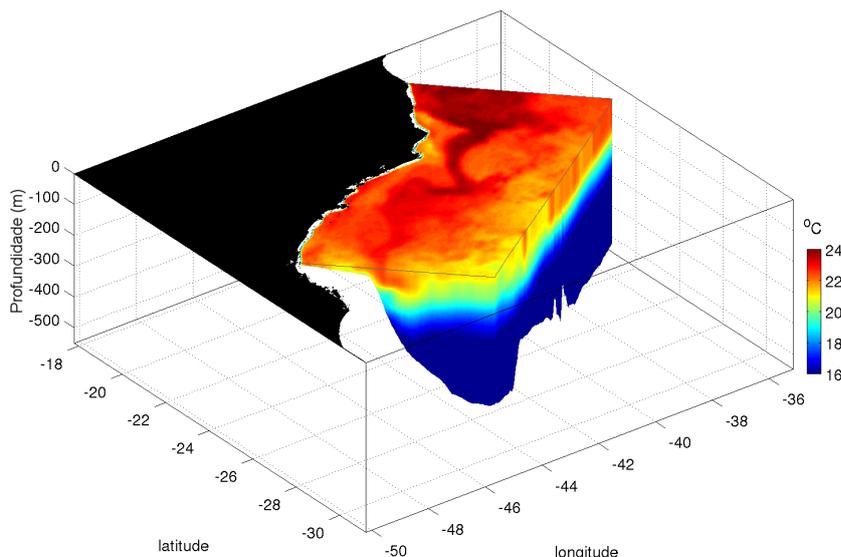


Figura 3.4: Campo inicial de temperatura após análises objetivas e redimensionalização utilizando dados orbitais de TSM para níveis sigma acima de 550 m. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM.

3.2 O Modelo Numérico Hidrodinâmico

A caracterização do gradiente termohalino do Vórtice de Cabo Frio foi feita através do modelo *ROMS* (Regional Ocean Modeling System), desenvolvido pelo Instituto de Ciências Marinhas e Costeiras da Universidade de Rutgers e pelo Instituto de Geofísica e Física Planetária de Los Angeles.

Este modelo foi utilizado por incluir algoritmos físicos e numéricos robustos que garantem a resolução das dinâmicas de mesoescala oceânica e costeira, sendo capaz de representar, com eficiência, a Corrente do Brasil e seus meandros. Estes algoritmos são detalhadamente descritos por Shchepetkin & McWilliams (2005) e Moore *et al.* (2004).

O *ROMS* é um modelo tridimensional, de superfície livre, que resolve o sistema no plano horizontal, por meio de coordenadas ortogonais curvilíneas, permitindo uma representação eficiente em regiões de alteração abrupta do gradiente de topografia, como a quebra da plataforma continental e o talude (Shchepetkin & McWilliams, 2005). Isto se deve, principalmente, à resolução das equações hidrostáticas primitivas da dinâmica de fluidos ser feita através de um sistema de coordenadas estiradas 'S' na vertical (Song & Haidvogel, 1994). Neste sistema as coordenadas verticais acompanham a variação da topografia do terreno submarino, permitindo um refinamento do relevo marinho, princi-

palmente, nas regiões onde ocorrem variações abruptas na topografia.

Além disso, o *ROMS* permite alterar a resolução vertical da cada camada sigma, através do ajuste da espessura e do número de camadas de acordo com a região de interesse; como na superfície e no fundo da camada de Ekman e na termoclina (Shchepetkin & McWilliams, 2005).

Dessa forma, o *ROMS* apresenta-se como o modelo ideal para representar a Corrente do Brasil - que flui nas proximidades da quebra de plataforma e tem, inclusive, seu meandramento influenciado pela mudança abrupta de batimetria - e o Vórtice de Cabo Frio - que é formado a partir do meandramento da CB e apresenta assimetria lateral em função da proximidade da quebra do talude.

Os experimentos numéricos no *ROMS* foram conduzidos em uma grade regular de 172 pontos de grade dispostos horizontal e verticalmente e 40 níveis sigma, com resolução de aproximadamente 4.4 km (figura 3.5). A grade abrange a região limitada por 19°S, 29°S, 48.5°W e 37.8°W, e possui uma inclinação de aproximadamente 45°, seguindo a orientação da linha de costa (figura 3.5). O domínio do modelo foi construído utilizando uma topografia submarina realística extraída do conjunto de dados do ETOPO-1. O ETOPO-1 é um modelo de relevo global desenvolvido pelo National Geophysical Data Center (NGDC) do National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) com, aproximadamente, 2km de resolução. Este banco de dados de relevo é gerado a partir do conjunto de diversos outros bancos de dados digitais com cobertura regional e global (Amante & Eakins, 2009).

O *ROMS* foi inicializado com o MROF do dia 15 de fevereiro de 2012 para representar realisticamente o Vórtice de Cabo Frio nos experimentos acústicos. Este dia foi selecionado a partir da análise dos dados de saída de temperatura da superfície do mar do *ROMS*, onde o VCF mostrava-se perfeitamente formado, interagindo com o processo de ressurgência costeira e advectando águas mais frias para o seu interior.

Para fins de caracterização da estrutura do VCF, foi realizada a análise da variação da temperatura e da velocidade na superfície do mar, da temperatura e da velocidade ao

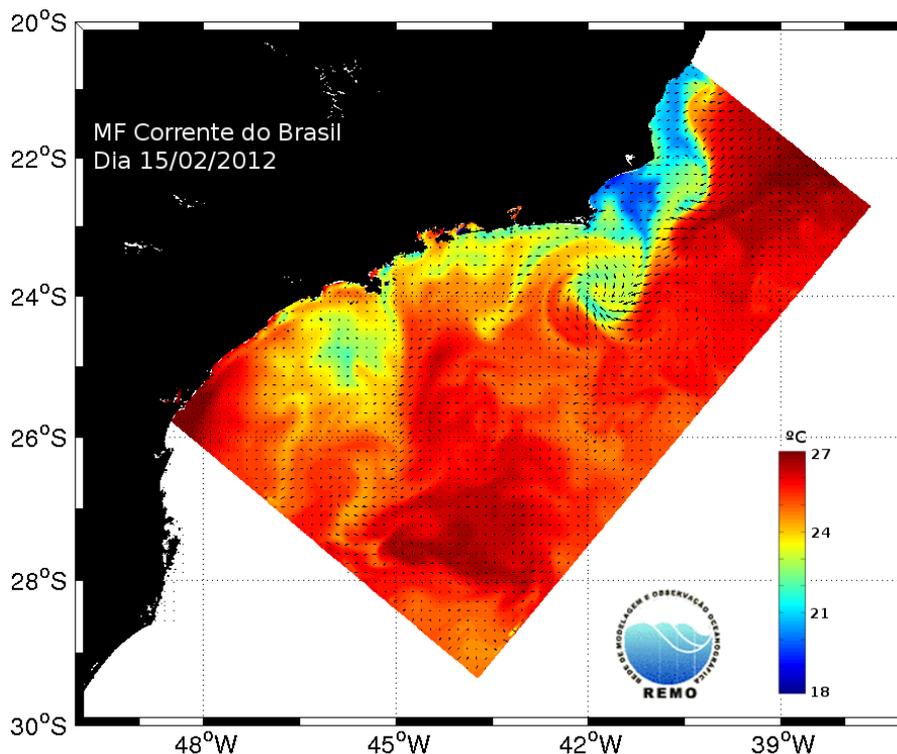


Figura 3.5: Grade utilizada nos experimentos numéricos, evidenciando resultados de saída de modelos numéricos referentes ao projeto REMO como: temperatura da superfície do mar, intensidade de direção dos vetores de velocidade, escala de vento e a formação de um vórtice de mesoescala. Fonte: Projeto REMO - IEAPM.

longo da coluna de água e da elevação da superfície do mar.

A partir dos dados de saída do modelo *ROMS* foi criado o campo termohalino, compreendo as variações horizontais e verticais de temperatura na área de abrangência do Vórtice de Cabo Frio.

3.3 Campo de Velocidade do Som

Para a inicialização do modelo acústico, o campo termohalino previsto pelo modelo numérico hidrodinâmico foi convertido em um campo de velocidade do som (c), através do algoritmo da UNESCO 1983 (Fofonoff & Millard, 1983). Este campo de velocidade do som (c) é expresso como uma função empírica de três variáveis independentes: temperatura (T), salinidade (S) e profundidade (z) (equação 3.2).

$$c = 1449.2 + 4.6T - 0.055T^2 + 0.00029T^3 + (1.34 - 0.01T)(S - 35) + 0.016z \quad (3.2)$$

Por meio da equação acima, percebe-se que a temperatura é a variável determinante na variação da velocidade do som. Neste trabalho, o campo termohalino utilizado para o cálculo da velocidade do som foi simulado pelo modelo *ROMS*. Para a salinidade foi utilizado um valor constante de 35, visto que o efeito da salinidade é pequeno devido à sua baixa variação na região oceânica. A pressão foi definida pela profundidade, já que são variáveis diretamente proporcionais.

Para que o campo de velocidade do som fosse utilizado como entrada para o modelo acústico, os dados foram convenientemente transformados de coordenadas 'S' para coordenadas 'z'. No sistema de coordenadas z, todas as camadas têm a mesma espessura e são dispostas por profundidades. Sendo assim, regiões mais profundas apresentam um maior número de camadas z que regiões mais rasas; dessa forma, este sistema é mais adequado para modelagem de regiões profundas.

Na sequência, o campo de velocidade do som foi interpolado em uma grade apropriada para a modelagem acústica: 10 metros verticalmente e 320 metros horizontalmente. Este espaçamento foi escolhido de modo que permitisse ao modelo acústico o correto cálculo da propagação do som ao longo dos gradientes de temperatura existentes; outrossim, permitiu uma maior eficiência computacional.

3.4 Dados Oceanográficos do Projeto DOCAAR

Para testar a viabilidade da utilização da modelagem oceanográfica para a previsão do campo acústico, também foram realizadas simulações de propagação acústica ao longo de um vórtice ciclônico observado. Para isso, foram utilizados dados oceanográficos coletados *in situ*, no âmbito do Projeto DOCAAR (Dados Oceanográficos com Aeronave de Asa Rotativa) (Paula & Calado, 2008). É importante ressaltar que o vórtice simulado

e o vórtice observado não são referentes ao mesmo dia, mas correspondem à mesma feição de mesoescala, o vórtice ciclônico de Cabo Frio.

A campanha do Projeto DOCAAR, realizada no dia 22 de setembro de 2012, teve como objetivo coletar perfis verticais de temperatura de feições oceanográficas, associadas à Corrente do Brasil, ao largo de Cabo Frio. Para isso, foram utilizados batitermógrafos descartáveis (XBT), lançados por meio de aeronaves de asa rotativa em feições já previamente identificadas em imagens de satélite. A metodologia de coleta de dados por meio de aeronaves se mostrou bastante eficaz, pois permitiu a amostragem rápida de feições oceanográficas, o que não seria possível com o uso de navios (Soutelino *et al.*, 2013).

O Grupo de Sensoriamento Remoto do IEAPM realizou um monitoramento do VCF a partir de dados horários processados pelo *European Organization for the Exploitation of Meteorological Satellites* (EUMETSAT) até que o mesmo fosse identificado no dia 15 de setembro de 2012. Considerando a necessidade de amostrá-lo em tempo hábil, foi definida uma comissão oceanográfica de lançamento de XBT dos tipos T5 (1830 m) e T10 (200 m), utilizando um helicóptero UH-14 Super Puma (Pegasus 74) da Base Aérea Naval de São Pedro da Aldeia (BAENSPA). O plano de amostragem do vórtice objetivou realizar amostragens a cada 15 mn ao longo de 6 estações, totalizando 105mn (figura 3.6).

A estação 6, que se localiza em $24^{\circ}34,12'S$ e $042^{\circ}17,80'W$ (figura 3.6), foi descartada pois o fio de cobre do XBT encostou na aeronave (Soutelino *et al.*, 2013). Para as estações 2, 3, 4 e 5, foi realizado o seguinte processamento dos dados: i) desconsiderar dados de temperatura inferiores a $2^{\circ}C$, pois a profundidade máxima de coleta com o XBT (1800 m) não permite observar valores dessa magnitude; e ii) aplicação de um filtro por janela móvel do tipo *Hanning*, seguindo os mesmos procedimentos descritos em Soutelino (2008). A figura 3.7 mostra como os dados de cada estação de coleta ficaram após a retirada dos dados espúrios e da aplicação da filtragem.

Os dados foram interpolados de modo que pudessem ser utilizados como dados de entrada no modelo de propagação acústica. Para isso, foi criada uma grade regular de 10 m de profundidade por 400 metros de extensão horizontal, e os dados foram interpolados pelo método linear.

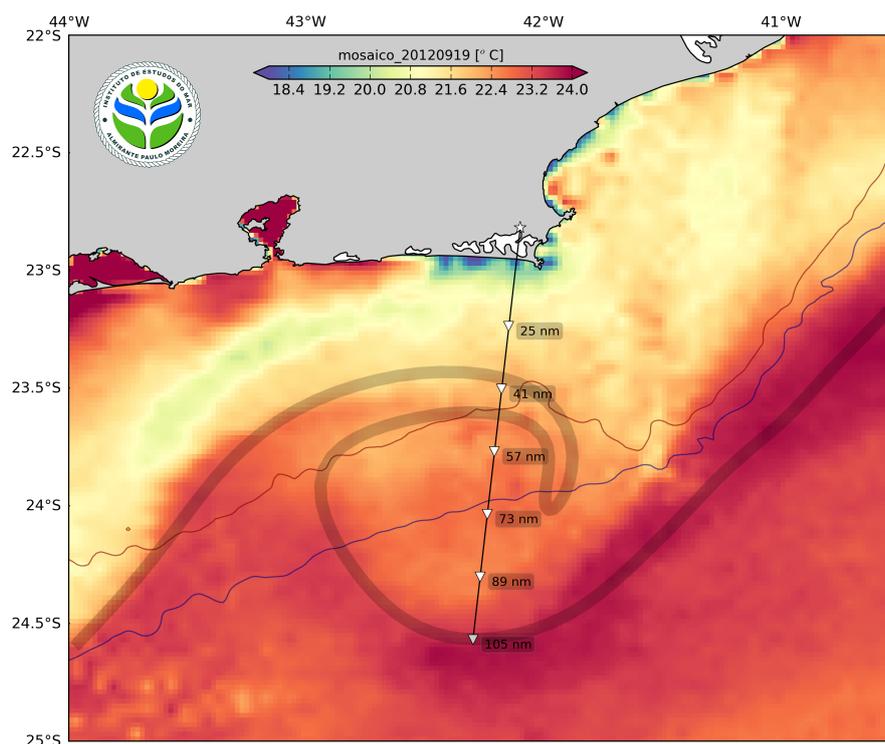


Figura 3.6: Imagem da Temperatura da Superfície do Mar evidenciando a presença do vórtice de Cabo Frio durante a campanha do Projeto DOCAAR. A trajetória editada em cinza é uma interpretação qualitativa da assinatura térmica frontal do vórtice. Fonte: Soutelino *et al.* (2013).

Por fim, o campo termohalino proveniente destes dados *in situ* e devidamente tratados, foi convertido para um campo de velocidade do som, obedecendo o mesmo procedimento aplicado aos dados provenientes de modelagem numérica.

3.5 O Modelo de Propagação Acústica

A propagação do som ao longo do gradiente termohalino do Vórtice de Cabo Frio foi obtida por meio do *TRACEO Acoustic Raytracing Model*, desenvolvido pelo *Signal Processing Laboratory* (SIPLAB), na Universidade de Algarve (Ey & Rodriguez, 2012).

O *TRACEO* é um modelo de traçado de raios 2D, que suporta superfícies irregulares e batimetrias complexas, com propriedades *range-dependent*; perfis e campos de velocidade do som *range-dependent* e *range-independent*; a inclusão de objetos, como possíveis alvos submarinos; e o livre posicionamento da fonte e dos receptores. As opções

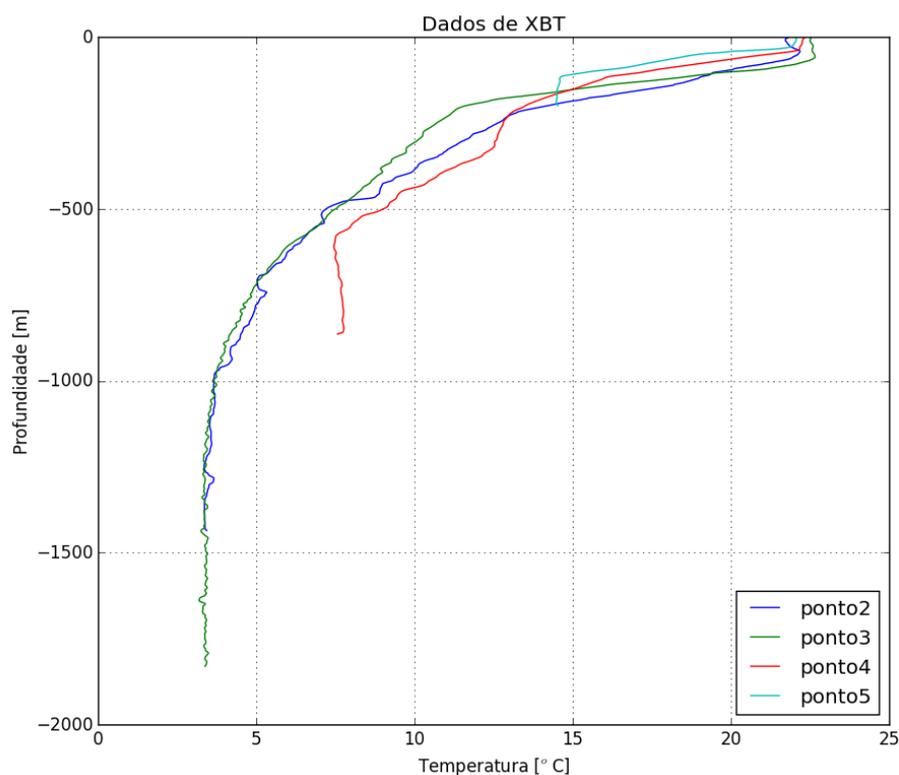


Figura 3.7: Perfis de dados XBT (temperatura e profundidade) coletados durante o Projeto DOCAAR correspondentes a cada um dos pontos de amostragem do vórtice ciclônico observado.

de dados de saída incluem as coordenadas dos raios, *Eigenrays*, Amplitudes e chegadas (*Arrivals*), Pressão Acústica; Perda de Sinal e Velocidade da Partícula (Ey & Rodriguez, 2012). Um diferencial do TRACEO em relação à outros modelos de Traçado de Raios é a possibilidade de calcular os raios que retornam, ou seja, ou raios que são refletidos ou refratados em direção à fonte.

Uma representação esquemática das principais configurações aplicadas no *TRACEO* é apresentada na figura 3.8. Para a inicialização do modelo acústico foi utilizado um campo inicial de velocidade do som (descrito na seção anterior), um campo batimétrico e um conjunto de propriedades geoacústicas. O campo batimétrico aplicado no *TRACEO* foi o mesmo utilizado na implementação do *ROMS*, o ETOPO-1. As propriedades geoacústicas utilizadas foram baseados em um estudo realizado por Simoes *et al.* (2012), que investigou as características geoacústicas da região. Considerando areia muito fina e areia fina como os tipos de sedimento mais representativo da região, foram utilizados valores de densidade do sedimento de $1,8 \text{ g/cm}^3$ e velocidade compressional do som de 1626 m/s . O

valor de atenuação de fundo foi baseado no estudo de Hamilton (1980 cite), apresentando valores de $0,5 \text{ dB}/\lambda$ para a granulometria areia.

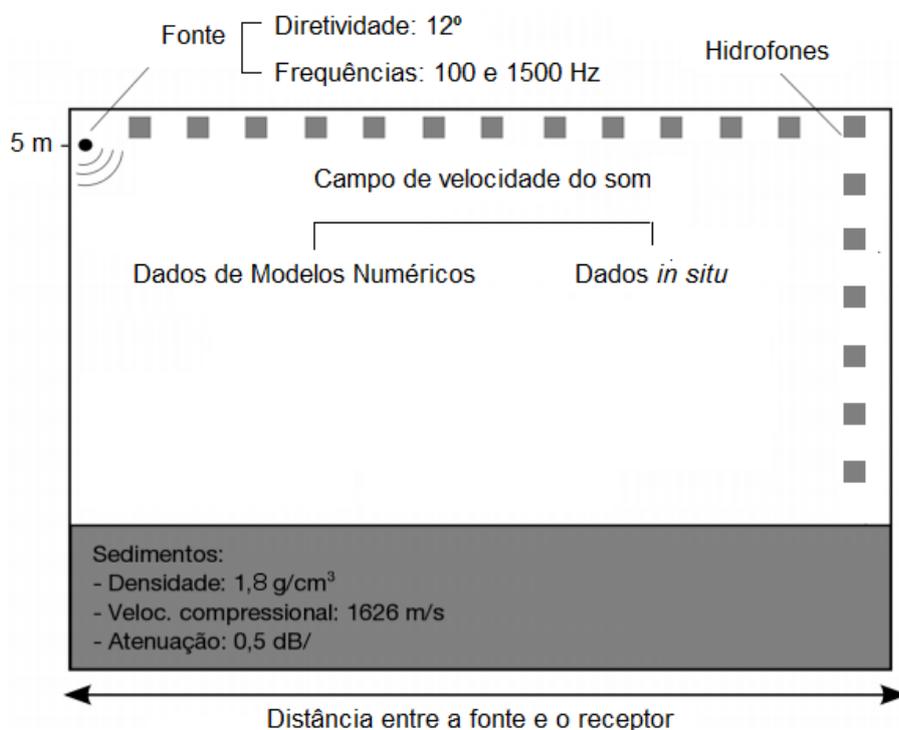


Figura 3.8: Representação das principais configurações do modelo acústico: posição da fonte, diretividade dos raios emitidos pela fonte, frequências de emissão do sinal acústico, hidrofones, os campos iniciais de velocidade do som e as características do fundo marinho. É importante salientar que os hidrofones estão dispostos ao longo de toda a seção, em uma grade de 201 linhas e 501 colunas. Adaptado de Codato (2015).

A fonte sonora foi posicionada no início da seção, a uma profundidade de 5 metros. A diretividade desta fonte foi de 12° , com um total de 1001 raios emitidos. Ao longo do perfil, 501 hidrofones foram posicionados horizontalmente e 201 verticalmente. Na tentativa de avaliar se o alcance do sinal poderia causar diferenças substanciais na previsão acústica, foram utilizadas duas frequências: 100 Hz e 1500 Hz. Optou-se pela escolha de uma baixa frequência (100 Hz) devido ao fato do vórtice ser uma feição de mesoescala de, aproximadamente, 100 km. Nesse caso, o sinal emitido sofreria menor atenuação ao longo de sua propagação. É importante ressaltar que a utilização desta frequência não caracteriza um transdutor real, e sua escolha teve finalidade unicamente acadêmica. Já a frequência de 1500 Hz foi aplicada por ser comumente utilizada em sistemas sonares.

Ainda em relação às configurações do modelo acústico, um parâmetro bastante

importante para modelos de traçado de raios é o passo do raio (*raystep*). De acordo com Rodriguez (2011), estes modelos utilizam a equação da eikonal para calcular a trajetória do raio, em discretização espacial. Ou seja, em uma distância x , o modelo calcula o ponto no espaço r (distância horizontal) e z (distância vertical) que o raio está; esta distância x é o passo do raio. Foi observado que melhores resultados são alcançados quando o *raystep* é diminuído. Segundo Porter (2011), o campo de velocidade do som e as frequências utilizadas determinam o tamanho ideal do *raystep*. Como o modelo TRACEO não calcula automaticamente o *raystep* que melhor se ajusta ao dado, este cálculo foi feito através de outro modelo de Traçado de raios, o Bellhop (Porter, 2011); onde foi encontrado um *raystep* ideal de 236,52 metros.

A influência do intenso gradiente de temperatura do vórtice ciclônico de Cabo Frio na propagação acústica foi analisada em termos de perdas na propagação do som, do termo em inglês *transmission loss* (TL). A TL representa o enfraquecimento da energia sonora ao longo da sua trajetória, devido à divergência geométrica e pelos diversos mecanismos de atenuação. É expressa em unidades de decibéis (dB) (Xavier, 2005):

$$TL = -10 \log_{10} \frac{I}{I_{ref}} \quad (3.3)$$

Onde I é a intensidade acústica medida em um ponto distante e I_{ref} é a intensidade de referência medida a um metro da fonte.

O TL é um dos termos integrantes da equação sonar, que apresenta a forma esquemática descrita a seguir:

$$[Sinal - Ruido + Ganho] > DT \quad (3.4)$$

Onde as variáveis do lado esquerdo são uma combinação de vários parâmetros (representados em unidades decibéis) e DT corresponde ao limiar de detecção (*Detection Threshold*). O valor excedente do lado esquerdo da equação 3.4 é conhecido como o Excesso de Sinal – *Signal Excess* (SE) – ou nível em que o sinal se sobressai acima do ruído, para que haja detecção. Para o caso de sonares ativos, o SE apresenta seguinte equação:

$$SE(FM, r, z_r | z_s) = FM - 2TL(r, z_r | z_s) \quad (3.5)$$

Onde a FM (Figura de Mérito) do sonar representa a perda na propagação máxima permitida em nos dois sentidos (sonares ativos) (Etter, 2013). Nessa mesma equação, os valores de TL são previstos pelo *TRACEO* e dependem da profundidade da fonte (z_s), da profundidade do receptor (z_r) e da distância entre eles (r).

O FM para sonares ativos está apresentada na equação 3.6 e leva em consideração os seguintes parâmetros: nível de sinal da fonte (*Source Level* ou SL), o poder de reflexão do alvo (*Target Strength* ou TS), o nível de ruído (*Noise Level* ou NL), o índice de diretividade do *array* de hidrofones (*Receiving Directivity Index* ou DI), e o limiar de detecção (*Detection Threshold* ou DT) (Etter, 2013).

$$FM = SL + TS - NL + DI - DT \quad (3.6)$$

Considerando as equações 3.4 e 3.5, verifica-se que, com severas perdas na propagação (altos valores de TL), há diminuição do excesso de sinal e, conseqüentemente, das chances de um alvo ser detectado. A avaliação dessas perdas tem importância principalmente quando aplicada a operações militares, na proteção de áreas focais como portos, bases navais, plataformas *offshore* e na guerra antissubmarino.

As equações acima foram aplicadas considerando dois cenários hipotéticos de sistema de sonar:

i) Um sistema ativo 2D (que será descrito na seção 3.6), onde foram realizadas simulações acústicas a partir das seções verticais de TL, ao longo do vórtice de Cabo Frio e em perfis médios (sem a feição de mesoescala, equação 3.7). A fonte sonora (simbolizando o casco de uma embarcação) foi posicionada no início da seção, a 5 metros de profundidade, e os receptores ao longo de todo o perfil. Para a comparação de metodologias, nesse cenário também foram utilizados dados *in situ*; e

ii) Um sistema ativo Nx2D (que será descrito na seção 3.7), onde foram realizadas

simulações acústicas em profundidades específicas, a partir de seções horizontais semicirculares de TL. A fonte sonora (simbolizando o casco de uma embarcação) foi posicionada a uma profundidade de 5 metros e os receptores ao longo de toda área compreendida por um raio de até 160 km.

3.6 Cenário I

Para este cenário, foram conduzidos 8 experimentos, conforme esquematizado na figura 3.9. Os experimentos foram separados em dois grupos:

i) Simulações realizadas em um campo termohalino proveniente de resultados de previsão oceanográfica e;

ii) Simulações realizadas em um campo termohalino proveniente de dados oceanográficos coletados *in situ*.

A partir destes dois conjuntos de dados, foram criados perfis representativos do vórtice e perfis médios, que correspondem à ausência da feição de mesoescala. Os perfis médios foram obtidos considerando a seguinte equação:

$$V_s = \frac{\sum_{i=1}^n v_{j,i}}{n} \quad (3.7)$$

Onde $v_{j,i}$ representa a velocidade do som em um ponto da matriz de dados, i indica dados horizontais de velocidade do som, n representa o número total de dados horizontais e j indica dados verticais de velocidade do som. Por fim, o perfil médio será um perfil único formado pela média V_s calculada para cada linha de dado, ou seja, $j = 1, 2, 3...N$.

Para cada um dos experimentos conduzidos foram analisados:

i) Os campos termohalinos;

ii) As variações na velocidade do som;

iii) As perdas na propagação para simulações acústicas nas frequências de 100 e 1500 Hz;

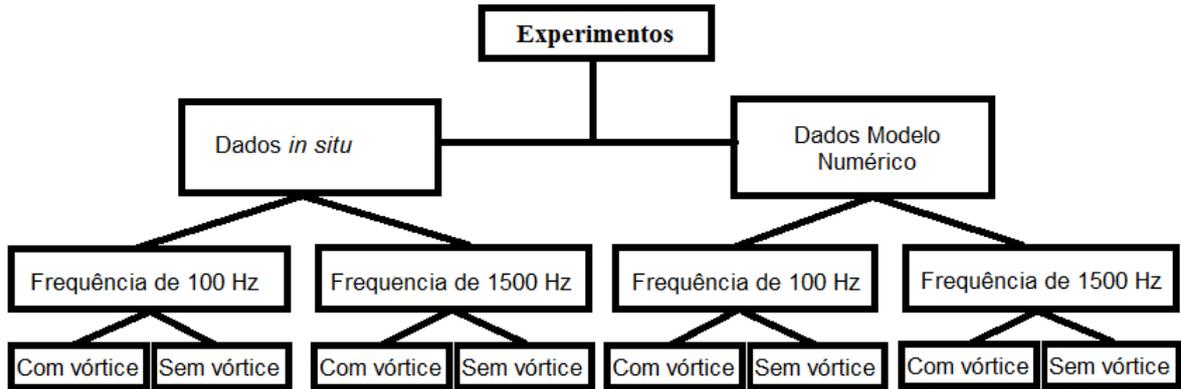


Figura 3.9: Representação esquemática dos experimentos acústicos realizados ao longo de dois conjunto de dados, utilizando duas frequências e em situações com a presença ou não do vórtice ciclônico.

iv) A diferença das perdas na propagação (TL_{dif}) entre os perfis com vórtice e sem vórtice. Para isso foi utilizada a equação 3.8, onde r indica a distância e z a profundidade;

$$TL_{dif}(r, z) = \sqrt{TL_{sv}(r, z)^2 - TL_{cv}(r, z)^2} \quad (3.8)$$

v) A variação média do TL ao longo da coluna de água.

3.7 Cenário II

Após a realização dos experimentos descritos na seção anterior, surgiu o interesse de se verificar como o campo de TL se comporta horizontalmente, em função da distribuição espacial da temperatura e da localização do vórtice. A maior parte dos modelos acústicos (como o TRACEO) utilizam uma metodologia 2D (Etter, 2013). Entretanto, vórtices oceânicos são feições com características tridimensionais, ou seja, com uma variação de suas propriedades físicas com a distância latitudinal, longitudinal e com a profundidade (Buckingham, 1992).

Considerando as características 2D do modelo acústico utilizado, foi adotada uma abordagem denominada por Buckingham (1992) como 'Nx2D'. Segundo este autor, esses modelos são uma soma de modelos 2D, aplicados a N variações de ângulos (azimutes) a partir da posição da fonte. Assim, o modelo considera as variações azimutais na topografia

de fundo e no perfil de velocidade do som, mas assume que as curvaturas horizontais no padrão de raios são negligenciáveis. Esta metodologia tem sido bastante utilizada para aproximações horizontais de fenômenos tridimensionais, como observado nos trabalhos de Shapiro *et al.* (2014) e Chen *et al.* (2017) - que estudaram propagação acústica no Mar da Celta - e de Codato (2015) - que estudou os efeitos de uma frente de ressurgência costeira na propagação acústica.

Para isso, estabeleceu-se um ponto central (fonte sonora) no oceano, simulando como se fosse um navio com uma visada de 180° , e calculou-se o campo acústico no entorno desse cenário. Assumiu-se que a fonte era omnidirecional e que radiava a energia acústica de forma esférica. Esta fonte sonora foi posicionada a 5 metros de profundidades, na latitude $24^\circ 15,69'S$ e longitude $042^\circ 09,03'W$, em uma área externa ao VCF. A partir desta posição, foram geradas 180 seções verticais de temperatura, com 160 km de extensão e espaçadas em 1° , compreendendo áreas com e sem influência do VCF. Estes dados foram provenientes da simulação do *ROMS* para o dia 15 de fevereiro de 2012.

Para inicialização do modelo acústico *TRACEO*, esse campo de temperatura foi utilizado para gerar o campo inicial de velocidade do som. O campo batimétrico e o conjunto de propriedades geoacústicas foi o mesmo do Cenário I e, ao longo de cada seção, 501 hidrofones foram posicionados horizontalmente e 201 verticalmente. O sinal acústico foi emitido nas frequências de 100 Hz e 1500 Hz, na tentativa de avaliar se o alcance do sinal poderia causar diferenças substanciais na previsão acústica. Uma representação esquemática das principais configurações aplicadas no *TRACEO* para este cenário é apresentada na figura 3.10.

Considerando que o objetivo deste cenário foi avaliar o comportamento do campo de TL horizontalmente no espaço, foram definidas profundidades para a apresentação dos resultados:

- a) hidrofones posicionados em 50 metros de profundidade, caracterizando a camada de mistura; e
- b) hidrofones posicionados em 200 metros de profundidade, abaixo da camada de

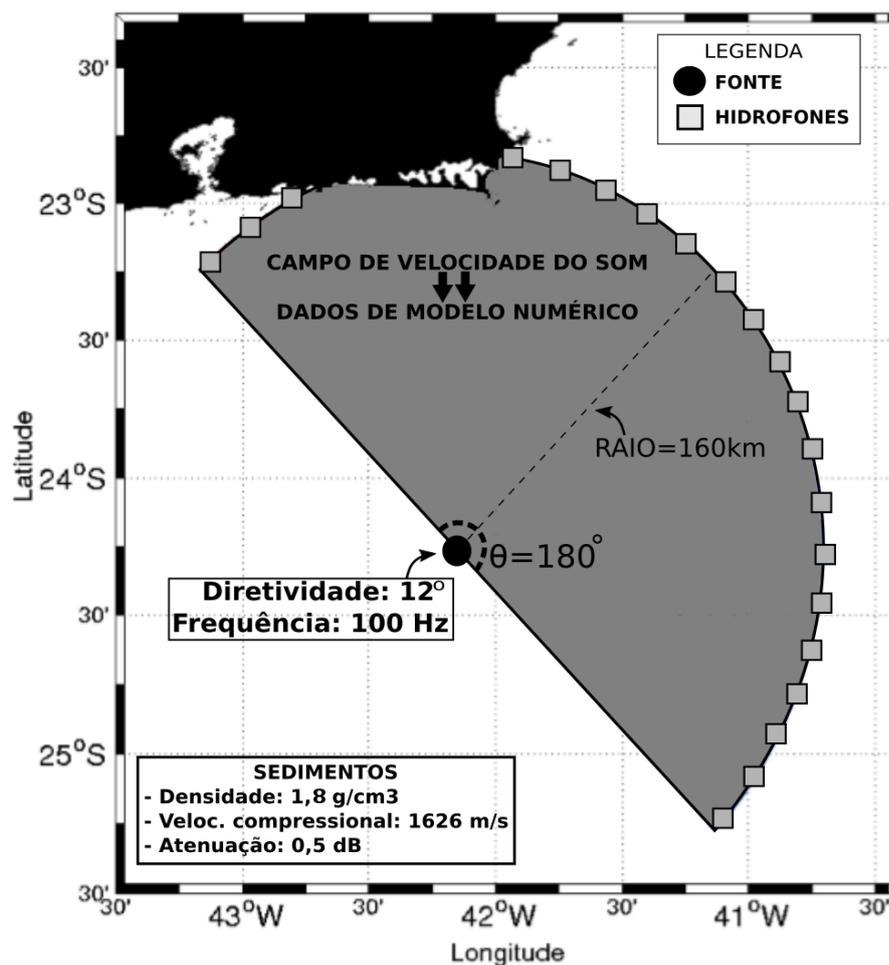


Figura 3.10: Representação das principais configurações do modelo acústico referente ao cenário II: posição da fonte, diretividade dos raios emitidos pela fonte, frequências de emissão do sinal acústico, hidrofones (dispostos ao longo de toda grade do modelo), os campos iniciais de velocidade do som e as características do fundo marinho.

mistura e caracterizando a termoclina.

Para estas profundidades, foram gerados mapas horizontais de temperatura da água do mar, velocidade do som e TL.

4. Resultados e Discussão

4.1 Cenário I

4.1.1 Vórtice ciclônico de mesoescala simulado através do Modelo Hidrodinâmico

A partir dos campos termohalinos do modelo *ROMS*, foi possível caracterizar horizontalmente a área de abrangência do Vórtice (VCF) e da Ressurgência Costeira entre Cabo de São Tomé e Cabo Frio (RCF) (figura 4.1).

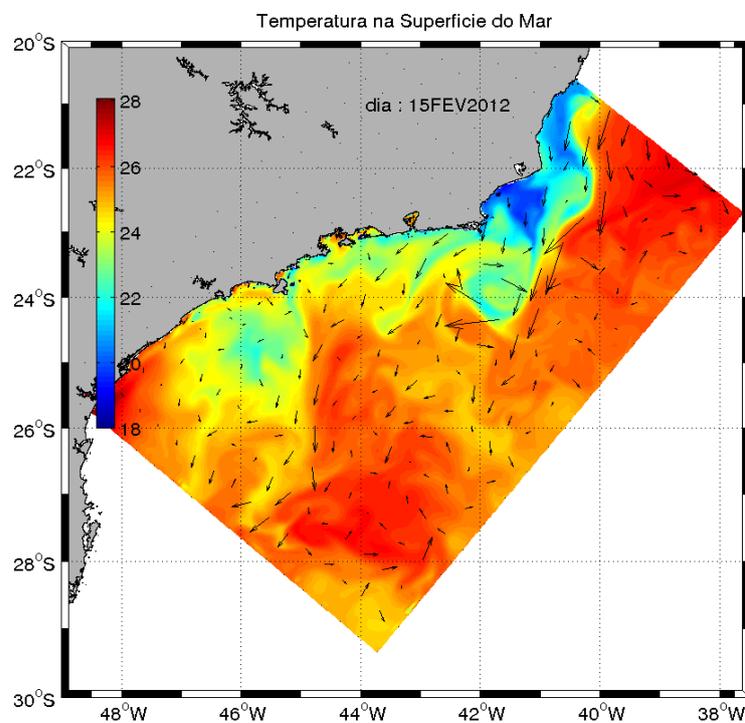


Figura 4.1: Campo sinótico horizontal de temperatura da superfície do mar (TSM) e vetores de velocidade da corrente na superfície no dia 15 de fevereiro de 2012.

Por meio da análise da temperatura e da direção e velocidade das correntes na superfície, é possível identificar a Corrente do Brasil, fluindo para sul ao largo da costa sudeste brasileira, bem como os seus meandramentos. Ao longo do escoamento da CB, entre 23°S e 24,5°S e 041°W e 043°W, as correntes superficiais formam um giro ciclônico, evidenciando o posicionamento do VCF. Pode ser observado ainda, um aumento na intensidade das correntes na borda leste e sul do VCF.

Em relação aos campos sinóticos horizontais de temperatura, é notável um gradiente com tendência de diminuição das bordas para o centro do vórtice. As temperaturas mais baixas observadas no centro do vórtice podem ser explicadas pela inclinação positiva das isopicnais, que ocorre na presença de vórtices ciclônicos; dessa forma, massas de água mais frias são levadas à superfície, diminuindo a profundidade da camada de mistura. Além disso, há a possibilidade de interação entre o vórtice de Cabo Frio e a ressurgência costeira (Calado, 2006). Este autor afirmou que um meandro ciclônico frontal, quase-estacionário, como o VCF, pode auxiliar no estabelecimento da ressurgência costeira.

Os dados altimétricos provenientes do modelo ROMS, mostram o rebaixamento da superfície do mar devido à presença do vórtice ciclônico (figura 4.2), que apresenta sentido de giro horário para o hemisfério sul. O rebaixamento do nível do mar está diretamente relacionado com o ajuste geostrófico. Este ajuste é ocasionado pelas perturbações na pressão e os efeitos da rotação, onde a conservação de vorticidade potencial permite definir o rebaixamento correspondente a um estado de equilíbrio geostrófico (Rossby, 1938).

Devido a formação da zona de divergência na região central do vórtice, de modo a permitir a conservação de massa, águas mais profundas e mais frias são advectadas para a superfície (Bombeamento de Ekman), fazendo com que esses vórtices sejam chamados de frios (Colling, 2001).

Para a observação da influência do VCF no campo termohalino em diferentes profundidades, foi selecionada uma seção que atravessa esta feição longitudinalmente (figura 4.3). A seção estende-se até a profundidade de 2500 metros e revela a assinatura térmica de um vórtice de, aproximadamente, 100 km de extensão, centrado à 120 km do início da

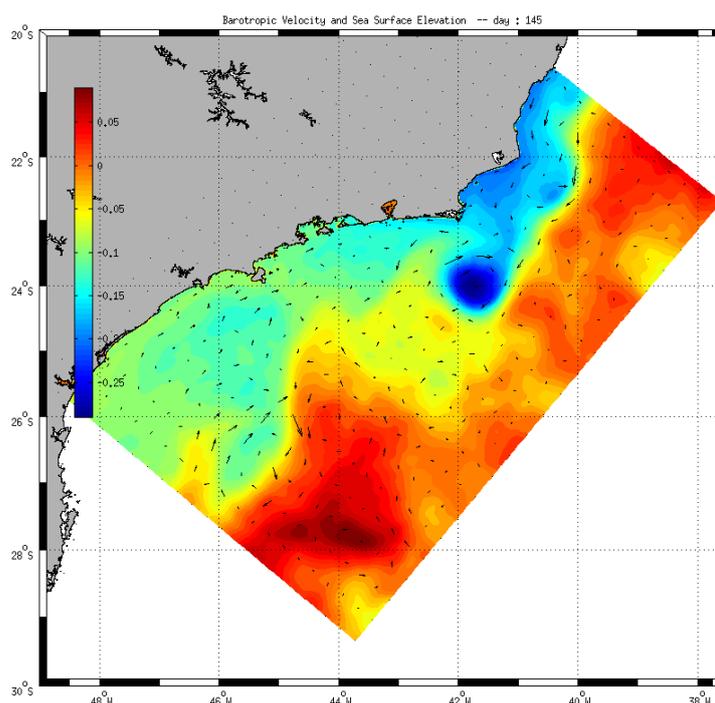


Figura 4.2: Campo sinótico horizontal de altura da superfície do mar no dia 15 de fevereiro de 2012.

seção.

Ao longo da seção vertical, é possível observar uma camada isotérmica - a camada de mistura - influenciada pelas trocas de calor com a atmosfera; com temperaturas de aproximadamente 24°C (figura 4.4). Esta camada de mistura sofre um estreitamento na distância 120 km, em função da elevação positiva das isopicnais, devido à presença da feição de mesoescala. O máximo da elevação observada corresponde ao centro do vórtice.

Abaixo da camada de mistura, fica a região onde há o maior gradiente térmico, a termoclina. A partir desta camada, a temperatura decresce com a profundidade até atingir o seu mínimo.

A assinatura do VCF também pode ser observada no campo de velocidade vertical (figura 4.5), onde as velocidades negativas (entre a borda esquerda e o centro do vórtice) e as velocidades positivas (entre o centro e a borda direita) indicam um giro ciclônico. As velocidades para oeste estão associadas à Corrente do Brasil e foram da ordem de $0,3\text{ m/s}$. As velocidades para leste estão associadas à borda costeira do vórtice, da ordem de $0,7$

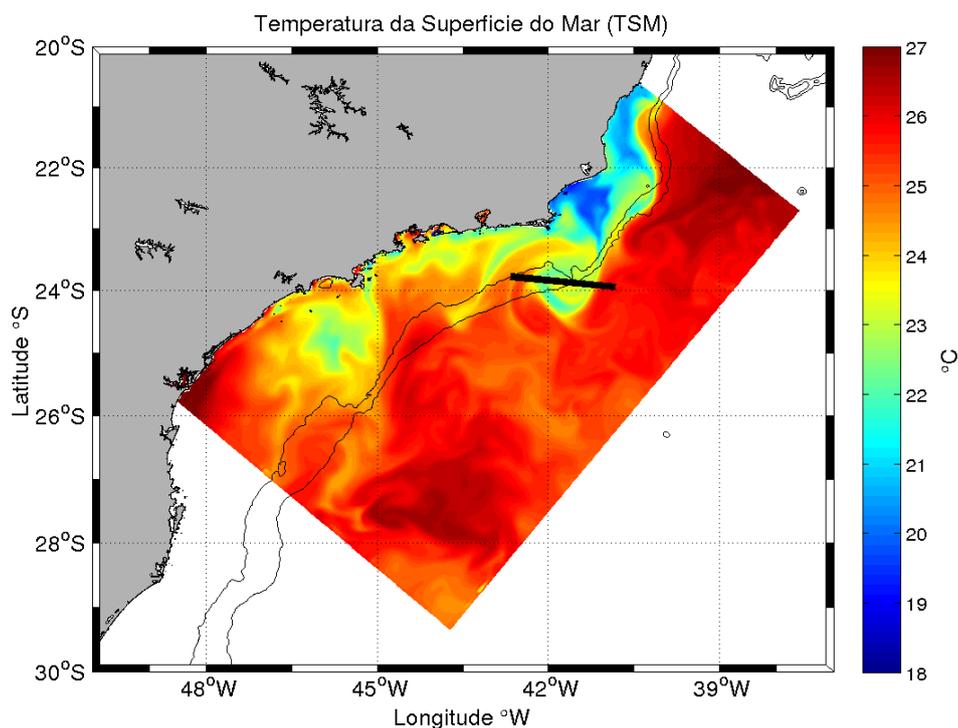


Figura 4.3: Campo sinótico horizontal de temperatura da superfície do mar (TSM) no dia 15 de fevereiro de 2012, com destaque para o posicionamento da seção vertical atravessando o vórtice ciclônico de Cabo Frio que foi utilizada para as simulações com o modelo acústico

m/s. Esta forte assimetria lateral no campo de velocidade é uma característica do vórtice de Cabo Frio, já descrita na literatura (Calado, 2006; Calado *et al.*, 2006, 2008). Estes autores afirmam que a assimetria é primeiramente termal e está relacionada à presença de água frias próximas ao talude, refletindo posteriormente no campo de velocidades baroclínicas.

Uma observação relevante é a presença concomitante de um meandro anticiclônico no início da seção (figura 4.5). Este meandro pode ser observado, inclusive, na imagem de temperatura e direção e velocidade das correntes na superfície do mar (figura 4.1).

O VCF apresenta atividade baroclínica caracterizada tanto no campo de temperatura, quanto no campo de velocidade vertical (Calado *et al.*, 2008). Conforme dito anteriormente, a temperatura apresenta uma tendência de diminuição com a profundidade; no entanto, entre 1000 e 1500 metros de profundidade, ocorre uma inversão térmica. No campo de velocidade, é possível observar um padrão semelhante, com um giro ciclônico

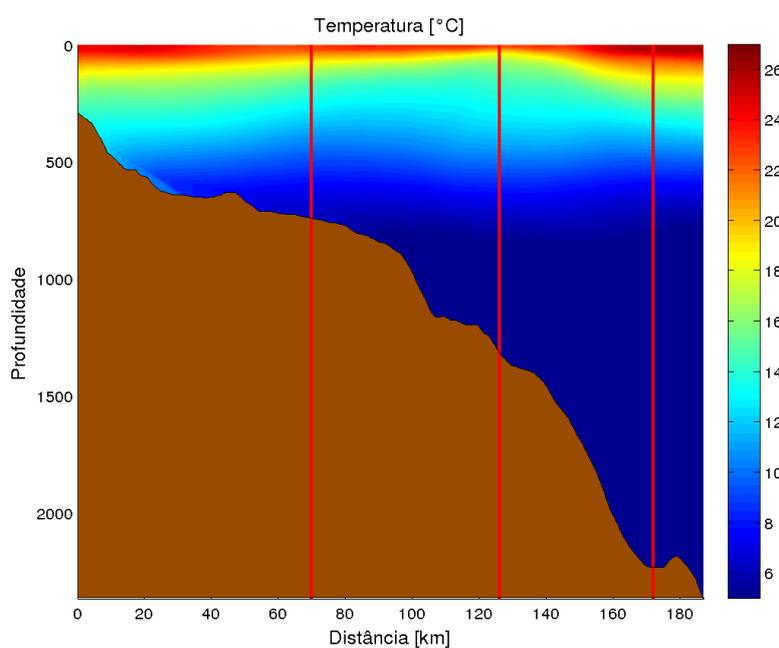


Figura 4.4: Seção zonal de temperatura ao longo do Vórtice de Cabo Frio no dia 15 de fevereiro de 2012. As linhas vermelhas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

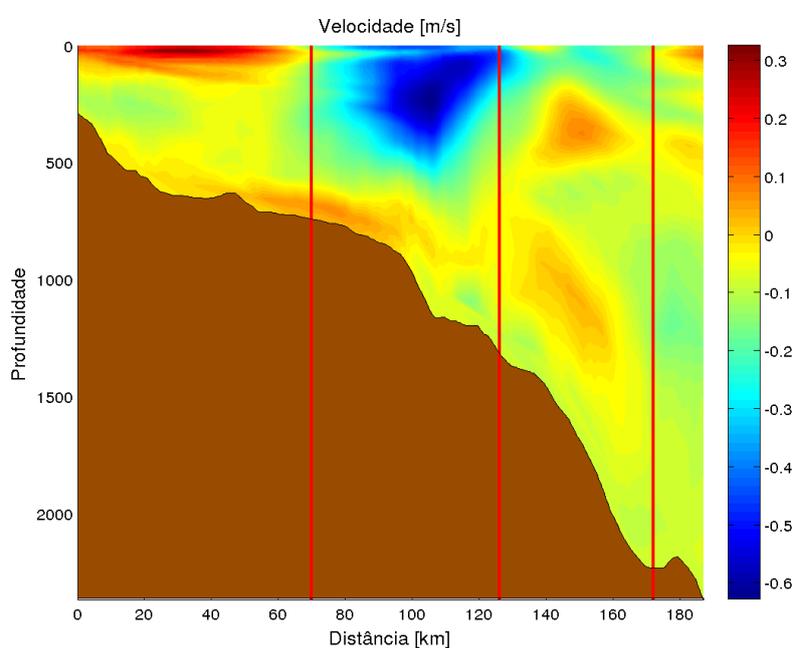


Figura 4.5: Seção zonal de velocidades geostróficas (positivas e negativas) ao longo do Vórtice de Cabo Frio; configurando um giro ciclônico. As linhas vermelhas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

nos primeiros 500 metros de profundidade, seguidos de um mínimo de velocidade e uma possível inversão na direção de rotação.

4.1.1.1 Comparação dos resultados do modelo hidrodinâmico com dados orbitais

Sempre que utilizadas simulações através de modelos numéricos, entende-se a necessidade de confrontar esse resultados com dados observados. Neste sentido, a variação da temperatura na superfície do mar (TSM) simulada através do modelo *ROMS* foi comparada com imagens de satélite para o mesmo dia (figuras 4.6 e 4.7).

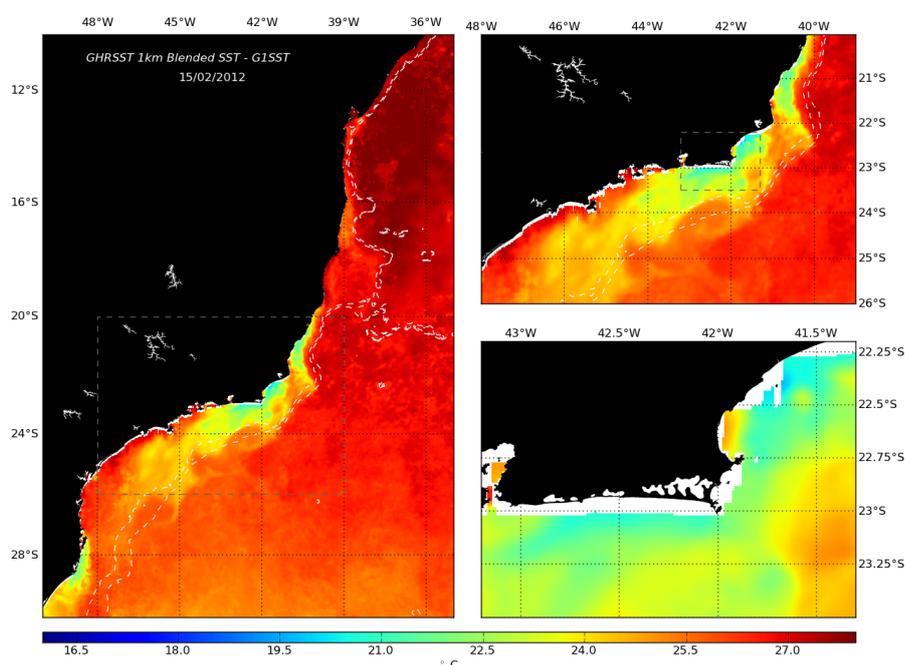


Figura 4.6: Imagens da Temperatura Superfície do Mar em três escalas espaciais: representando a atividade de mesoescala da Corrente do Brasil, seus meandros, o vórtice e a ressurgência costeira de Cabo Frio no dia 15 de fevereiro de 2012. Fonte: Grupo de Sensoriamento Remoto - IEAPM.

Nota-se que a variação da TSM e o posicionamento do VCF descritos no item 4.1.1 são condizentes com a assinatura frontal térmica observada através de dados orbitais; e, embora as imagens sejam provenientes de diferentes sensores e escalas espaciais, o vórtice de Cabo Frio pode ser claramente observado.

4.1.1.2 Campos de entrada para o modelo acústico: modelo *ROMS*

A estrutura termohalina do vórtice de Cabo Frio, descrita na seção anterior, será utilizada como campo inicial para o modelo acústico. Para isso, este campo foi convertido

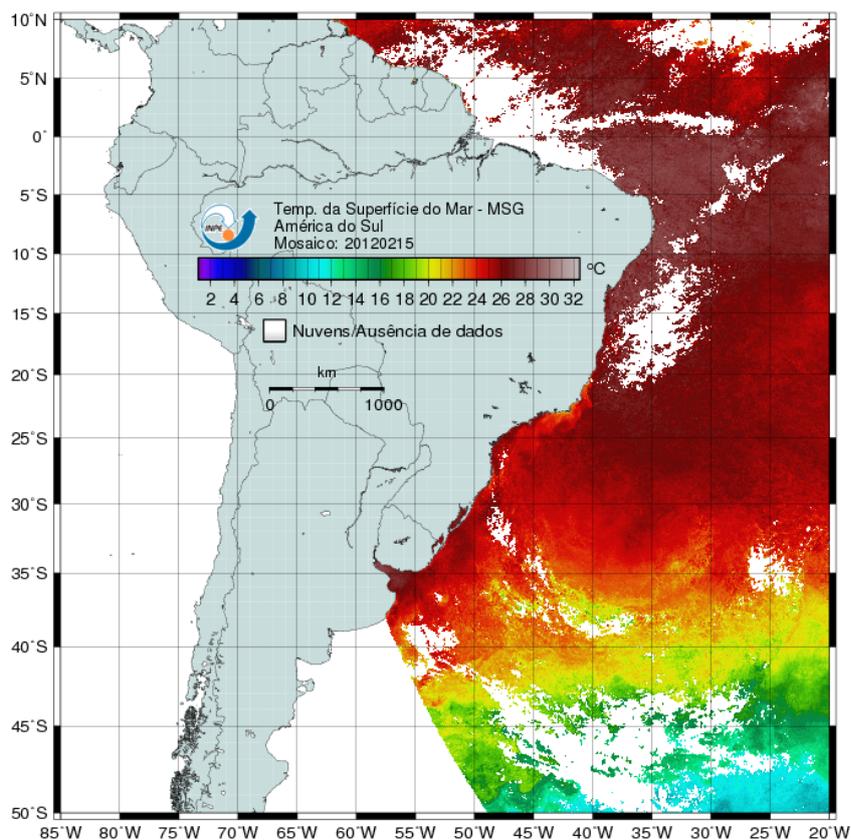


Figura 4.7: Imagem orbital da Temperatura da Superfície do Mar ao longo da costa brasileira e da região oceânica, no dia 15 de fevereiro de 2012. Fonte: INPE

em um campo de velocidade do som, conforme descrito na metodologia. Com o intuito de avaliar a influência da feição de mesoescala na propagação acústica, foram criados dois campos iniciais para o modelo acústico: um perfil com a presença do Vórtice de Cabo Frio e um perfil sem a presença. As variações de temperatura e velocidade do som para os dois campos são apresentadas na figura 4.8.

O perfil sem o vórtice apresenta uma diminuição da temperatura e da velocidade do som com a profundidade (figura 4.8 c e d). É notável uma estratificação vertical, sendo que as isolinhas de velocidade e temperatura são paralelas ao plano horizontal, caracterizando perfis típicos de temperatura e velocidade do som.

Na presença do vórtice ciclônico (figura 4.8 a e b), torna-se notável a inclinação positiva das isopícnais e das isolinhas de velocidade do som em direção à superfície. Como

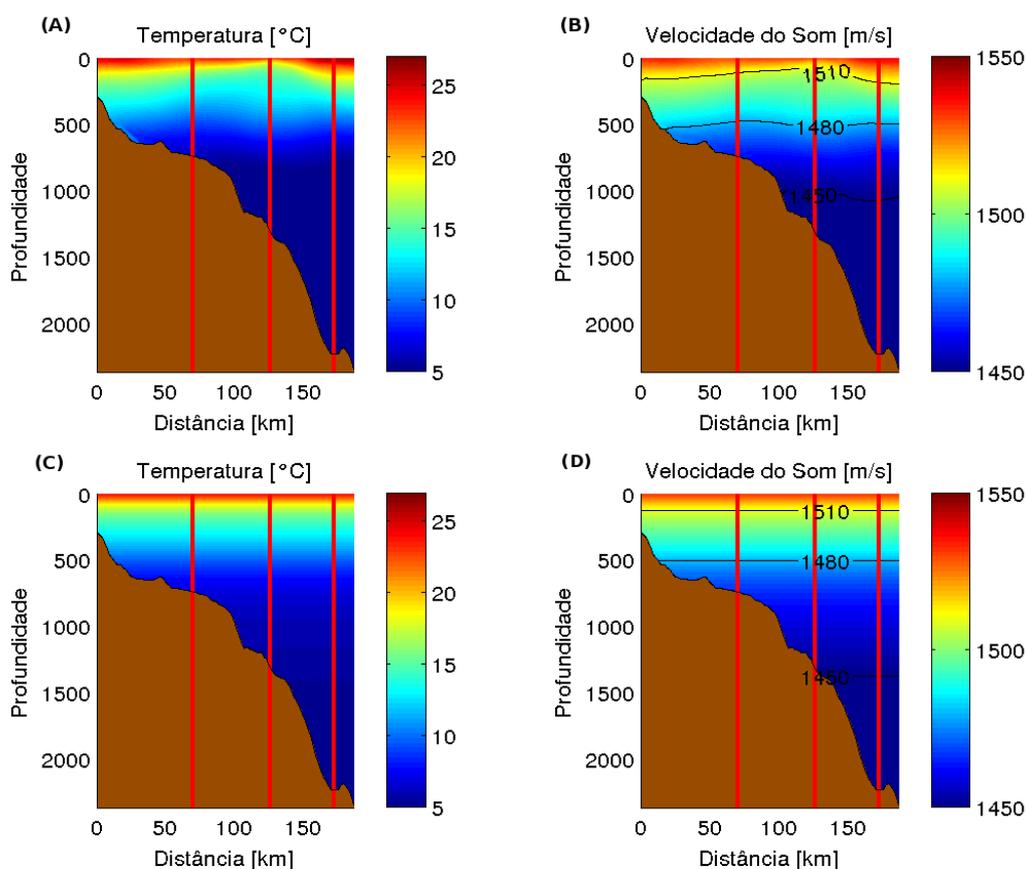


Figura 4.8: a) Perfil vertical de temperatura da água com a presença do VCF; b) velocidade do som com a presença do VCF; c) perfil vertical de temperatura da água sem o VCF; e d) velocidade do som sem o VCF. As linhas vermelhas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

o VCF apresenta circulação ciclônica e núcleo frio, águas mais frias são elevadas em direção à superfície na região central do vórtice. Conseqüentemente, há um intenso gradiente de temperatura das bordas em direção ao centro do mesmo. Em face do intenso gradiente térmico, a estrutura da velocidade do som também é alterada (Jensen *et al.*, 2011). A ascensão de águas mais frias no centro do vórtice implica na conseqüente diminuição da velocidade do som, aumentando as perdas na propagação, nesta região. Este resultado é corroborado pelo trabalho pioneiro de Weinberg & Zabalgozcoa (1977) que confirmou que vórtices de núcleo frio afetam a propagação do som, alterando o perfil vertical e horizontal de temperatura. Isto causa mudanças na amplitude, fase, tempo de viagem de cada raio, bem como nos tipos de raio que chegam ao receptor.

4.1.1.3 Influência do vórtice simulado nas perdas do sinal acústico (TL)

Nos experimentos acústicos, foram utilizadas frequências de 100 Hz e 1500 Hz. Comparando os perfis, com e sem a presença do vórtice, é notável a influência dessa feição de mesoescala nas perdas na propagação do sinal.

Para a seção com o vórtice, as perdas na propagação do sinal emitido na frequência de 100 Hz se intensificam quando os raios acústicos encontram a frente de temperatura, na borda interna do vórtice, à distância de 70 km do início da seção; e torna-se ainda mais significativa no centro do vórtice, à 125 km de distância, onde há o maior gradiente de temperatura (figura 4.9).

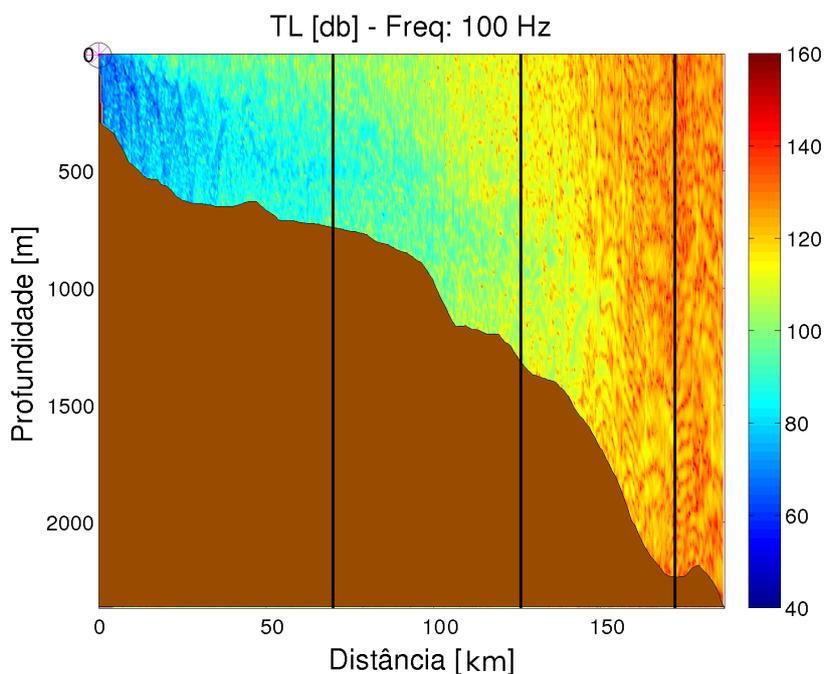


Figura 4.9: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

No entanto, a maior perda ocorre entre as distâncias de 125 km e 180 km, visto que grande parte dos raios acústicos não consegue se propagar até o final da seção, pois são refratados quando encontram a frente térmica. Os raios que conseguem se propagar, são enfraquecidos ou desviados no seu percurso até o receptor.

No caso do perfil sem o vórtice, os raios emitidos na frequência de 100 Hz conseguem se propagar por maiores distâncias, inclusive, atravessando toda a seção vertical (figura

4.10). As maiores perdas são observadas na superfície e o no fim do perfil, mas ainda são muito menores que na presença da feição de mesoescala. Esta perda na superfície é explicada pelas variações na velocidade do som - que, por sua vez, mostram-se apenas como uma função da profundidade - e pelos mecanismos de perda ou interação com o fundo e a superfície.

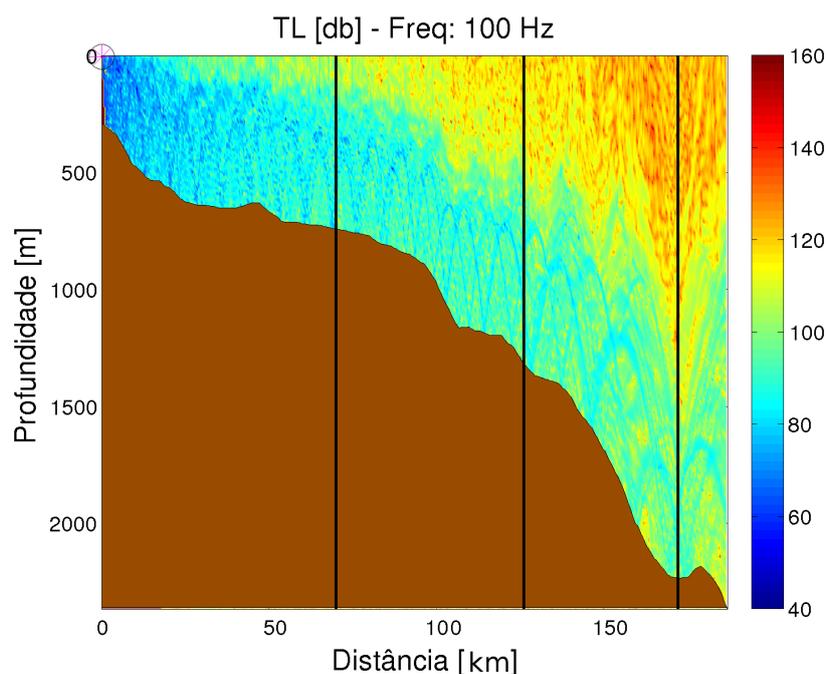


Figura 4.10: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 100 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação.

A figura 4.11 evidencia a diferença das perdas na propagação entre os dois perfis, sendo que a maior diferença está no final do perfil e próxima ao fundo. Isto ocorre porque o vórtice não somente aumenta as perdas na propagação, como bloqueia o sinal emitido, e este não consegue alcançar maiores distâncias. No perfil sem o vórtice, o sinal é propagado até o receptor.

Analisando a figura da variação média de *transmission loss* ao longo do perfil (figura 4.12), nota-se que as perdas são as mesmas para ambos os casos (com e sem vórtice), até 70 km. As perdas aumentam conforme o sinal se distancia da fonte, devido aos mecanismos de perda citados anteriormente.

A partir de 70 km, as perdas são maiores na presença do vórtice, sendo observadas

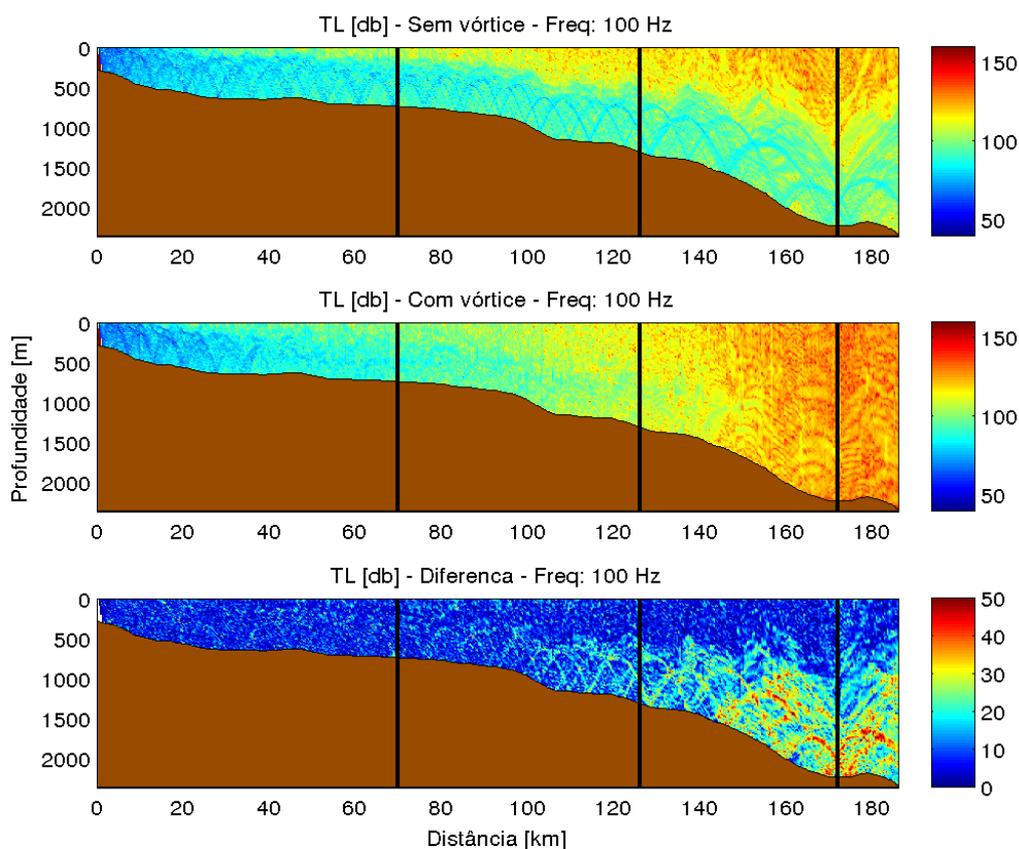


Figura 4.11: Diferença de *transmission loss* (TL) entre o perfil com vórtice e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

perdas de 110 dB entre a borda interna e o centro do vórtice e até 130 dB entre o centro e a borda externa do vórtice. No perfil sem o vórtice, o TL foi de 100 dB entre a borda interna e o centro e de até 110 dB entre o centro e a borda externa do vórtice (figura 4.12). As médias das perdas na propagação foram de 60 a 130 dB na presença do vórtice e de 60 a 110 dB na ausência do vórtice. A diferença nas perdas na propagação entre os dois perfis foi de, aproximadamente, 20 dB.

Na figura 4.12 estão demarcadas as perdas cilíndricas (equação 4.1) e as perdas esféricas (equação 4.2):

$$TL_{cil} = 10 \log_{10}(R) \quad (4.1)$$

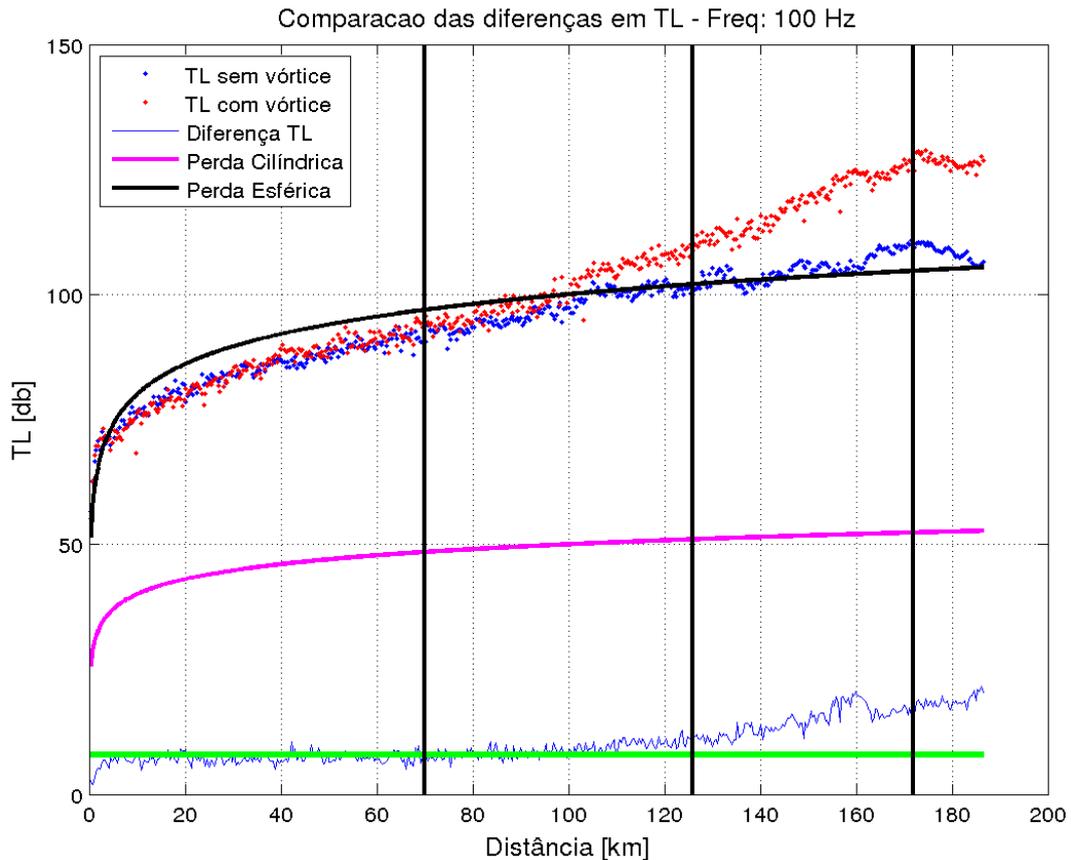


Figura 4.12: Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice simulado (70 km).

$$TL_{esf} = 20 \log_{10}(R) \quad (4.2)$$

Onde TL_{cil} representa a perda cilíndrica, TL_{esf} representa a perda esférica e R representa a distância da fonte em metros.

De acordo com Xavier (2005), a perda esférica representa a propagação de uma onda sonora em um meio homogêneo e livre, onde não há influência de fronteiras (superfície e fundo). Neste caso, a onda se propaga uniformemente em todas as direções, com uma velocidade constante e em direção perpendicular às frentes de onda. Com isso, as perdas são proporcionais à superfície da esfera, ou seja, ao afastamento da fonte. Entretanto, Xavier (2005) afirma que a energia acústica não se propaga em todas as direções, devido às fronteiras horizontais, como a superfície e o fundo. Desta maneira, a energia acústica

fica 'aprisionada' e irradia horizontalmente a partir da fonte, com uma menor perda acústica. Normalmente as ondas apresentam comportamento esférico próximo a fonte e comportamento cilíndrico com o afastamento da mesma.

De acordo com a figura 4.12, é possível observar que as perdas na propagação apresentaram comportamento esférico, principalmente quando o vórtice não está presente. Entretanto, com a presença do vórtice, as perdas na propagação aumentam, principalmente a partir do início do vórtice.

As mesmas simulações foram feitas com um sinal emitido na frequência de 1500 Hz (figuras 4.13 e 4.14). De acordo com Jones *et al.* (2013) feições de mesoescala podem afetar substancialmente a transmissão do som em frequências de, aproximadamente, 1000 Hz, cujos efeitos da absorção não são dominantes em distâncias da ordem do tamanho das feições. Para simulações realizadas com frequências superiores a 1500 Hz, as perdas poderiam estar relacionadas, primariamente, ao efeito da absorção.

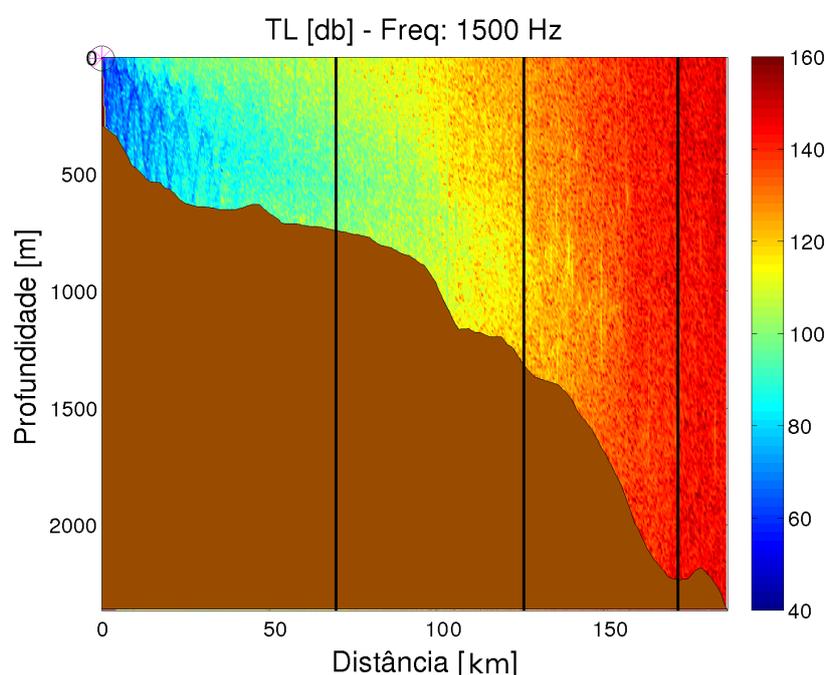


Figura 4.13: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 170 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

Assim como observado para a frequência de 100 Hz, as perdas tornam-se maiores a partir do início do vórtice e atingem o seu máximo no fim do perfil (figura 4.13). No

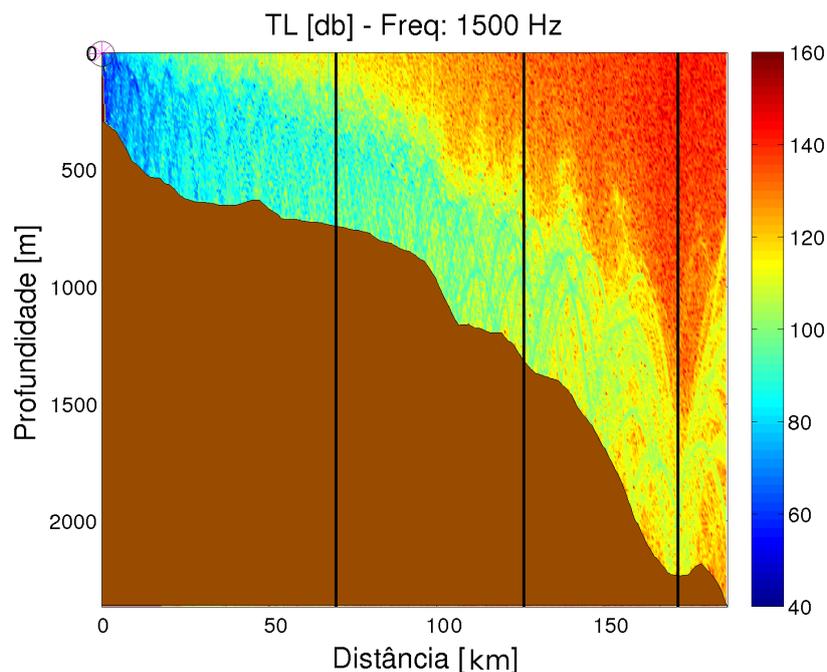


Figura 4.14: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, cujo sinal emitido foi a uma frequência de 1500 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação.

experimento sem o vórtice (figura 4.14), as perdas na propagação são menores ao longo do perfil, já que os raios não sofrem influência da refração pela frente térmica.

No entanto, os resultados diferem entre as duas frequências no sentido de que a presença do vórtice aumenta ainda mais a perda do sinal emitido na frequência de 1500 Hz; o que é explicado pelo alcance do sinal, que é menor em altas frequências. Na simulação de 1500 Hz são observadas perdas de 120 dB no centro do vórtice (10 dB a mais que na frequência de 100Hz); e de 145 dB no fim do vórtice (15 dB a mais que na frequência de 100 Hz) (figura 4.13).

Nas figuras 4.13 e 4.14, para a frequência de 1500 Hz, é possível observar que os efeitos da atenuação nas perdas na propagação também foram maiores, inclusive, no experimento sem a presença do vórtice. Neste caso, as perdas foram de 117 dB entre a borda interna e o centro do vórtice (17 dB a mais que na frequência de 100Hz) e de até 125 dB entre o centro e a borda externa (15 dB a mais que em 100 Hz).

As médias das perdas na propagação, para o sinal emitido a 1500 Hz, foram de 60 a 145 dB na presença do vórtice e de 60 a 125 dB na ausência do vórtice. A diferença nas

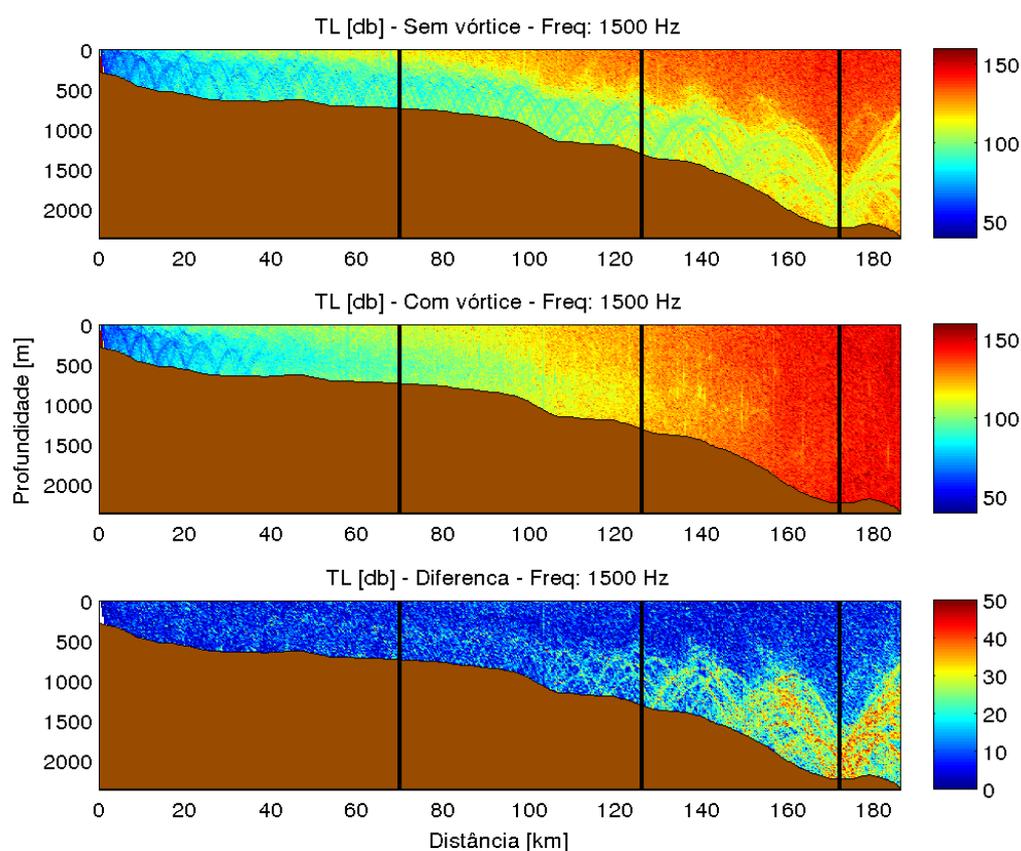


Figura 4.15: Diferença de *transmission loss* (TL) entre o perfil com vórtice e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido a uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

perdas na propagação entre os dois perfis foi de, aproximadamente, 20 dB.

A diferença nas perdas na propagação entre o perfil com e sem vórtice foi a mesma para as frequências testadas, ocasionando perdas de até 20 dB a mais que na ausência da feição. Corroborando com este resultados, estudos anteriores observaram que um vórtice ciclônico pode causar variações de até 45 dB em um sinal emitido. Por exemplo, Jian *et al.* (2009) utilizaram um modelo numérico de equação parabólica 2D para simular a propagação acústica em um vórtice anticiclônico no Mar da China e três vórtices ciclônicos da corrente do Golfo. De uma maneira geral, seus resultados mostraram que, para uma frequência de 25 Hz, a presença dos vórtices de mesoescala causou perdas de 20 dB a 45 dB a mais que na situação que estes estavam ausentes. Estes autores constataram que o motivo poderia ser as variações na localização do canal SOFAR na presença dos vórtices:

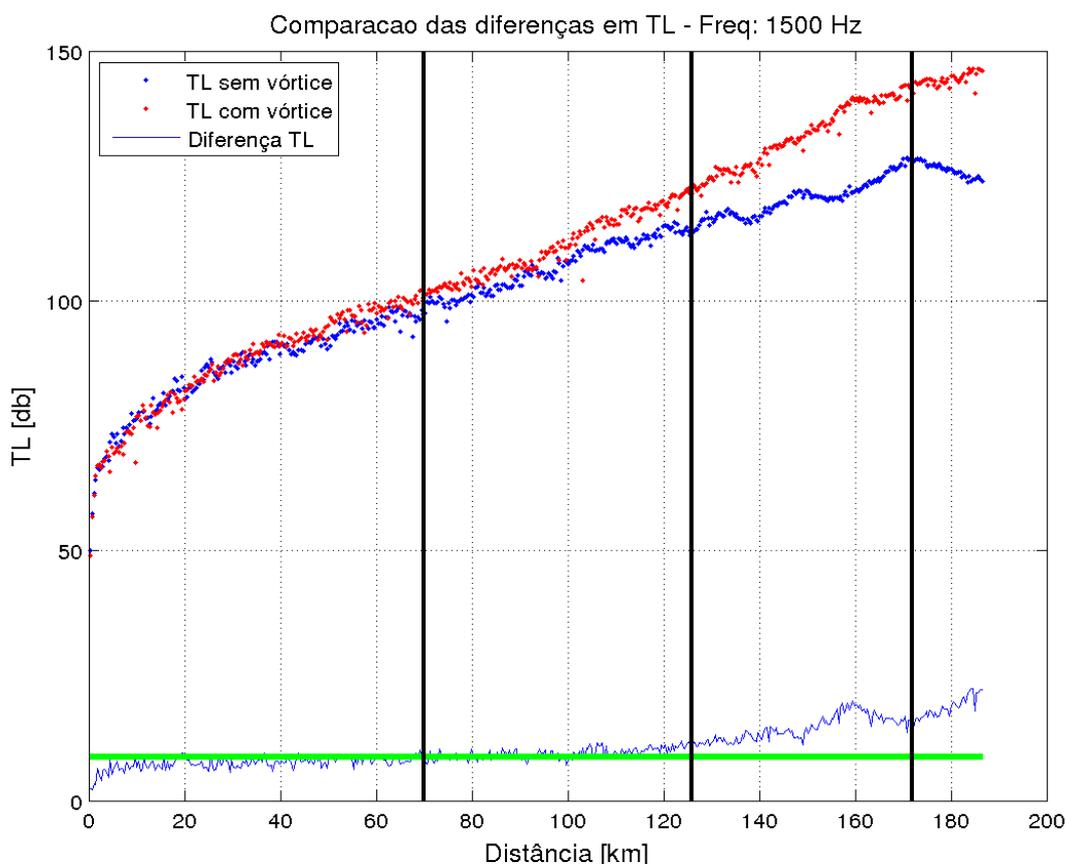


Figura 4.16: Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido a uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 70, 125 e 180 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (70 km).

para cima, em vórtices ciclônicos, e para baixo, em vórtices anticiclônicos.

Em outro estudo, Itzikowitz *et al.* (1982) utilizaram um modelo baseado na teoria de raios para avaliar as perdas na propagação ocasionadas pela presença de um vórtice ciclônico. Para um sinal emitido em uma frequência de 400 Hz, foram observadas aumentos de até 25 dB na presença da feição. Itzikowitz *et al.* (1982) afirmaram que esta variação estaria relacionada às alterações no tempo de viagem dos raios, bem como ao deslocamento para cima do canal SOFAR.

Baer (1980) avaliou a influência na propagação acústica um vórtice ciclônico da Corrente do Golfo, reproduzido por meio de um modelo analítico. Para um sinal emitido na frequência de 100 Hz, as principais variações foram observadas verticalmente. Dependendo da posição do vórtice em relação a fonte, seus resultados apresentaram perdas

na propagação de até 20 dB. Os resultados deste trabalho mostraram que mesmo um vórtice de intensidade fraca pode alterar o campo acústico. Por fim, Heathershaw *et al.* (1991) utilizaram o método de traçado de raios para quantificar os efeitos de uma frente de temperatura e de vórtices nas perdas na propagação. Para isso, seu trabalho combinou os efeitos de um modelo hidrodinâmico 3D com um modelo acústico 2D. Os resultados mostraram que, dependendo do posicionamento entre a fonte e o receptor, os efeitos da frente aumentaram as perdas na propagação em 10 a 20 dB.

Considerando as equações 3.4 e 3.5, descritas na seção 3.5, verifica-se que, com o aumento nas perdas na propagação (altos valores de TL), há diminuição do excesso de sinal e, conseqüentemente, das chances de um alvo ser detectado. Desta maneira, de uma maneira geral, a presença do vórtice ciclônico diminuiu a chance de um alvo ser detectado no seu interior, funcionando como verdadeira região de sombra.

4.1.2 Vórtice ciclônico de mesoescala caracterizado através de dados *in situ* do Projeto Oceanográfico DOCAAR

Com os resultados da seção 4.1.1 é possível perceber que o vórtice simulado através do modelo hidrodinâmico influencia o sinal emitido, causando a refração dos raios acústicos. A pergunta que se segue é: será que um vórtice ciclônico observado provocaria os mesmo efeitos no campo acústico? Para responder esta pergunta, os resultados das simulações acústicas realizadas no vórtice previsto foram comparadas às realizadas no vórtice observado.

O vórtice caracterizado a partir de dados *in situ* do Projeto DOCAAR (descrito na seção 3.4) apresenta diâmetro de aproximadamente 50 km e espessura vertical de 500 m (figura 4.17). No entanto, é necessário considerar que a feição apresentou sua lateral direita sub-amostrada, em função da perda da estação mais externa.

Entre a superfície e 150 metros de profundidade, é possível observar a camada de mistura, com temperatura de aproximadamente 24°C, valores que correspondem ao vórtice simulado. A partir 150 metros, nota-se claramente a assinatura térmica de um

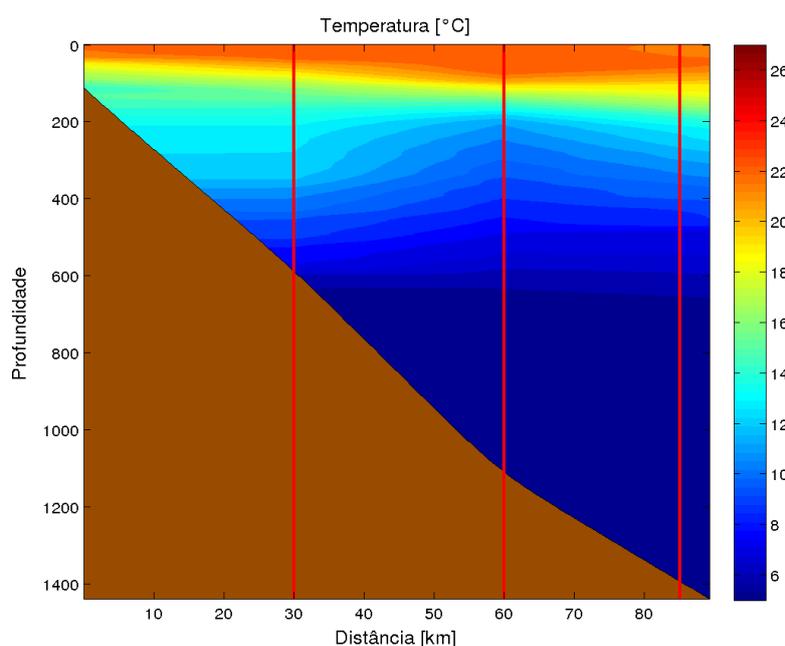


Figura 4.17: Seção zonal de temperatura ao longo do vórtice de Cabo Frio do Projeto DOCAAR no dia 12 de setembro de 2012. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

vórtice ciclônico através das inflexões das isothermas. Entre a borda esquerda e o centro do vórtice, observa-se uma inflexão das isothermas para baixo em direção à costa na região da termoclina permanente (entre 150 e 600 metros, aproximadamente), caracterizando um gradiente de pressão que impõe um fluxo para dentro da seção, ou seja, aproximadamente de oeste para leste (figura 4.17).

Entre o centro do vórtice e a borda direita, é observado o oposto. Há uma inflexão das isothermas para baixo em direção ao largo, caracterizando um gradiente de pressão oposto, que por sua vez impõe um fluxo para fora da seção, de leste para oeste. Esta estrutura térmica vertical sugere portanto a existência de um vórtice ciclônico desde a superfície até cerca de 600 m. Além disso, este vórtice apresenta características quase simétricas, já que a inflexão das isothermas é semelhante entre o centro e ambas as laterais (figura 4.17).

4.1.2.1 Campos de entrada para o modelo acústico: dados *in situ*

O campo termohalino, obtido através da coleta de dados *in situ* ao longo do vórtice ciclônico, foi convertido em um campo de velocidade do som, conforme descrito na metodologia. Assim como para os dados simulados, foram gerados perfis de temperatura e velocidade do som para situações em que o vórtice ciclônico observado estava presente e ausente (figura 4.18).

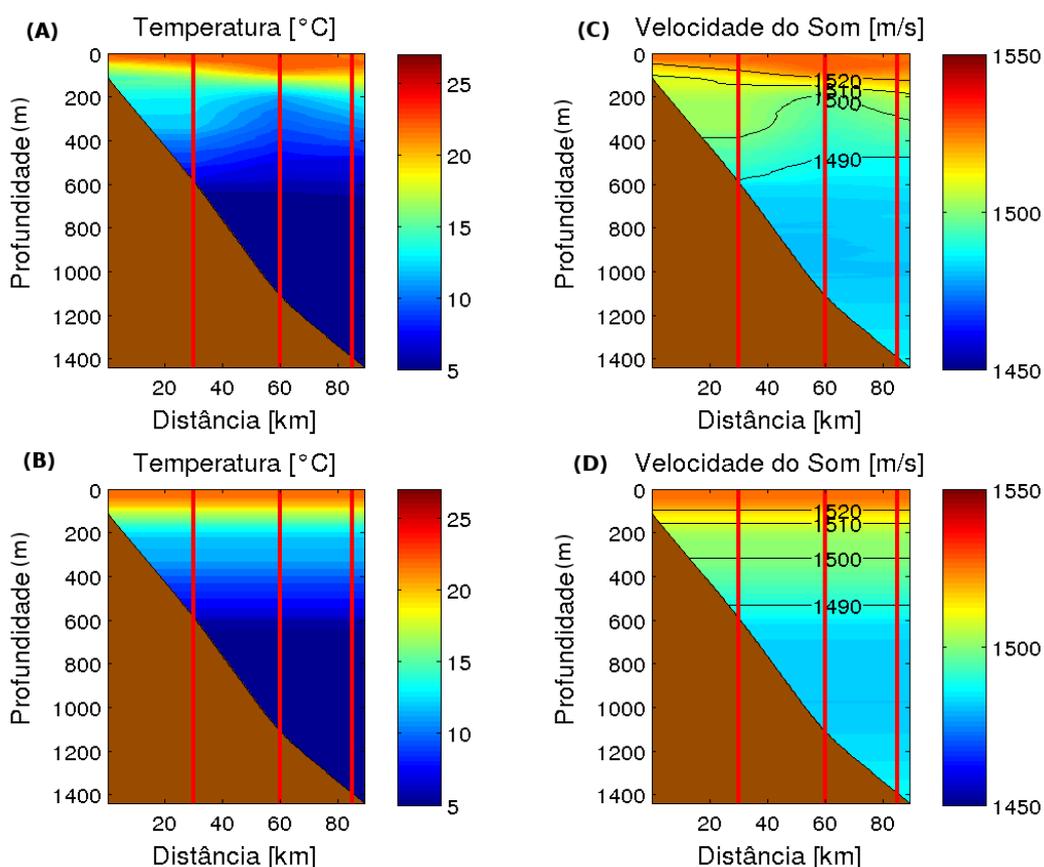


Figura 4.18: a) Perfil vertical de temperatura da água com a presença do VCF; b) perfil vertical de temperatura da água sem o VCF; c) velocidade do som com a presença do VCF e; d) velocidade do som sem o VCF. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

A partir da comparação entre os perfis com e sem a presença do vórtice ciclônico observado, percebe-se como esta feição de mesoescala altera o perfil de temperatura e velocidade do som ao longo da coluna de água. Apesar do vórtice observado apresentar proporções menores do que o vórtice simulado pelo modelo *ROMS*, este influencia a estrutura termal da coluna de água da mesma forma, causando a inflexão das isolinhas de

temperatura e velocidade do som (figura 4.18). Assim como no vórtice simulado, a massa de água mais fria é elevada em direção à superfície, principalmente no centro do vórtice, o que implica na conseqüente diminuição da velocidade do som, aumentando a perda na propagação na área de abrangência do vórtice (figura 4.18).

Apesar do vórtice simulado (figura 4.4) e do vórtice observado (figura 4.17) representarem a mesma feição de mesoescala, os campos termohalinos apresentam algumas diferenças que podem fazer com que a interação com o sinal acústico seja diferente entre eles. Entre estas diferenças pode-se citar:

i) O diâmetro. O vórtice observado (60 km) é consideravelmente menor que o vórtice simulado (100 km);

ii) O vórtice observado está localizado mais próximo da costa, com início à 30 km de distância, enquanto o vórtice simulado está localizado à 70 km de distância da costa;

iii) O vórtice observado foi caracterizado por meio de poucos perfis, isto é, não tem a mesma representação espacial que o vórtice simulado;

iv) O vórtice simulado apresenta maior assimetria lateral quando comparado ao vórtice observado (quase simétrico);

Considerando os itens acima, foi verificado se o vórtice ciclônico observado impactou o campo acústico da mesma forma que o vórtice ciclônico simulado.

4.1.2.2 Influência do vórtice observado na perda do sinal acústico

Nesta seção são apresentados os resultados das simulações acústicas (nas frequências de 100 Hz e 1500 Hz) realizadas no vórtice observado, cujos resultados foram comparados aos das simulações realizadas com o vórtice simulado. A partir desta comparação, testou-se a viabilidade da utilização de modelos numéricos para representação de feições de mesoescala em experimentos acústicos. Dessa forma, os resultados discutidos nessa seção sempre serão acompanhados de uma breve menção ao item 4.1.1.3.

Assim como observado durante o experimento no vórtice simulado, o aumento das perdas na propagação do sinal emitido na frequência de 100 Hz ocorre quando os raios

acústicos encontram a frente de temperatura e são refratados, na borda interna do vórtice, à distância de 30 km do início da seção, As perdas tornam-se ainda mais significativa a partir do centro do vórtice, a 60 km de distância da fonte, onde há o maior gradiente de temperatura (figura 4.19). As maiores perdas ocorrem entre o centro e o final do perfil, entre 60 e 90 km de distância, justificadas pelos mecanismos de perda já mencionados anteriormente que tendem a absorver a energia incidente.

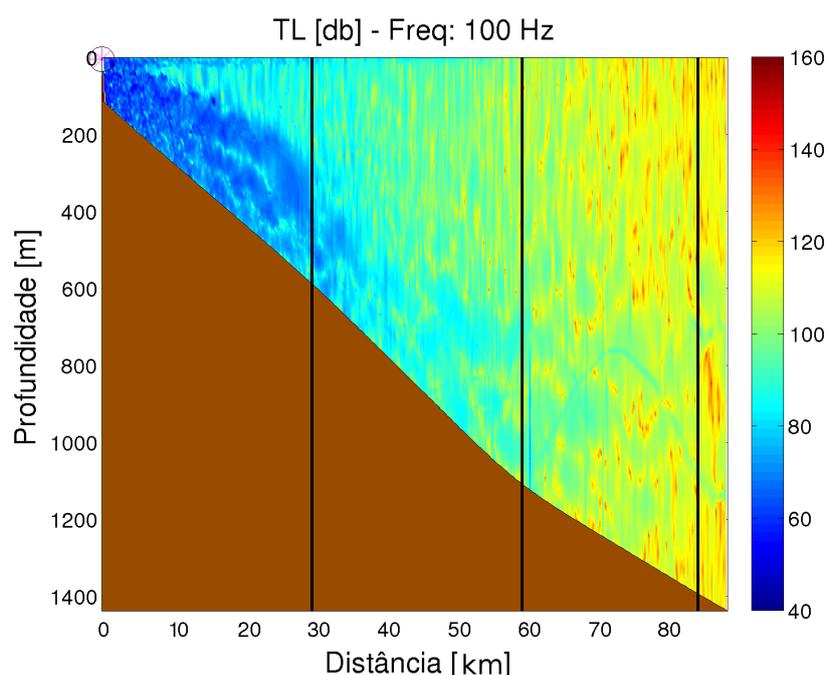


Figura 4.19: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico observado para um sinal emitido na frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

No caso do perfil sem o vórtice, os raios emitidos na frequência de 100 Hz conseguem se propagar até o fim do perfil, com um ligeiro aumento nas perdas na propagação (de até 100 dB) na superfície e a partir de 70 km de distância (figura 4.20).

As maiores diferenças de TL entre os perfis com vórtice e sem vórtice, são observadas na superfície no fim da seção (figura 4.21), o que difere do vórtice simulado, que apresentou uma diferença de TL maior ao longo de toda a coluna de água, entre o centro e o fim do perfil.

A variação média das perdas na propagação ao longo do vórtice observado (figura 4.22), para a frequência de 100 Hz, foi de até 120 dB, enquanto que, para a seção sem

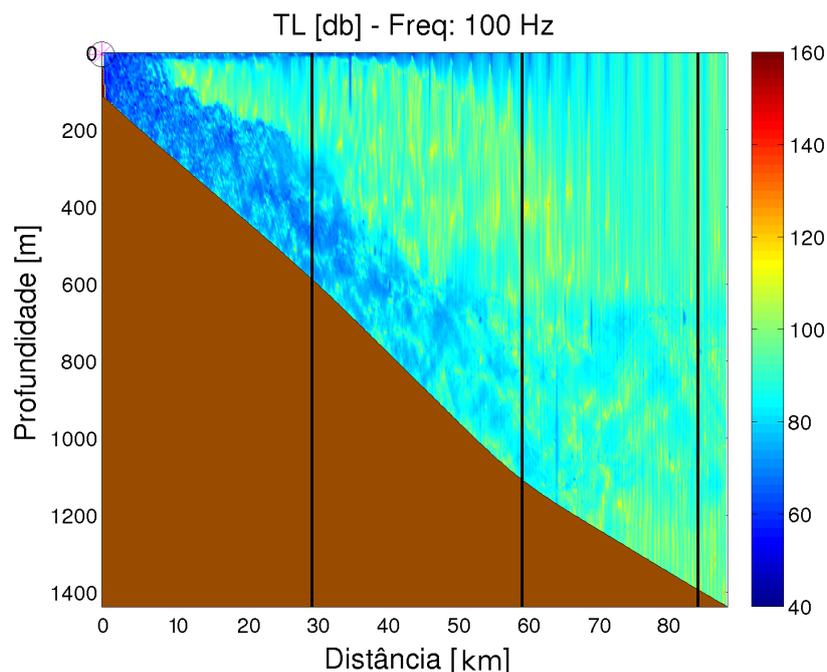


Figura 4.20: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, para um sinal emitido na uma frequência de 100 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação.

o vórtice, foi de até 100 dB. No perfil sem o vórtice ciclônico, observa-se um padrão de aumento da perda do sinal nos primeiros 30 km. Uma possível explicação poderia ser a direção preferencial dos raios acústicos. No perfil com o vórtice, estes raios tomam uma direção preferencial, possuindo pouca interação com o fundo. Já no perfil sem a presença do vórtice, o som é mais espalhado ao longo de toda a coluna de água, apresentando maior influência do assoalho oceânico.

Estabelecendo uma comparação entre os experimentos realizados, torna-se evidente que o vórtice observado (figura 4.22) causa menores perdas na propagação de sinal (de até 120 dB) quando comparado ao vórtice simulado (de até 160 dB) (figura 4.12). Esta diferença pode estar associada, principalmente, ao conjunto de dados, visto que o vórtice simulado apresenta uma grade amostral de maior resolução horizontal e vertical. A resolução da grade de amostragem pode influenciar na caracterização do campo termohalino, tornando a feição mais próxima ou não do observado, e como consequência disso, causar maior ou menor influência no campo acústico. Outra possível explicação pode estar relacionada com o fato de que a acurácia dos campos acústicos, originados a partir de

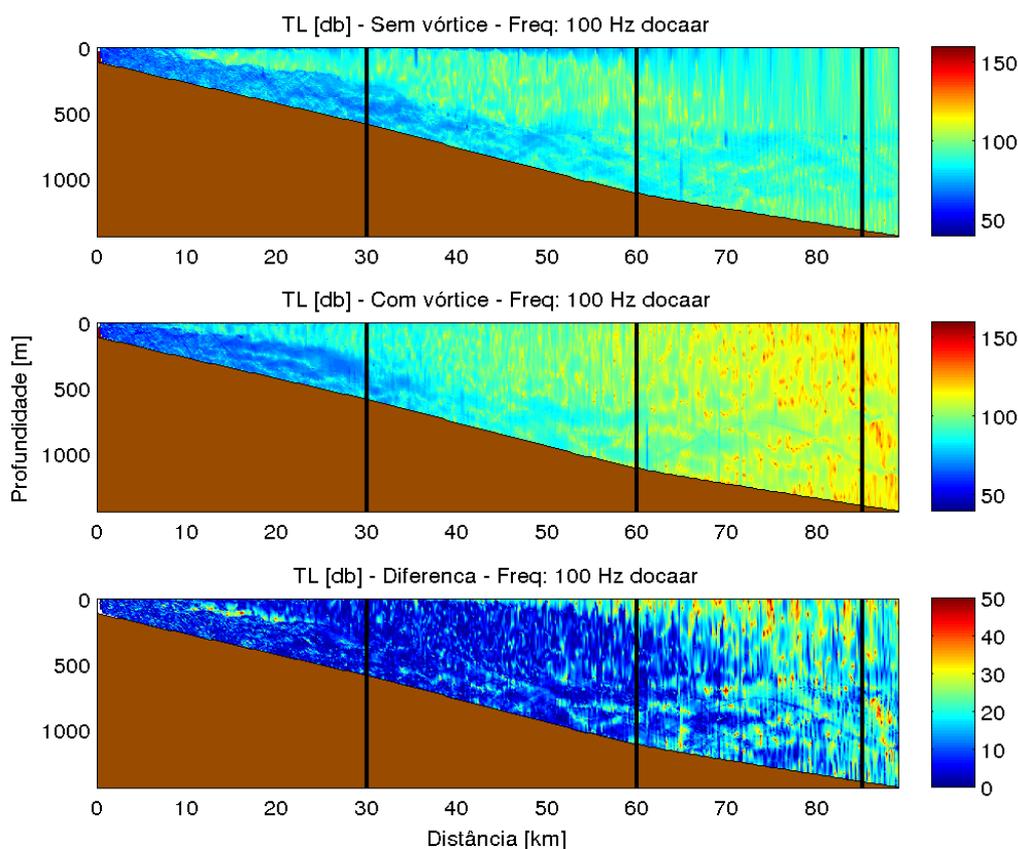


Figura 4.21: Diferença de *transmission loss* entre o perfil com o vórtice observado e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

modelos numéricos hidrodinâmicos, diminui com a distância. Isso pode ser explicado pela propagação de erros induzida pelos erros do modelo numérico (Codato *et al.*, 2013).

Esta diferença pode estar associada, também, ao tamanho do perfil; a maior diferença de TL entre os dois perfis é observada no fim e pode ser explicada pelo aumento da perda à medida que o sinal se afasta da fonte. Isto pode ser explicado pela lei da conservação de energia, onde a diminuição da velocidade do som ao longo da trajetória do raio, como observado na presença do vórtice, implica na diminuição de sua amplitude (Jensen *et al.*, 2000). Dessa forma, em um vórtice de maiores proporções, como o simulado, pode ser observado um aumento da perda de sinal ao longo da trajetória do raio.

As perdas na propagação observadas com o sinal emitido na frequência 1500 Hz (figuras 4.23 e 4.24) apresentaram um padrão semelhante às perdas na frequência de 100

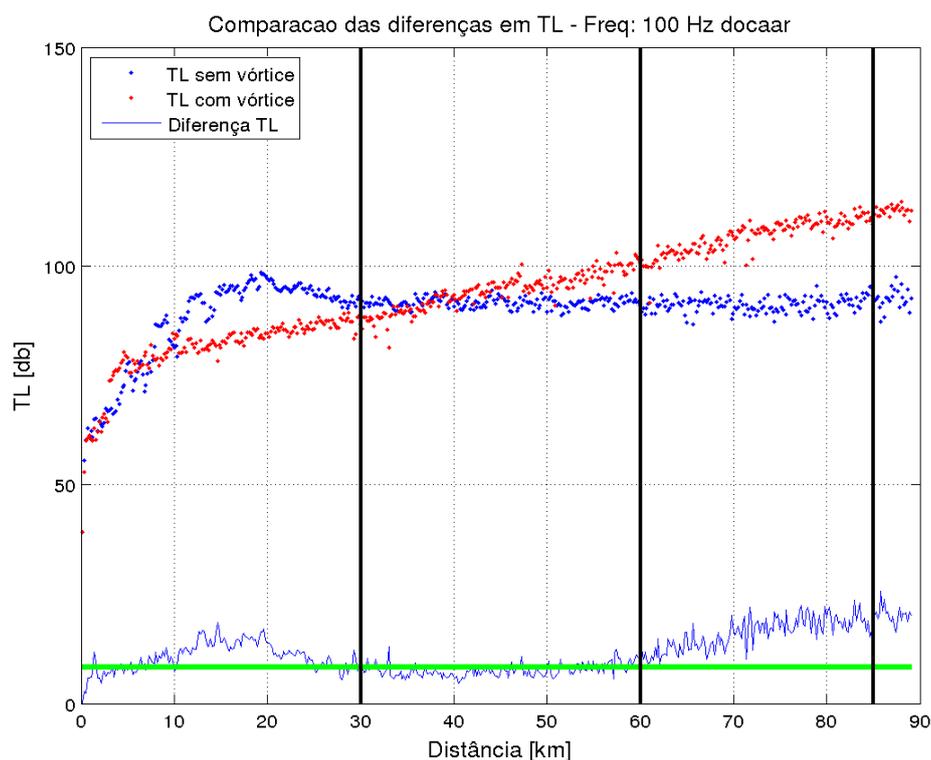


Figura 4.22: Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido a uma frequência de 100 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (30 km).

Hz, com aumento a partir do início do vórtice (borda interna) e atingindo o seu máximo próximo a borda externa (figura 4.23). No caso do perfil sem o vórtice, as perdas foram menores e o sinal conseguiu se propagar até o fim da seção (figura 4.24).

Por meio da figura 4.25, percebe-se que a presença do vórtice, quando comparado à seção onde a feição está ausente, ocasiona maiores perdas, principalmente na superfície e no fim da seção. A variação média de *transmission loss*, para o vórtice observado, foi de até 130 dB e para a seção sem vórtice, de até 110 dB (figura 4.26). Para a frequência de 100 Hz, o TL médio foi de 120 dB para a seção com o vórtice observado, e de 100 dB para a seção sem vórtice (figura 4.22).

As perdas observadas para o sinal emitido na frequência de 1500 Hz (figura 4.26) foi maior que na frequência de 100 Hz (figura 4.22) tanto na situação em que o vórtice estava presente quanto ausente. O mesmo resultado foi observado nas simulações ao longo

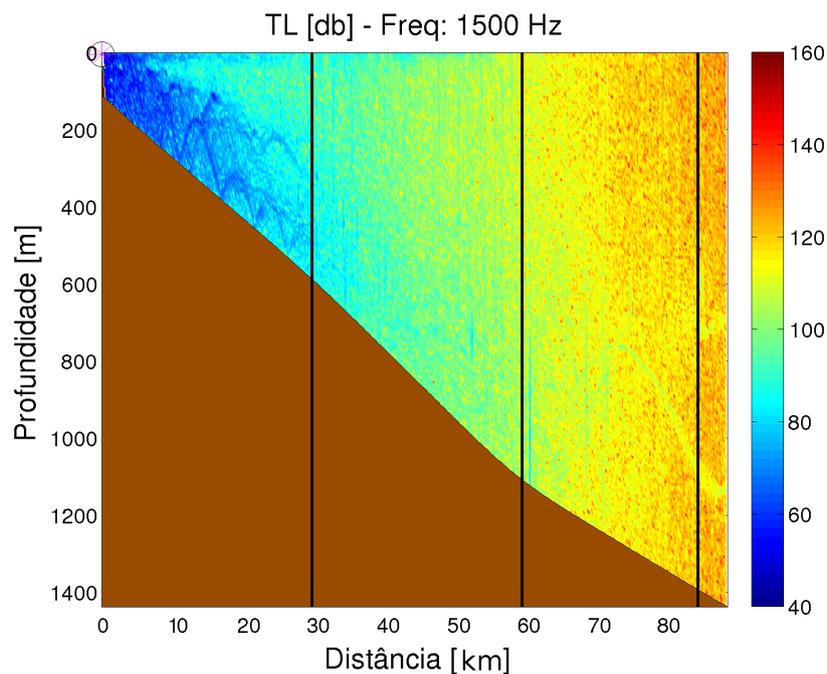


Figura 4.23: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil com o vórtice ciclônico observado, para um sinal emitido na uma frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

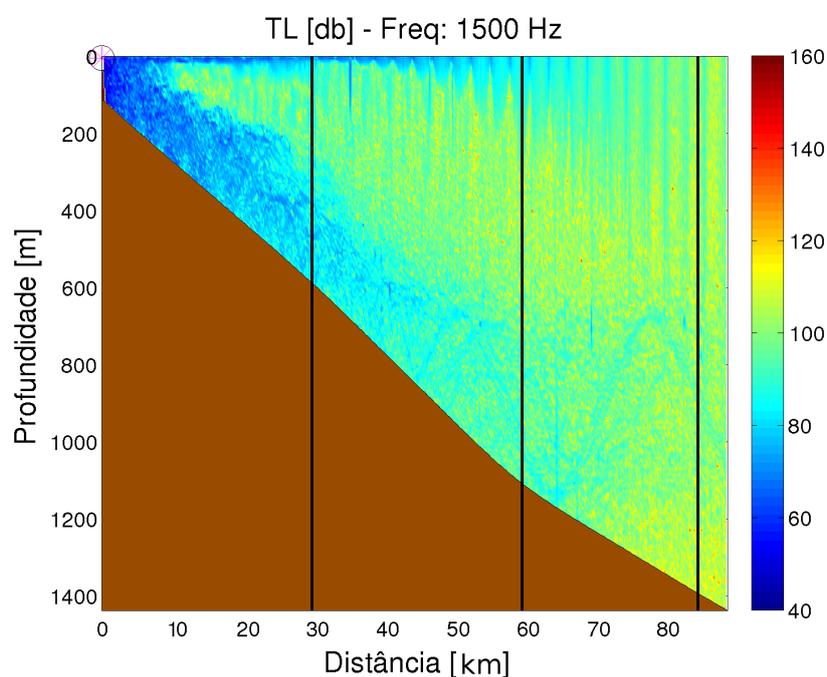


Figura 4.24: *Transmission loss* (TL) ao longo do perfil sem o vórtice ciclônico, para um sinal emitido na frequência de 1500 Hz. As linhas em preto indicam os limites do vórtice e foram incluídas nessa figura apenas para facilitar a comparação.

do vórtice simulado. Isto ocorre devido ao alcance do sinal, que diminui com o aumento da frequência.

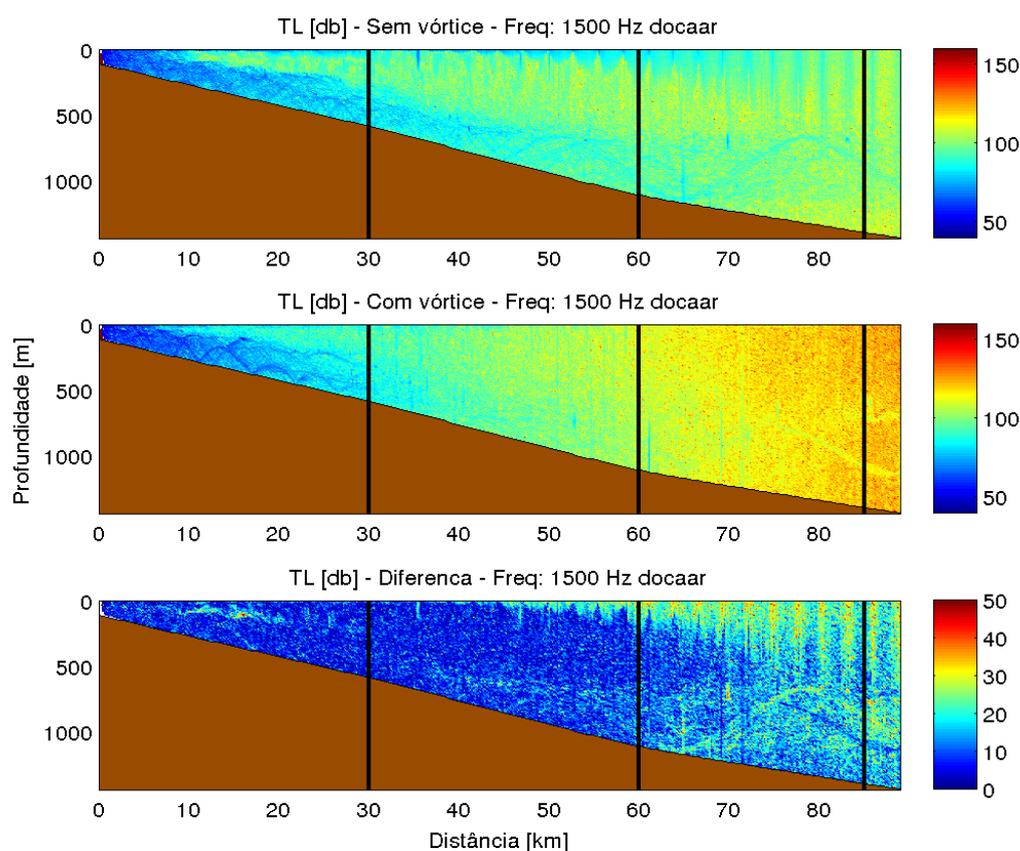


Figura 4.25: Diferença de *transmission loss* (TL) entre o perfil com o vórtice observado e o perfil sem o vórtice, para um sinal emitido na frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente.

De uma forma geral, a presença dos vórtices ciclônicos, originados a partir de dados *in situ* e de dados de modelos numéricos, causaram uma perda média na propagação de até 20 dB a mais que na ausência dessas feições (figuras 4.22 e 4.26). Isto afeta diretamente as chances de um alvo ser detectado, devido a esse significativo aumento da TL no interior do vórtice.

4.2 Cenário II

Como dito anteriormente, a previsão das perdas do sinal acústico geradas pela propagação de ondas acústicas no VCF foi realizada considerando dois cenários hipotéticos. O primeiro cenário utilizou uma abordagem puramente 2D, dando origem aos resultados

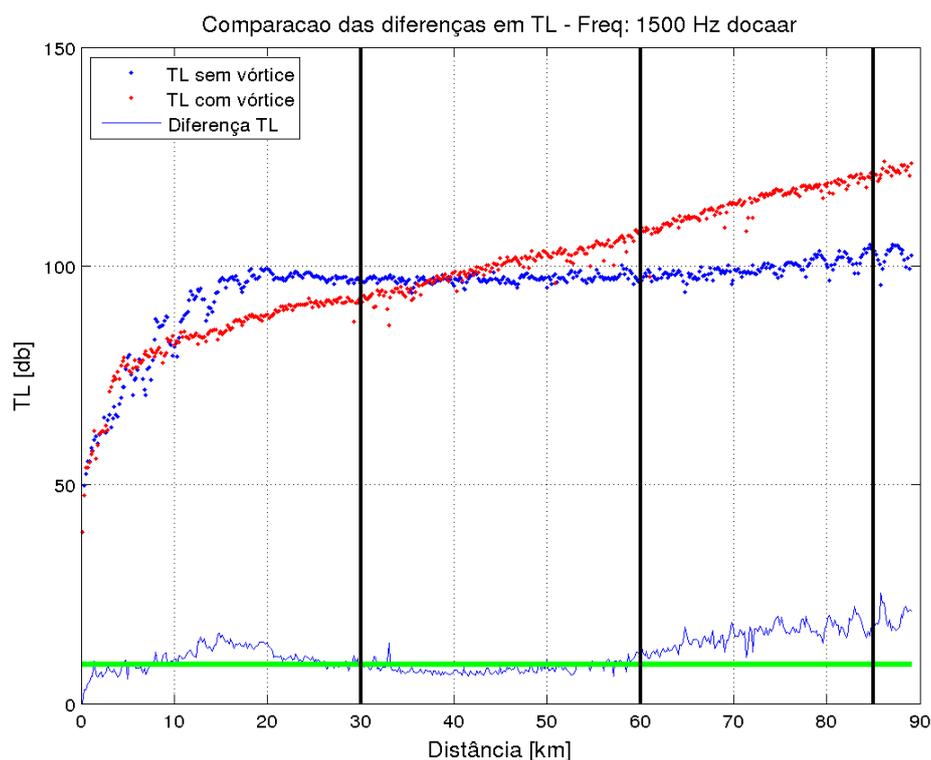


Figura 4.26: Variação média de *transmission loss* (TL) ao longo do perfil para um sinal emitido na frequência de 1500 Hz. As linhas pretas em 30, 60 e 90 km representam a borda esquerda do vórtice, o centro e a borda direita, respectivamente. A linha verde indica o valor médio da diferença de TL até o início do vórtice (30 km).

descritos na seção 4.1. Já o segundo cenário contempla mapas semicirculares horizontais, em profundidades pré-estabelecidas, em uma abordagem Nx2D. As profundidades de 50 e 200 metros foram escolhidas por, no caso deste estudo, poderem representar a camada de mistura e a termoclina, respectivamente. Dessa forma, foi possível observar as perdas na propagação ao longo de uma visada de 180° a partir da posição da fonte. Sendo assim, neste trabalho estes mapas serão denominados 'mapas 180° '.

Primeiramente, foram gerados mapas horizontais de temperatura a partir dos resultados do modelo numérico hidrodinâmico. Através da análise da variação da temperatura na profundidade de 50 metros (figura 4.27), é possível observar um vórtice de núcleo frio entre 23°S e $24^\circ30'\text{S}$, com temperaturas entre 18°C e 20°C , e um intenso gradiente positivo de temperatura do centro para as bordas desta feição.

Além disso, é possível perceber que a região costeira compreendida pelo semicírculo

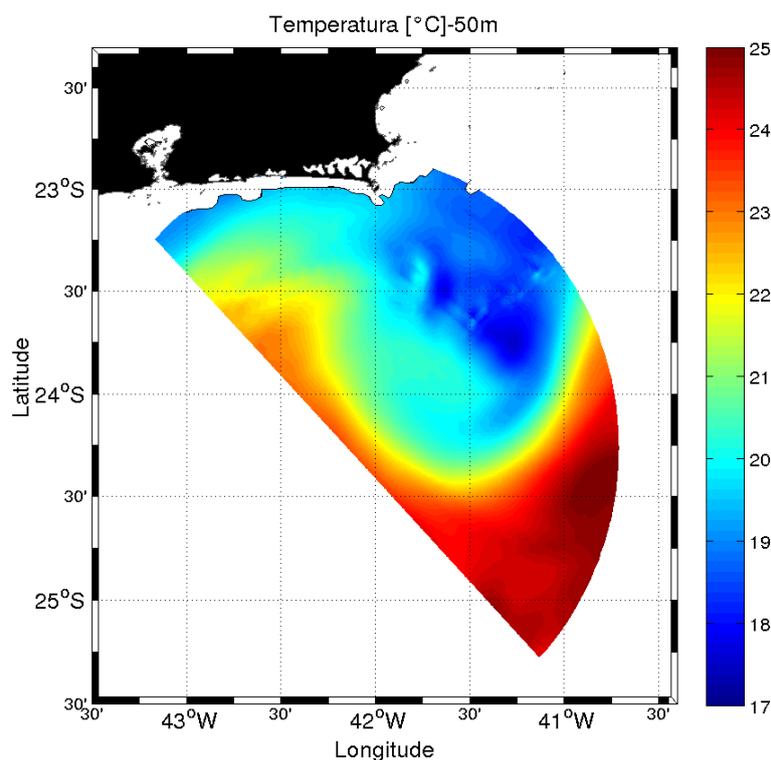


Figura 4.27: Campo sinótico horizontal de temperatura para a profundidade de 50 metros.

também apresenta temperaturas baixas, com valores próximos aos observadas no interior do vórtice (entre 18°C e 20°C), o que sugere uma interação entre o evento de ressurgência costeira de Cabo Frio e a feição de mesoescala. A parte mais oceânica do semicírculo, ao sul de $24^{\circ}30'\text{S}$, que corresponde a área externa ao vórtice, apresenta temperaturas relativamente mais altas (entre 23°C a 25°C).

Para inicialização do modelo acústico, o campo horizontal de temperatura foi convertido em um campo horizontal de velocidade do som (figura 4.28). O perfil horizontal da velocidade do som apresentou uma variação coerente com o de temperatura, no sentido de que no centro do vórtice, onde são observadas as temperaturas mais baixas, consequentemente, foram observadas também, os menores valores de velocidade do som (1475 a 1480 m/s). Além disso, foi observado um gradiente positivo de velocidade do som do centro para as bordas do vórtice. Os maiores valores de velocidade do som (de aproximadamente 1495 m/s), que também correspondem aos maiores valores de temperatura, estão na borda direita do vórtice.

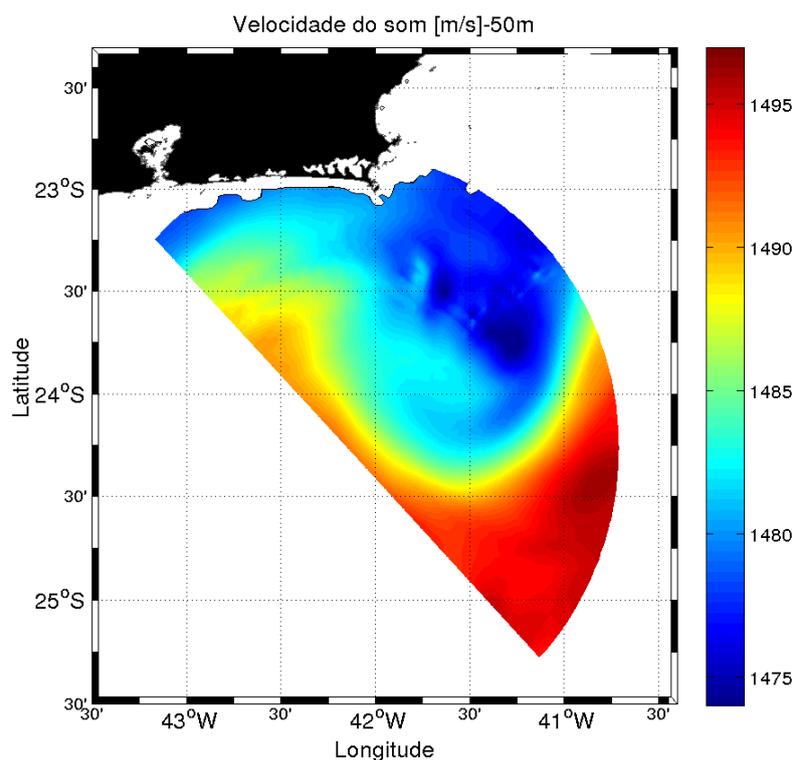


Figura 4.28: Campo sinótico horizontal de velocidade do som para a profundidade de 50 metros.

O posicionamento da fonte, bem como o tamanho do raio, foram definidos de forma que o semicírculo horizontal compreendesse todo o vórtice de Cabo Frio (figura 3.10), tanto a porção mais costeira (ao norte de $23^{\circ}30'S$) quanto a porção mais oceânica (ao sul de $23^{\circ}30'S$). Sabe-se que estes fatores afetam diretamente os resultados das perdas na propagação, mas esta escolha permitiu observar como a energia acústica se comporta ao longo de áreas com e sem a presença do vórtice.

É importante observar que a batimetria desta área é bastante variável (figura 4.29), com menores profundidades (de até 500 metros) na parte costeira do vórtice, ao norte de $23^{\circ}30'S$, e maiores profundidades (entre 500 a 3000 metros) na parte oceânica, ao sul de $23^{\circ}30'S$. Esta mudança abrupta na batimetria está relacionada a presença do talude, com início a partir da quebra de plataforma, em aproximadamente, 150 metros de profundidade (Dias, 2015).

Após a análise da variação da batimetria ao longo da seção horizontal, sabe-se que esta tem influência substancial nas perdas na propagação, principalmente nas áreas mais

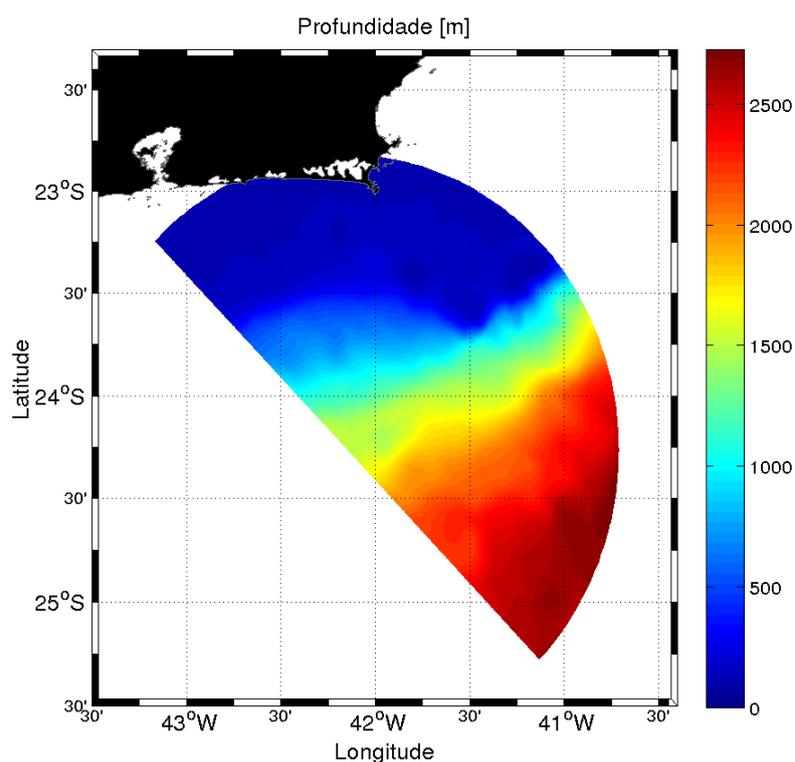


Figura 4.29: Variação da batimetria ao longo das seções horizontais semicirculares.

rasas. De fato, em modelagem acústica, Buckingham (1992) afirma que a maior parte dos modelos acústicos utilizam uma metodologia 2D, dando ao campo acústico uma variação somente na distância e na profundidade (Etter, 2013). No caso de águas profundas, onde as variabilidades horizontais são muito pequenas, essa aproximação é bastante satisfatória. Entretanto, no estudo de frentes oceânicas e vórtices, os modelos 2D podem falhar em desconsiderar os efeitos de convergência e divergência associados com o campo acústico horizontal (Buckingham, 1992).

A metodologia Nx2D, utilizada neste cenário, considera as variações azimutais de topografia do fundo e de temperatura. Entretanto, a mesma negligencia as curvaturas horizontais no padrão de raios (Buckingham, 1992). Este autor afirma que esta abordagem é bastante útil em áreas profundas, mas falha em áreas mais rasas ou grandes alterações topográficas, como em taludes e montes submarinos. Nestas regiões, com o aumento da relação entre o comprimento da onda e a profundidade local, ocorre com mais frequência um fenômeno conhecido como 'refração horizontal' (Weston, 1961). Apesar do nome, este fenômeno também está associado ao processo de reflexão azimutal das ondas acústicas

no fundo marinho, com a formação de zonas de sombra próximo às áreas com maiores variações topográficas (Weston, 1961). De fato, Lee *et al.* (1990) e Duda *et al.* (2011) verificaram que, para estas áreas, modelos Nx2D não apresentam bons resultados, indicando o uso de modelos tridimensionais.

Assim, reconhecidas as limitações da metodologia utilizada em áreas mais rasas, optou-se por considerar apenas as variações ao longo da coluna de água, eliminando a influência da batimetria no resultado do modelo TRACEO. Para isto, foi elaborada uma batimetria idealizada, que variou para cada uma das 180 seções verticais. Em cada seção, verificou-se qual era a maior profundidade e definiu-se que a batimetria era constante nessa profundidade máxima. Por exemplo, considerando que a seção de 15° de rumo tem profundidades variando entre 1000 e 1500 metros, a batimetria idealizada utilizada apresentou a profundidade constante de 1500 metros. Apesar de ciente que esta metodologia não é a mais adequada, principalmente por considerar a propagação acústica em locais abaixo do fundo submarino, este foi o único artifício encontrado para minimizar os erros inerentes a modelagem Nx2D no que tange aos efeitos da batimetria.

Foi realizada, então, a propagação de um sinal na frequência de 100 Hz para a seção horizontal a 50 metros de profundidade com a batimetria idealizada (figura 4.30). Para a presente seção, optou-se por utilizar somente a frequência de 100 Hz, visto que os resultados descritos anteriormente já haviam mostrado que a diferença entre baixas e altas frequências influencia basicamente no alcance do sinal.

Ao longo do mapa 180°, o vórtice age de forma a aumentar a perda na propagação gradualmente, conforme aumenta o gradiente negativo de temperatura. De fato, percebe-se que as perdas se tornam maiores a partir do centro do vórtice (figura 4.30), resultados similar ao encontrado no Cenário I. As maiores perdas (de até 120 dB) foram observadas no fim da seção circular e nas proximidades da costa, que correspondem às temperaturas mais baixas (18°C a 20°C) (figura 4.27) e, conseqüentemente, aos menores valores de velocidade do som (1475 a 1480 m/s) (figura 4.28). Além disso, as maiores perdas estão associadas ao aumento da distância da fonte, conforme observado na figura 4.30.

Como a temperatura não é homogênea ao longo da coluna de água, ainda mais

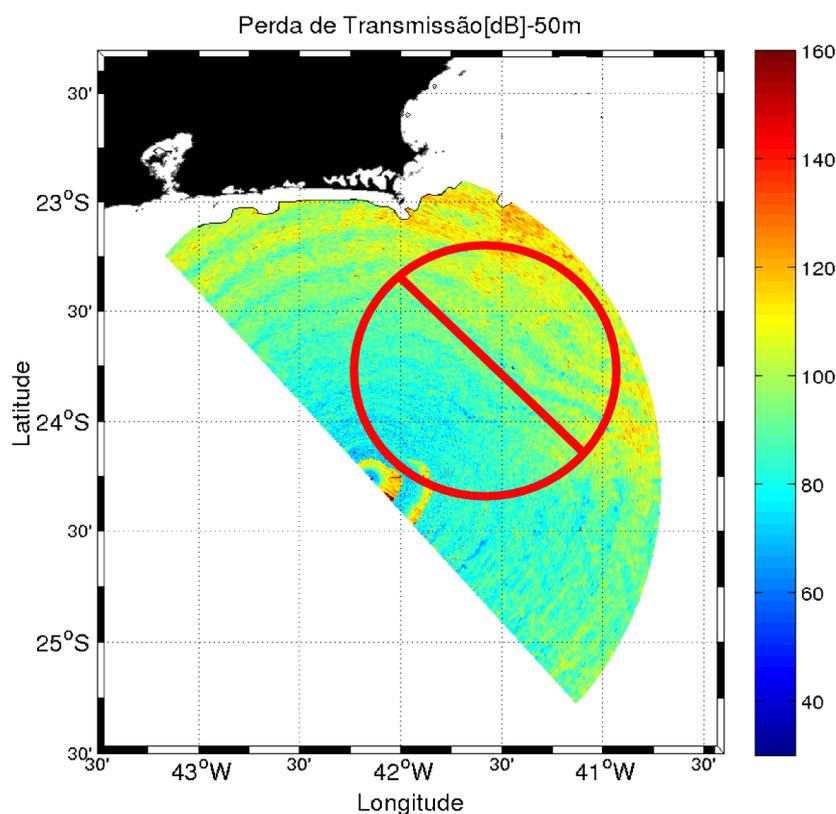


Figura 4.30: Perfil horizontal de TL na profundidade de 50 metros para o sinal emitido na frequência de 100 Hz. O círculo vermelho representa os limites horizontais do vórtice.

quando influenciada pela presença de uma feição de mesoescala, foram criados mapas 180° de temperatura também na profundidade de 200 metros (figura 4.31). Esta profundidade corresponde ao início da termoclina, camada a partir da qual a temperatura começa a decrescer com a profundidade.

O mapa 180° de temperatura para a profundidade de 200 metros (figura 4.31) mostrou que, apesar da profundidade, a estrutura do vórtice de Cabo Frio ainda se mostrava bastante presente e caracterizada pelo intenso gradiente térmico: com temperaturas mais baixas no seu interior (entre 13°C e 15°C) e temperaturas relativamente mais quentes do lado externo (15 a 18°C). Nota-se que as temperaturas do lado externo do vórtice mostraram-se baixas, em função de ser uma seção horizontal localizada em uma maior profundidade.

O campo de velocidade do som (figura 4.32) está diretamente relacionado ao campo de temperatura e, em função disso, também apresentou valores menores na profundidade

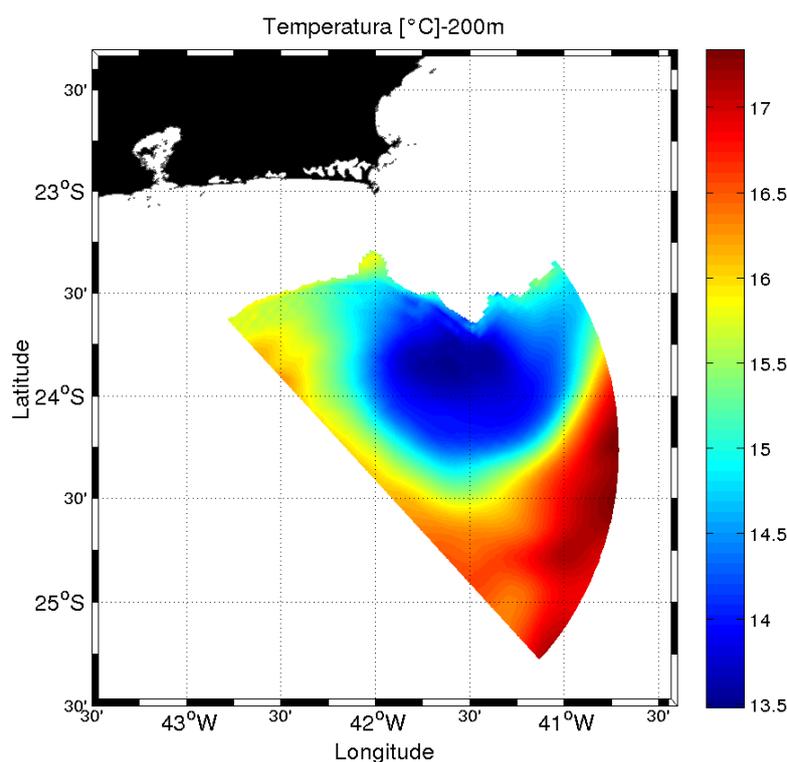


Figura 4.31: Campo sinótico horizontal de temperatura para a profundidade de 200 metros.

de 200 metros quando comparado ao mesmo campo na profundidade de 50 metros. No interior do vórtice, foram observadas velocidades do som variando entre 1455 a 1460 m/s. Estes valores aumentam em direção à borda, alcançando velocidades de até 1465 m/s. Na parte externa do vórtice, o som consegue se propagar numa velocidade maior (de até 1470 m/s), o que demonstra a influência dessa feição na diminuição da propagação (figura 4.32).

As variações observadas nos campos de temperatura e velocidade do som na profundidade de 200 metros também influenciaram no campo horizontal de TL (figura 4.33). Assim como para a profundidade de 50 metros, o forte gradiente de temperatura do vórtice de Cabo Frio causou um aumento nas perdas na propagação, principalmente, a partir do seu centro. Os valores de TL para o sinal emitido na termoclina foram semelhantes aos obtidos na camada de mistura, com perdas de até 120 dB no fim da seção circular. Dessa forma, as perdas na propagação parecem variar de forma semelhante entre 50 e 200 metros de profundidade, sendo influenciadas, primeiramente, pelo gradiente térmico

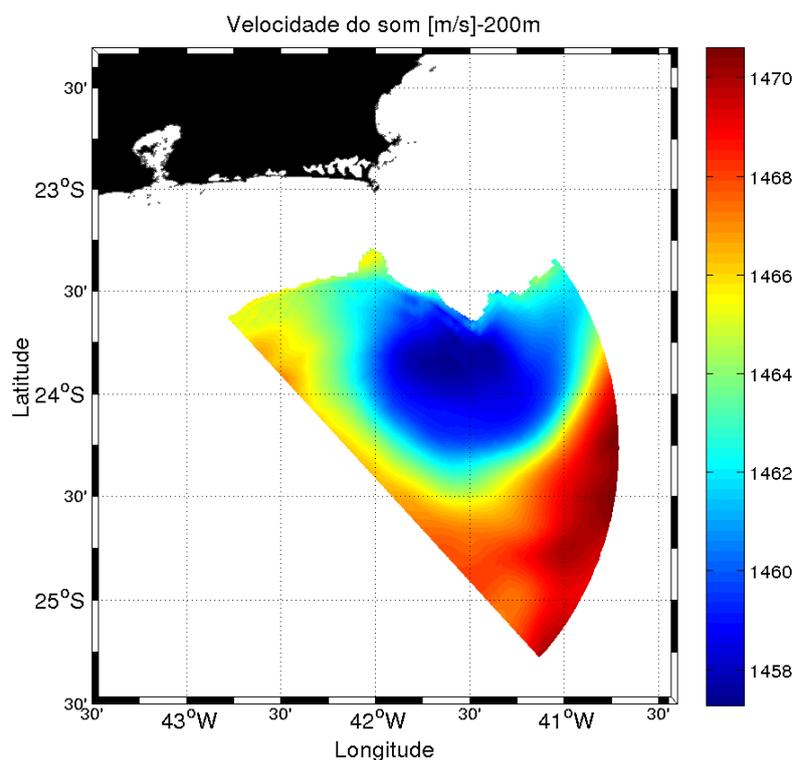


Figura 4.32: Campo sinótico horizontal de velocidade do som para a profundidade de 200 metros.

da feição de mesoescala, e também pela distância da fonte. Este mesmo padrão de variação das perdas na propagação também fica evidente nas seções verticais apresentadas anteriormente; onde as profundidades de 50 e 200 metros não parecem apresentar grande variação, entre si, nas perdas na propagação (figuras 4.9 e 4.13).

Diferenças mais significativas de TL, possivelmente, seriam observadas se houvesse uma camada de mistura bem demarcada e mais profunda. Neste caso, as perdas seriam menores na seção horizontal mais rasa (50 metros). No entanto, a presença do vórtice ciclônico implicaria na diminuição da espessura da camada de mistura, como observado por Baer (1980), onde a inclinação positiva das isopicnais não somente causou o estreitamento da camada de mistura, como do canal SOFAR. Vórtices anticiclônicos, por outro lado, podem causar o aumento da espessura do canal SOFAR, conforme observado por Vastano & Owens (1973), Watson *et al.* (1976), Baer (1981) e Jian *et al.* (2009).

Outro fato que pode explicar esta ausência de diferença entre as perdas na propagação na camada de mistura e na termoclina, é a profundidade em que a fonte foi

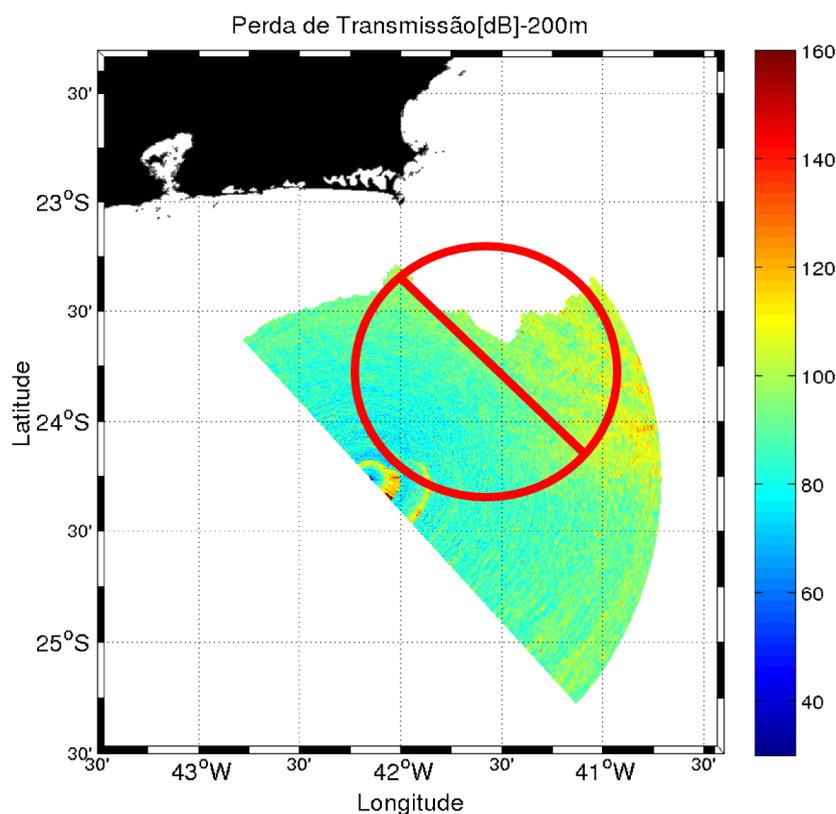


Figura 4.33: Perfil horizontal de TL na profundidade de 200 metros para o sinal emitido na frequência de 100 Hz. O círculo vermelho representa os limites horizontais do vórtice.

posicionada. Segundo Jones *et al.* (2013) e Ren *et al.* (2012), as variações de TL são altamente dependentes do posicionamento da fonte, como numa camada de mistura (ou em um duto de superfície) ou na termoclina. Alguns experimentos acústicos anteriores (Mellberg *et al.*, 1991; Weinberg & Zabalgoeazcoa, 1977; Jian *et al.*, 2009) consideraram posições da fonte em profundidades maiores, como 150, 280 e até 1500 metros, para melhor avaliar as perdas na propagação ao longo de vórtices ciclônicos. O presente trabalho poderia ter considerado o posicionamento da fonte em diferentes profundidades, no entanto, o que justifica a profundidade de 5 metros é tornar o experimento o mais aplicado possível, simulando o casco de uma embarcação. Jones *et al.* (2013) ainda afirmou que tão significativo quanto o posicionamento da fonte, é a dos receptores. Caso a fonte esteja localizada na camada de mistura e os receptores estejam na termoclina, esta pode funcionar como uma zona de sombra para o receptor e os valores de TL serão muito altos. O que não é o caso desse trabalho, que apresenta uma malha densa de hidrofones dispostos

lateralmente e verticalmente ao longo de toda coluna de água.

Uma das limitações da metodologia aplicada neste cenário é a mesma considerar como negligenciável as curvaturas horizontais no padrão de raios. Ou seja, desconsidera o fenômeno da 'refração horizontal' (Weston, 1961). De fato, esta aproximação pode ser verdadeira se verificarmos as grandes diferenças nos gradientes horizontais e verticais de temperatura e velocidade do som de um vórtice (figura 4.8).

Por exemplo, analisando a figura 4.8, e considerando a extensão do VCF como 500 metros de profundidade (Soutelino *et al.*, 2013), identifica-se na porção central do vórtice uma variação vertical de velocidade do som da ordem de 70 m/s (1550 m/s na superfície e 1480 m/s a 500 metros de profundidade). Neste caso, o gradiente vertical de velocidade do som é, aproximadamente, 1 m/s a cada 7 metros de profundidade (ordem de grandeza de 10^{-1}).

Por outro lado, analisando a figura 4.28, é possível observar um menor gradiente horizontal de velocidade do som. No início do vórtice, a velocidade do som apresenta valores próximos a 1495 m/s, enquanto que na porção central o seu valor é de 1475 m/s. Considerando a distância de 50 km entre estes pontos, o gradiente horizontal de velocidade do som é, aproximadamente, 1m/s a cada 2500 metros (ordem de grandeza de 10^{-3}).

Estas diferenças nas ordens de grandeza dos gradientes verticais e horizontais de velocidade do som permitem validar a metodologia utilizada neste trabalho (abordagem Nx2D). Ou seja, é possível negligenciar os efeitos da 'refração horizontal' para estudos referentes a frentes oceânicas e vórtices. Jensen *et al.* (2011) afirmou que a evolução computacional permitiu o desenvolvimento de modelos acústicos tridimensionais, o que era impossível anteriormente. Entretanto, há poucos modelos acústicos neste sentido, e o custo computacional associado é bastante alto. Para Jensen *et al.* (2011), os contrastes acústicos associados com fenômenos oceanográficos, como frentes, vórtices e plumas normalmente são fracos. Neste caso, os efeitos tridimensionais associados (refração horizontal, por exemplo) são muito pequenos se comparados com aqueles associados a montes submarinos, canyons e taludes, onde a batimetria é a principal forçante.

Esta metodologia tem sido bastante utilizada para aproximações horizontais de fenômenos tridimensionais, como observado nos trabalhos de Shapiro *et al.* (2014) e Chen *et al.* (2017) - que estudaram propagação acústica no Mar da Celta - e de Codato (2015) - que estudou os efeitos de uma frente de ressurgência costeira na propagação acústica. Entretanto, quando os efeitos batimétricos são relevantes, Lee *et al.* (1990) e Duda *et al.* (2011) verificaram que modelos Nx2D não apresentam bons resultados, indicando o uso de modelos tridimensionais.

No que tange a probabilidade de um alvo ser detectado, verifica-se que, nas duas profundidades estudadas, o vórtice afetou da mesma forma o campo horizontal de TL. Ou seja, considerando as equações 3.4 e 3.5, o vórtice diminui as chances de um alvo ser detectado.

5. Considerações Finais

O vórtice de Cabo Frio foi caracterizado por meio dos campos termohalinos do modelo ROMS e de dados coletados *in situ*. Estes dados revelaram a assinatura térmica de um vórtice ciclônico de mesoescala e evidenciaram um intenso gradiente de temperatura desde as bordas até o centro desta feição. Estes dados mostraram-se condizentes com a assinatura frontal térmica obtida através de dados orbitais do mesmo dia.

Na presença do vórtice ciclônico tornou-se notável a inclinação positiva das isopicnais e das isolinhas de velocidade do som em direção a superfície. Como consequência, águas mais frias foram levadas à superfície e implicaram na diminuição da velocidade do som nessa região. Esta elevação das linhas de mesma densidade ocasionou o estreitamento da camada de mistura, principalmente no centro do vórtice.

O VCF simulado apresentou influência nas perdas do sinal acústico emitido nas frequências de 100 Hz e 1500 Hz. Para ambas as frequências, as perdas na propagação do sinal aumentaram de maneira significativa quando os raios acústicos encontraram a frente de temperatura, na borda do vórtice e tornaram-se ainda mais significativas a partir do centro do vórtice.

Para o sinal emitido na frequência de 100 Hz, foram observadas perdas na propagação médias de até 130 dB na presença do vórtice e de até 110 dB na ausência do vórtice; enquanto para a frequência de 1500 Hz, as perdas foram de até 145 dB na presença do vórtice e de até 125 dB na ausência do vórtice. Os valores de TL médios foram maiores para a frequência de 1500 Hz, justificados pelo alcance do sinal.

Para o vórtice observado, a variação média de TL para a frequência de 100 Hz foi de até 120 dB e para a seção sem o vórtice foi de até 100 dB; enquanto para a frequência de 1500 Hz, a variação média de TL foi de até 130 dB e para a seção sem o vórtice de até

110 dB.

Torna-se evidente que o vórtice observado causou menores perdas na propagação de sinal (de até 120 dB) quando comparado ao vórtice simulado (de até 160 dB). Esta diferença pode estar associada principalmente ao conjunto de dados, e, também, ao tamanho da seção. De uma maneira geral, a presença dos vórtices ciclônicos originados a partir de dados *in situ* e de dados de modelos numéricos, causaram uma perda média de propagação de até 20 dB a mais que na ausência dessas feições. Estes resultados estão de acordo com estudos anteriores que observaram que um vórtice ciclônico pode causar variações de 20 a 40 dB em um sinal emitido.

Pode-se afirmar então que os vórtices ciclônicos provenientes de modelagem numérica e de dados *in situ* influenciaram da mesma forma as perdas na propagação em uma coluna de água e as chances de um alvo ser detectado; o que confirma que modelos numéricos hidrodinâmicos podem certamente ser utilizados para representar a estrutura de feições de mesoescala em experimentos acústicos. A capacidade de modelos numéricos de representar feições de mesoescala também foi analisada por (Codato *et al.*, 2013). Este autor utilizou um MROF da ressurgência costeira de Cabo Frio como campo inicial para o modelo hidrodinâmico ROMS que resultou em um campo oceanográfico de extrema coerência com dados coletados *in situ*, representando adequadamente o impacto da ressurgência na refração da energia acústica.

Os mapas horizontais (180°) de TL originados a partir de um sinal emitido na frequência de 100 Hz mostraram que o vórtice age de forma a aumentar a perda na propagação gradualmente, conforme aumenta o gradiente negativo de temperatura. O mapa 180° gerado para a profundidade de 50 metros, representando a camada de mistura, mostrou que a perda foi maior a partir do centro do vórtice; o que corrobora os resultados encontrados nos perfis verticais de TL. As maiores perdas (de até 120 dB) foram observadas no fim da seção circular e nas proximidades da costa que correspondem às temperaturas mais baixas e aos menores valores de velocidade do som.

A presença do vórtice de Cabo Frio diminuiu as diferenças significativas de TL que poderiam haver entre diferentes profundidades; visto que foram observados os mesmos

valores de TL (de até 120 dB) para a camada de mistura e para a termoclina (profundidade de 200 metros). Desta maneira, a profundidade de navegação do alvo submarino não influenciou na TL, e sim, o posicionamento deste em relação a fonte.

Este trabalho foi o primeiro a avaliar a influência de um vórtice ciclônico de mesoescala da Corrente do Brasil na propagação acústica. Outrossim, promoveu a interação de duas áreas de estudo, a acústica submarina e a oceanografia, por meio de modelagem numérica e análise de dados coletados *in situ* no escopo de diferentes projetos de pesquisa. A utilização destes dois conjuntos de dados permitiu validar a utilização de modelos numéricos hidrodinâmicos para finalidades de previsão do campo acústico.

Um tópico importante a ser citado é que vórtices oceânicos são feições com características tridimensionais, ou seja, com uma variação de suas propriedades físicas com a distância latitudinal, longitudinal e com a profundidade. Desta maneira, é fato que os resultados aqui apresentados possuem limitações, por negligenciar os efeitos azimutais na propagação sonora. Entretanto, a literatura mostra que esta é uma aproximação passível de ser realizada, já que os gradientes horizontais de velocidade do som são muito menores que os gradientes verticais. Todavia, a aplicação de um modelo 3D permitiria validar esta afirmação, como também permitiria avaliar mais corretamente os efeitos da topografia de fundo.

Este trabalho apresentou, principalmente, um viés acadêmico. Contudo, estudos futuros podem utilizar os resultados obtidos para avaliar os efeitos da presença de vórtices de mesoescala na propagação acústica, com um enfoque militar, como para o planejamento tático de operações navais.

Por meio dos resultados obtidos nesta dissertação, sugere-se que as interferências acústicas geradas, devidos as perdas na propagação, sejam utilizadas em trabalhos futuros para constatar a presença de vórtices por inversão acústica.

Bibliografia

Amante, C. and Eakins, B. W. (2009), *ETOPO1 1 arc-minute global relief model: procedures, data sources and analysis*, US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Environmental Satellite, Data, and Information Service, National Geophysical Data Center, Marine Geology and Geophysics Division Colorado.

Baer, R. N. (1980), ‘Calculations of sound propagation through an eddy’, *The Journal of the Acoustical Society of America* **67**(4), 1180–1185.

Baer, R. N. (1981), ‘Propagation through a three-dimensional eddy including effects on an array’, *The Journal of the Acoustical Society of America* **69**(1), 70–75.

Buckingham, M. J. (1992), *Ocean-acoustic propagation models*, EUR-OP.

Calado, L. (2001), Dinâmica da formação dos meandros e vórtices da corrente do Brasil, ao largo do sudeste brasileiro, Dissertação de Mestrado, Universidade de São Paulo.

Calado, L. (2006), Dinâmica da interação da atividade de meso-escala da Corrente do Brasil com o fenômeno da ressurgência costeira ao largo de Cabo Frio e Cabo de São Tomé, RJ, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.

Calado, L., Da Silveira, I., Gangopadhyay, A. and De Castro, B. (2010), ‘Eddy-induced upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil)’, *Continental Shelf Research* **30**(10), 1181–1188.

Calado, L., Gangopadhyay, A. and da Silveira, I. (2006), ‘A parametric model for the

- brazil current meanders and eddies off southeastern brazil', *Geophysical research letters* **33**(12).
- Calado, L., Gangopadhyay, A. and Da Silveira, I. (2008), 'Feature-oriented regional modeling and simulations (forms) for the western south atlantic: Southeastern brazil region', *Ocean Modelling* **25**(1), 48–64.
- Campos, E. (1995), 'Estudos da circulação oceânica no atlântico tropical e região oeste do atlântico subtropical sul', *Estudos da circulação oceânica no Atlântico tropical e na região oeste do Atlântico subtropical sul*.
- Campos, E., Ikeda, Y., Castro, B., Gaeta, S., Lorenzzetti, J. A. and Stevenson, M. R. (1996), 'Experiment studies circulation in the western south atlantic', *Eos, Transactions American Geophysical Union* **77**(27), 253–259.
- Campos, E. J., Gonçalves, J. and Ikeda, Y. (1995), 'Water mass characteristics and geostrophic circulation in the south brazil bight: Summer of 1991', *Journal of Geophysical Research: Oceans* **100**(C9), 18537–18550.
- Campos, E. J., Velhote, D. and da Silveira, I. C. (2000), 'Shelf break upwelling driven by brazil current cyclonic meanders', *Geophysical Research Letters* **27**(6), 751–754.
- Carrière, O., Hermand, J.-P., Calado, L., de Paula, A. C. and da Silveira, I. C. A. (2010), Range-dependent acoustic tomography by oceanic feature modeling for the monitoring of upwelling (cabo frio, brazil), in 'OCEANS 2010 IEEE-Sydney', IEEE, pp. 1–7.
- Chen, F., Shapiro, G., Bennett, K. A., Ingram, S., Thompson, D., Vincent, C., Russell, D. and Embling, C. (2017), 'Shipping noise in a dynamic sea: a case study of grey seals in the celtic sea', *Marine Pollution Bulletin* **114**(1), 372–383.
- Codato, G. A. S. (2015), Previsao numerica da perda do sinal acustico submarino na regioao da ressurgencia costeira de cabo frio - rj, Dissertacao de Mestrado, Universidade Federal Fluminense.

- Codato, G., Calado, L., Martins, N. E., Watanabe, W. D., Domingues, R. M. and Jesus, S. (2013), Acoustic prediction using a feature-oriented regional modeling system and acoustic inversion, *in* ‘Proceedings of Meetings on Acoustics’, Vol. 17, Acoustical Society of America, p. 070052.
- Colling, A. (2001), *Ocean circulation*, Vol. 3, Butterworth-Heinemann.
- Dias, R. J. S. (2015), Morfologia e sedimentação na Plataforma Continental Externa e Talude ao largo da Ilha de São Sebastião-SP, Tese de Doutorado, Universidade de São Paulo.
- Duda, T. F., Lin, Y.-T., Zhang, W. G., Cornuelle, B. D. and Lermusiaux, P. F. (2011), ‘Computational studies of three-dimensional ocean sound fields in areas of complex seafloor topography and active ocean dynamics’.
- Etter, P. C. (1989), ‘Underwater acoustic modeling for antisubmarine warfare.’, *Sea Technology* **30**(5), 35–37.
- Etter, P. C. (2013), *Underwater acoustic modeling and simulation*, CRC Press.
- Ey, E. and Rodriguez, O. C. (2012), ctraceo-user manual, Technical report, Tech. report, CINTAL, Faro, Portugal.
- Fernandes, A. M., da Silveira, I. C., Calado, L., Campos, E. J. and Paiva, A. M. (2009), ‘A two-layer approximation to the brazil current–intermediate western boundary current system between 20° s and 28° s’, *Ocean Modelling* **29**(2), 154–158.
- Fofonoff, N. (1985), ‘Physical properties of seawater: A new salinity scale and equation of state for seawater’, *J. geophys. Res* **90**(C2), 3332–3342.
- Fofonoff, N. P. and Millard, R. C. (1983), *Algorithms for computation of fundamental properties of seawater*, Unesco.
- Fox, M. S. (1992), The tove project towards a common-sense model of the enterprise, *in* ‘International Conference on Industrial, Engineering and Other Applications of Applied Intelligent Systems’, Springer, pp. 25–34.

- Gangopadhyay, A., Robinson, A. and Arango, H. (1997), ‘Circulation and dynamics of the western north atlantic. part i: Multiscale feature models’, *Journal of Atmospheric and Oceanic Technology* **14**(6), 1314–1332.
- Gangopadhyay, A. and Robinson, A. R. (2002), ‘Feature-oriented regional modeling of oceanic fronts’, *Dynamics of Atmospheres and Oceans* **36**(1), 201–232.
- Garfield, N. (1990), The Brazil Current at subtropical latitudes, Tese de Doutorado, University of Rhode Island.
- Gemmill, W. and Khedouri, E. (1974), A note on sound ray tracing through a gulf stream eddy in the sargasso sea., Technical report, DTIC Document.
- Heathershaw, A., Stretch, C. and Maskell, S. (1991), ‘Coupled ocean-acoustic model studies of sound propagation through a front’, *The Journal of the Acoustical Society of America* **89**(1), 145–155.
- Henrick, R., Siegmann, W. and Jacobson, M. (1977), ‘General analysis of ocean eddy effects for sound transmission applications’, *The Journal of the Acoustical Society of America* **62**(4), 860–870.
- Itzikowitz, S., Jacobson, M. and Siegmann, W. (1982), ‘Short-range acoustic transmissions through cyclonic eddies between a submerged source and receiver’, *The Journal of the Acoustical Society of America* **71**(5), 1131–1144.
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B. and Schmidt, H. (2000), *Computational ocean acoustics*, Springer Science & Business Media.
- Jensen, F. B., Kuperman, W. A., Porter, M. B. and Schmidt, H. (2011), *Computational ocean acoustics*, Springer Science & Business Media.
- Jian, Y., Zhang, J., Liu, Q. and Wang, Y. (2009), ‘Effect of mesoscale eddies on underwater sound propagation’, *Applied Acoustics* **70**(3), 432–440.

- Jones, A. D., Zinoviev, A. and Greening, M. V. (2013), A study of the effects on transmission loss of water column features as modelled for an area off the east Australian coast, *in* 'Proceedings of Acoustics', pp. 17–20.
- Lee, D., Schultz, M. and Saad, Y. (1990), 'A three-dimensional wide angle wave equation with vertical density variations', *Computational Acoustics* **1**, 143–155.
- Li, L., Nowlin, W. D. and Jilan, S. (1998), 'Anticyclonic rings from the kuroshio in the south china sea', *Deep Sea Research Part I: Oceanographic Research Papers* **45**(9), 1469–1482.
- Locarnini, R., Mishonov, A., Antonov, J., Boyer, T. and Garcia, H. (2006), *World ocean atlas 2005. Vol. 1: Temperature*, National Oceanic and Atmospheric Administration.
- Lorenzetti, J. A., Stech, J. L., Mello Filho, W. L. and Assireu, A. T. (2009), 'Satellite observation of Brazil current inshore thermal front in the SW South Atlantic: Space/time variability and sea surface temperatures', *Continental Shelf Research* **29**(17), 2061–2068.
- Lü, L.-G., Qiao, F., Chen, H.-X. and Yuan, Y.-L. (2006), 'Acoustic transmission in the cold eddy in the southern East China Sea', *Journal of Geophysical Research: Oceans* **111**(C11).
- Mano, M. F., Paiva, A. M., Torres Jr, A. R. and Coutinho, A. L. (2009), 'Energy flux to a cyclonic eddy off Cabo Frio, Brazil', *Journal of Physical Oceanography* **39**(11), 2999–3010.
- Mascarenhas, A. d. S., Miranda, L. d. and Rock, N. (1971), 'A study of the oceanographic conditions in the region of Cabo Frio', *Fertility of the sea. New York, Gordon & Breach* **1**, 285–308.
- Mellberg, L. E., Robinson, A. R. and Botseas, G. (1991), 'Azimuthal variation of low-frequency acoustic propagation through asymmetric Gulf Stream eddies', *The Journal of the Acoustical Society of America* **89**(5), 2157–2167.

- Miguens, A. (2006), 'Navegação: A ciência e a arte, volume iii—navegação eletrônica e em condições especiais', *Manual de Navegação, DHN* .
- Moore, A. M., Arango, H. G., Di Lorenzo, E., Cornuelle, B. D., Miller, A. J. and Neilson, D. J. (2004), 'A comprehensive ocean prediction and analysis system based on the tangent linear and adjoint of a regional ocean model', *Ocean Modelling* **7**(1), 227–258.
- Müller, T. J., Ikeda, Y., Zangenberg, N. and Nonato, L. V. (1998), 'Direct measurements of western boundary currents off Brazil between 20°S and 28°S', *Journal of Geophysical Research: Oceans* **103**(C3), 5429–5437.
- Munk, W. H. (1980), 'Horizontal deflection of acoustic paths by mesoscale eddies', *Journal of Physical Oceanography* **10**(4), 596–604.
- Munk, W. and Wunsch, C. (1979), 'Ocean acoustic tomography: A scheme for large scale monitoring', *Deep Sea Research Part A. Oceanographic Research Papers* **26**(2), 123–161.
- Palóczy, A., Da Silveira, I., Castro, B. and Calado, L. (2014), 'Coastal upwelling off Cape São Tomé (22°S, Brazil): The supporting role of deep ocean processes', *Continental Shelf Research* **89**, 38–50.
- Parker, C. E. (1971), Gulf stream rings in the Sargasso sea, in 'Deep Sea Research and Oceanographic Abstracts', Vol. 18, Elsevier, pp. 981–993.
- Paula, A. C. and Calado, L. (2008), 'Dados oceanográficos coletados por aeronave de asa rotativa - DOCAAR', *A Ressurgência* **2**, 13–15.
- Porter, M. B. (2011), 'The bellhop manual and users guide', *Heat, Light, and Sound Research, Inc., La Jolla, CA, USA, Tech. Rep* .
- Ren, Z., Hong-jun, F., Jia-xun, L. and Chen-zhao, L. (2012), 'Modeling of ocean mesoscale eddy and its application in the underwater acoustic propagation.', *Marine Science Bulletin* **14**(1), 1–15.
- Robinson, A. R. (1999), 'Forecasting and simulating', *Coastal and Estuarine Studies* **56**, 77–99.

- Robinson, A. R., Spall, M. A. and Pinardi, N. (1988), ‘Gulf stream simulations and the dynamics of ring and meander processes’, *Journal of Physical Oceanography* **18**(12), 1811–1854.
- Rocha, C. B., Silveira, I. C., Castro, B. M. and Lima, J. A. M. (2014), ‘Vertical structure, energetics, and dynamics of the brazil current system at 22 s–28 s’, *Journal of Geophysical Research: Oceans* **119**(1), 52–69.
- Rodriguez, O. C. (2011), ‘The traceo ray tracing program’, *SiPLAB Web page*: <http://www.siplab.fct.ualg.pt/models/traceo/>.
- Rossby, C.-G. (1938), ‘On the mutual adjustment of pressure and velocity distributions in certain simple current systems, ii’, *Journal of Marine Research* **1**(3), 239–263.
- Sartori Neto, A., Soares, V., Lima, J., Ribeiro, C. and Griffith, J. (2005), Análise de imagens termais avhrr utilizando transformada de fourier para determinação de padrões em vórtices e meandros, in *in ‘XII Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto’*, pp. 3671–3678.
- Schmid, C., Schäfer, H., Zenk, W. and Podestá, G. (1995), ‘The vitória eddy and its relation to the brazil current’, *Journal of physical oceanography* **25**(11), 2532–2546.
- Shapiro, G., Chen, F. and Thain, R. (2014), ‘The effect of ocean fronts on acoustic wave propagation in the celtic sea’, *Journal of Marine Systems* **139**, 217–226.
- Shchepetkin, A. F. and McWilliams, J. C. (2005), ‘The regional oceanic modeling system (roms): a split-explicit, free-surface, topography-following-coordinate oceanic model’, *Ocean Modelling* **9**(4), 347–404.
- Signorini, S. R. (1978), ‘On the circulation and the volume transport of the brazil current between the cape of são tomé and guanabara bay’, *Deep Sea Research* **25**(5), 481–490.
- Silveira, I. C. A., Schmidt, A. C. K., Campos, E. J. D., de Godoi, S. S. and Ikeda, Y. (2000), ‘A corrente do brasil ao largo da costa leste brasileira’, *Revista Brasileira de Oceanografia* **48**(2), 171–183.

- Silveira, I., Calado, L., Castro, B., Cirano, M., Lima, J. and Mascarenhas, A. d. S. (2004), ‘On the baroclinic structure of the brazil current–intermediate western boundary current system at 22–23 s’, *Geophysical Research Letters* **31**(14).
- Silveira, I., Lima, J., Schmidt, A., Ceccopieri, W., Sartori, A., Francisco, C. and Fontes, R. (2008), ‘Is the meander growth in the brazil current system off southeast brazil due to baroclinic instability?’, *Dynamics of Atmospheres and Oceans* **45**(3), 187–207.
- Simoës, I., Xavier, F., Barreira, L., Artusi, L., Macedo, H., Alvarez, Y., Romano, R. and Hermand, J. P. (2012), ‘Medicoes geoacusticas em sedimentos marinhos da plataforma continental proxima a arraial do cabo’, *Jornadas de Engenharia Hidrografica* .
- Small, J., Shackleford, L. and Pavey, G. (1997), Ocean feature models–their use and effectiveness in ocean acoustic forecasting, *in* ‘Annales Geophysicae’, Vol. 15, Springer, pp. 101–112.
- Song, Y. and Haidvogel, D. (1994), ‘A semi-implicit ocean circulation model using a generalized topography-following coordinate system’, *Journal of Computational Physics* **115**(1), 228–244.
- Soutelino, R. G., Miranda, J. A., Calado, L. and Couto, P. P. (2013), ‘Captura sinotica de um vortice de mesoescala da corrente do brasil atraves de dados de xbt coletados por aeronave ao largo de arraial do cabo - rj’, *A Ressurgencia* **7**, 38–41.
- Soutelino, R. R. G. (2008), A origem da corrente do brasil, Dissertacao de Mestrado, Universidade de Sao Paulo.
- Vastano, A. C. and Owens, G. E. (1973), ‘On the acoustic characteristics of a gulf stream cyclonic ring’, *Journal of Physical Oceanography* **3**(4), 470–478.
- Watson, J., Siegmann, W. and Jacobson, M. (1976), ‘Deep-ocean dynamics for environmental acoustics models’, *The Journal of the Acoustical Society of America* **60**(2), 355–364.

- Weinberg, N. and Zabalgoeazcoa, X. (1977), 'Coherent ray propagation through a gulf stream ring', *The Journal of the Acoustical Society of America* **62**(4), 888–894.
- Weston, D. (1961), 'Horizontal refraction in a three-dimensional medium of variable stratification', *Proceedings of the Physical Society* **78**(1), 46.
- Wu, P.-m., Guo, X.-g. and Wu, R.-s. (2001), 'Analyses of sound velocity field in southwest-sea area off hengchun of taiwan', *Journal of Oceanography in Taiwan Strait* **20**(3), 286–290.
- Xavier, B. C. (2005), Modelos de Propagação Acústica em Águas Rasas, Tese de Doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro.