



PROPAGAÇÃO ACÚSTICA NA ÁGUA MODAL SUBTROPICAL DO ATLÂNTICO SUL

CF Márcio B. Ferreira¹ / CF Vicente B. Junior² / Prof^a. Olga T. Sato³
Prof. Carlos E. P. Ribeiro⁴ / Piero S. Bernardo⁵ / Prof. Paulo S. Polito⁶

RESUMO

As águas modais constituem grandes volumes de água com estrutura vertical homogênea, distribuídas por extensas áreas do oceano em espessas camadas. Embora bem investigadas no Hemisfério Norte, o mesmo ainda não acontece no Atlântico Sul, sendo escasso o conhecimento acerca dos processos de formação dessas feições, bem como as informações sobre o seu volume médio, variabilidade e periodicidade. A homogeneidade termohalina desse fenômeno suscitou a realização do presente trabalho, que visa investigar a influência das Águas Modais Subtropicais na propagação acústica do Atlântico Sul, por meio da identificação das mesmas a partir de dados coletados *in situ* e do emprego de modelos numéricos de propagação do som no mar. Foi possível observar, por meio de simulações realizadas com uso do modelo de traçado de raios TRACEO, o aspecto refratário

desse extenso volume de água para a emissão de fontes sonoras posicionadas em diferentes coordenadas e profundidades. Fenômenos de formação de dutos sonoros em profundidades médias, zonas de sombra e outras áreas de intensificação ou enfraquecimento da energia acústica puderam ser percebidos em função dos diferentes parâmetros geométricos prescritos para o modelo, demonstrando ser a Água Modal Subtropical um cenário muito interessante em termos acústicos.

Palavras-chave:

Propagação Acústica; Água Modal; Atlântico Sul.

ABSTRACT

Mode waters correspond to large volumes of water with homogeneous vertical structure spread over extensive and thick

¹ Aluno de Doutorado em Oceanografia Física (Universidade de São Paulo – USP), Hidrógrafo, MSc em Oceanografia Física pela USP (2010).

² Aluno de Doutorado em Engenharia Oceânica (COPPE/UFRJ), Hidrógrafo, MSc em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ (2009).

³ Professora do IO-USP e pesquisadora do Laboratório de Oceanografia por Satélites (LOS), MSc em Oceanografia Física pela USP (1989), DSc em Oceanografia Física pela University of Rhode Island (1997).

⁴ Professor do Programa de Engenharia Oceânica da COPPE/UFRJ e pesquisador do Laboratório de Instrumentação Oceanográfica (LIOc), MSc em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ (1977), DSc em Engenharia Oceânica pela COPPE/UFRJ (1999).

⁵ Aluno de Mestrado em Oceanografia Física (Universidade de São Paulo – USP), Bacharel em Oceanografia pela USP (2013).

⁶ Professor do IO-USP e pesquisador do Laboratório de Oceanografia por Satélites (LOS), DSc em Oceanografia Física pela University of Rhode Island (1997).

layers of the upper oceans. Although well investigated in the Northern Hemisphere, it still not well known in the South Atlantic, including its formation processes, as well as an estimation of its average volume, variability and periodicity. The thermohaline homogeneity of this phenomenon is the motivation for the realization of this work, which aims to investigate the influence of Subtropical Mode Waters in the acoustic propagation in the South Atlantic by identifying them from collected in situ data and the use of numerical models of propagation of sound in the sea. It was possible to observe, by simulations carried out with TRACEO ray tracing model, the refractory aspect of this large volume of water to the emission of acoustic sources positioned at different coordinates and depths. Phenomena such as ducts formation in medium depths, shadow zones and other intensification or weakening of acoustic energy could be realized due to the different geometric parameters prescribed to the model, showing that Subtropical Mode Waters are a very interesting scenario in acoustic terms.

Keywords:

Acoustic Propagation; Mode Water; South Atlantic.

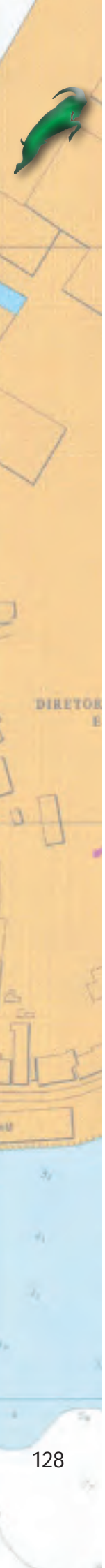
1. INTRODUÇÃO

Por suas características termodinâmicas, algumas regiões dos oceanos favorecem particularmente a formação de águas modais, constituídas por um grande volume de água do mar que se destaca em relação a sua vizinhança por possuir características homogêneas por toda sua extensão, tanto horizontal quanto vertical. As regiões de encontro de Correntes de Contorno Oeste (CCO), no limite mais próximo dos polos nos giros subtropicais, constituem exemplos típicos de áreas de formação de um tipo específico de água modal, a subtropical. No Atlântico Sudoeste essa região de encontro

recebe o nome de Confluência Brasil-Malvinas (CBM) e ocorre aproximadamente entre as latitudes de 36°S e 38°S, onde a Corrente do Brasil (CB) se afasta da costa, devido ao encontro de suas águas quentes e salinas com as águas de origem subpolar da Corrente das Malvinas (CM) (GARZOLI & GARRAFO, 1989).

A região da CBM congrega diversos fatores da termodinâmica regional: no oceano ocorre uma intensa troca de calor devido ao encontro de correntes cujas características são muito contrastantes, além disso, sobre essa região a circulação atmosférica transporta massas de ar polar frio e seco. Como resultado, o oceano perde calor para a atmosfera, ou seja, o balanço negativo de calor total do oceano para a atmosfera que ocorre durante o inverno é o gatilho para a formação de grandes volumes de águas modais nessas regiões. Essa perda de calor do oceano redundando no decréscimo do empuxo destas massas d'água formadas, provocando o movimento das mesmas da superfície para camadas abaixo da superfície. Assim, águas resfriadas na superfície são deslocadas para baixo devido a esse processo convectivo.

O movimento convectivo gerado durante os invernos incrementa a mistura vertical das camadas da superfície até o fundo da camada de mistura, provocando o espessamento dessa camada em relação ao observado nas outras estações do ano. Nas regiões propícias à formação de água modal, a camada de mistura comumente formada tende a ser mais profunda especificamente devido à intensidade dos processos de perda de calor pela superfície (SATO & POLITO, 2014). Posteriormente, com o desenvolvimento da termoclina sazonal, durante a primavera e o verão a reestratificação das camadas superiores provoca o isolamento da superfície dessa camada de mistura profunda gerada no inverno. Com isso, têm-se a água modal formada e confinada abaixo da termoclina sazonal e acima da termoclina permanente, com suas temperatura, salinidade e vorticidade potencial características



homogêneas e bem definidas (PROVOST *et al.* 1999). Ao longo do ano, esse volume de água modal, estando sujeito à ação da dinâmica da circulação local, sofrerá advecção ao longo de sua isopicnal e dissipação, provocando sua migração para regiões distantes de seu local de formação (DOUGLASS *et al.*, 2013).

Assim sendo, a região compreendida entre o fluxo principal da Corrente do Brasil (CB) e o seu lóbulo de retroflexão apresenta aspectos propícios para a formação de um espesso volume de água modal ao norte da frente e no lado mais quente desta, onde se encontra a CB. Tal região tem ainda potencializada sua capacidade de formação desta água modal devido à grande perda de calor latente ocorrida durante o inverno conforme mencionado anteriormente.

A influência na acústica submarina de grandes áreas contendo fluidos homogêneos, tais como as regiões que contêm águas modais, pode ser significativa e dessa forma é fundamental para o correto emprego do som para o monitoramento de processos oceânicos.

De uso já consagrado para detecção, identificação e comunicação submarina, o som constitui uma importante ferramenta de sensoriamento remoto. A aplicação de técnicas acústicas para sensoriamento remoto do oceano se enquadra na chamada Oceanografia Acústica (CLAY & MEDWIN, 1977; MEDWIN & CLAY, 1997; ETTER, 2003). A Oceanografia Acústica tem como objetivo principal a utilização, ativa ou passiva, do som, com o intuito de estudar os parâmetros e processos físicos, geológicos, biológicos e químicos do mar. Vários métodos acústicos são usados para o estudo de diversos tipos de processos oceanográficos. Com caráter interdisciplinar, a Oceanografia Acústica contribui para o estudo de fenômenos e propriedades investigados em diversos ramos da Oceanografia.

A variação vertical de temperatura afeta, consideravelmente, a propagação acústica no mar e, por conseguinte, o desempenho de

sistemas SONAR (do inglês *Sound NAVigation and Ranging*). Gradientes de salinidade também afetam a velocidade do som, mas seus efeitos, na maior parte dos casos, podem ser desprezados quando comparados aos efeitos dos gradientes de temperatura (CLAY & MEDWIN, 1977). Um dos obstáculos que impede a adequada caracterização da variabilidade da temperatura oceânica tem sido a falta de medições sinóticas (simultâneas).

A homogeneidade termohalina característica da Água Modal Subtropical (AMST), por sua vez, provoca (dentro da camada de ocorrência da AMST) o ligeiro aumento da velocidade do som com a profundidade. Tal afirmativa pode ser facilmente demonstrada em função da dependência dos termos de temperatura (T), salinidade (S) e profundidade (z) na expressão da velocidade de propagação do som (c) (MEDWIN & CLAY, 1997), conforme a seguir:

$$c = 1449,2 + 4,6 T - 0,055 T^2 + 0,00029 T^3 + (1,34 - 0,01 T) (S - 35) + 0,016 z$$

Abaixo da camada de ocorrência da AMST, a temperatura da água diminui lentamente até alcançar a temperatura típica da camada profunda. Nessa região, a velocidade do som tende também a diminuir com a profundidade. Esse padrão provoca, devido ao efeito da refração, a curvatura dos raios sonoros para o fundo e, conseqüentemente, redução do alcance da energia acústica em distância horizontal e formação de áreas de sombra.

Por outro lado, fontes acústicas posicionadas em profundidades correspondentes a pontos de mínimos locais de velocidade do som dentro da camada de ocorrência da AMST podem sofrer os efeitos de dutos sonoros em profundidades de algumas centenas de metros, ocasionando a propagação acústica a grandes distâncias (sobretudo com o uso de baixas frequências). Tais peculiaridades da propagação sonora associadas ao fenômeno da AMST e

também ao aspecto do relevo submarino local credenciam as Águas Modais como um vasto e intrigante campo de pesquisa.

2. METODOLOGIA

2.1. ESTRATÉGIA AMOSTRAL

Para este estudo, foi utilizado um conjunto de dados composto por médias mensais de temperatura e salinidade obtidas a partir de dados hidrográficos *in situ*, oriundos do sistema *In Situ Analysis System* (ISAS) (GAILLARD et al., 2009) desenvolvido e mantido pelo *Laboratoire de Physique des Océans* (LPO) pertencente ao *Institut Français de Recherche pour l'Exploitation de La Mer* (Ifremer) e coletados por meio de perfiladores Argo, CTD (do inglês *Conductivity, Temperature and Depth*) e XBT (do

inglês *eXpendable BathyThermograph*) para detecção da AMST no sudoeste do Atlântico Sul, no período de 2002 a 2012.

O mapa da frequência em que um determinado ponto no espaço apresenta um perfil com amostras da AMST (persistência) nos meses de abril e maio do período de dez anos supracitado (figura 1) serviu de referência para o planejamento das 45 estações oceanográficas do cruzeiro, na área compreendida entre as latitudes de 30° e 38°S e as longitudes de 30° e 40°W, realizadas pelo Navio Hidroceanográfico (NHo) "Cruzeiro do Sul" (H-38), da Marinha do Brasil (MB), entre 1º de abril e 8 de maio de 2015. Essa campanha constituiu o primeiro cruzeiro oceanográfico planejado e conduzido exclusivamente para o estudo de Águas Modais Subtropicais no Atlântico Sul de que se tem registro.

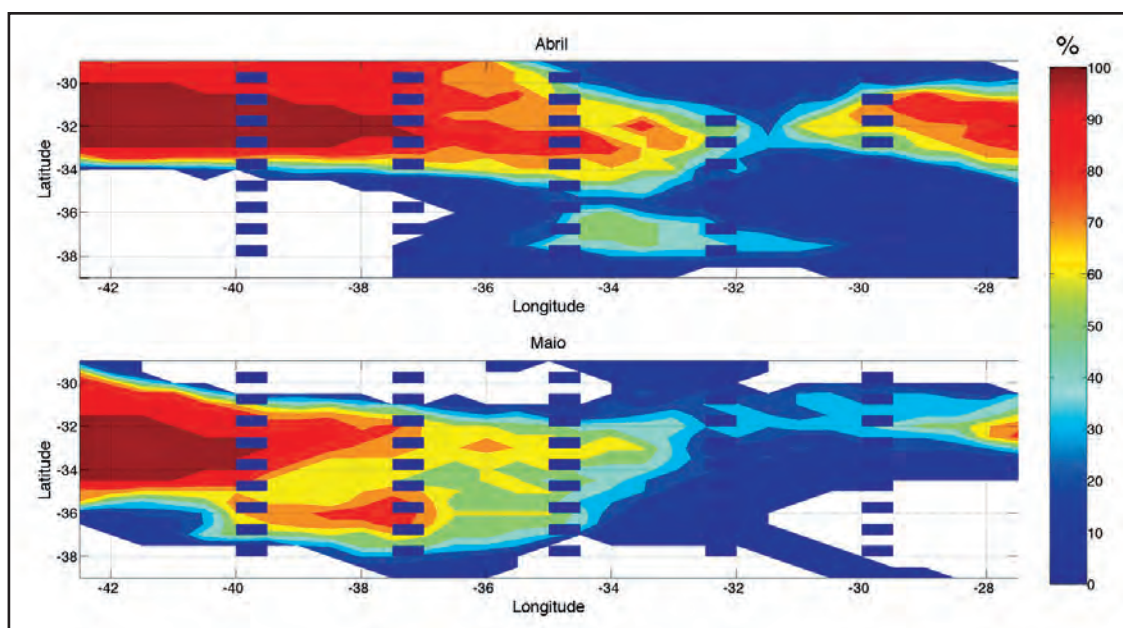



Figura 1 – Persistência da AMST em % de ocorrências ao longo de dez anos a partir de médias mensais obtidas de observações por dados hidrográficos *in situ*. As 45 estações planejadas para o cruzeiro oceanográfico estão assinaladas pelos retângulos azuis. As áreas em branco indicam que não houve ocorrência de água modal durante o referido mês em todos os anos da série temporal (de 2002 a 2012).

2.2. PROCESSAMENTO DE DADOS COLETADOS

Durante o cruzeiro, foram coletados dados em 45 estações oceanográficas com o

objetivo de obter parâmetros físicos que identifiquem a AMST possibilitando, também, maior compreensão sobre processos que ocorrem na região da Confluência Brasil-Malvinas. Para



tal, foi utilizado um conjunto CTD-Rosette que, além de realizar medições de salinidade (condutividade), temperatura e pressão (profundidade), também estava equipado com fluorímetro, turbidímetro e sensor de oxigênio dissolvido.

O tratamento inicial dos dados hidrográficos consistiu na aplicação de um filtro para remoção de valores maiores ou menores que 3 vezes o desvio padrão do trecho de coluna de água adjacente. Em seguida, foi realizado o cálculo da média em caixas, a fim de fazer com que os dados fossem regularmente espaçados na vertical, e realizada a interpolação horizontal 2-D por *spline* suave dos dados obtidos, por nível amostrado, de modo a obter a distribuição horizontal dos campos de temperatura, salinidade e densidade da água do mar numa grade regular de $1^\circ \times 1^\circ$, na área compreendida entre as latitudes de 30°S e 38°S e longitudes de 30°W a 40°W .

2.3. DETECÇÃO DA ÁGUA MODAL

Os mapas horizontais interpolados foram então sobrepostos, a fim de possibilitar o cálculo da vorticidade potencial (Q), desprezando a parcela devida à vorticidade relativa, sendo $Q = (f/\rho)(\partial\rho/\partial z)$, onde f é o parâmetro de Coriolis, ρ é a densidade potencial na camada e z é a coordenada vertical (HANAWA & TALLEY, 2001). Assim sendo, valores de Q menores que $1,5 \times 10^{-10} \text{m}^{-1}\text{s}^{-1}$ e gradiente vertical de temperatura menor que $0,01^\circ\text{C}/\text{m}$ foram classificados como possíveis amostras de água modal subtropical.

Posteriormente, apenas para os perfis classificados como contendo possíveis amostras de água modal subtropical, foi aplicado o critério de temperatura e salinidade médias de $15,0 \pm 0,9^\circ\text{C}$ e $35,6 \pm 0,2$, respectivamente, a fim de detectar aqueles que apresentaram a ocorrência confirmada de AMST por esses critérios (SATO & POLITO, 2014).

Foi possível observar a anisotropia da AMST, com variação das profundidades máxima,

mínima e espessura da camada variando com a latitude da estação oceanográfica. Na longitude média da área de estudo (35°W) notadamente verificou-se a existência de AMST nas 9 estações oceanográficas realizadas e de três regiões características diferentes.

2.4. SIMULAÇÕES ACÚSTICAS

Para simulação da propagação acústica associada ao fenômeno da AMST na área da pesquisa foi adotado o modelo de traçado de raios TRACEO (RODRÍGUEZ, 2011), desenvolvido no Laboratório de Processamento de Sinal (SiPLAB), Universidade do Algarve, Portugal.

Em modelos acústicos de traçado de raios, a solução de raios da Equação de Helmholtz representa uma aproximação de alta frequência, que é baseada na solução da Equação Eikonal para a fase da onda propagante e da equação de transporte, que considera a amplitude das ondas. Modelos de raios possuem cálculo rápido e permitem incorporar facilmente os efeitos das variações de velocidade do som e as variações de contorno de larga escala. A aproximação WKBJ (Wentzel, Kramers, Brillouin e Jeffreys) pode ser usada adicionalmente para a construção de modos de propagação. As principais desvantagens dos modelos de raios estão relacionadas com o colapso da solução na vizinhança de pontos focais e de cáusticas e também com a sua incapacidade de lidar com a difração (RODRÍGUEZ, 2011).

Nas simulações, para o cálculo dos perfis de velocidade do som, foi empregada a fórmula de Mackenzie com nove termos (MACKENZIE, 1981) e os dados de profundidade, temperatura e salinidade coletados pelas 9 estações oceanográficas localizadas sobre a longitude de 35°W (estações 19 a 27). A escolha da longitude de 35°W deve-se à maior ocorrência de AMST nas estações lá posicionadas e à notável variação meridional observada nessa longitude.

Os perfis de velocidade do som nos pontos das estações 19 a 27 podem ser

visualizados na figura 2, sendo a estação 19 localizada no extremo norte da radial de

35°W e a estação 27, no extremo sul da mesma radial.

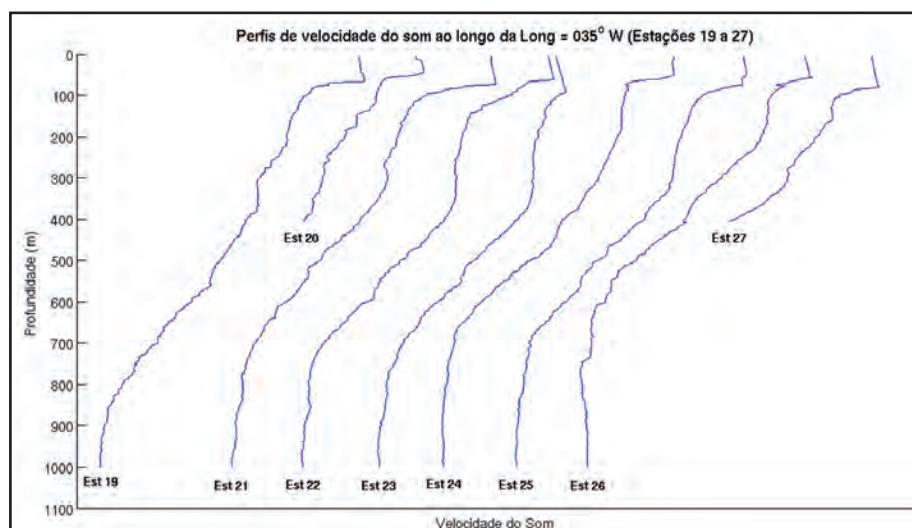


Figura 2 – Perfis de velocidade do som, obtidos por meio da expressão de Mackenzie, a partir dos dados coletados pelas estações oceanográficas 19 a 27, sobre a radial 35°W.

Na construção do campo de velocidade do som considerado nas simulações, eventuais ausências de dados medidos (observadas nas estações 20 e 27 abaixo da profundidade de 402m) foram substituídas por dados interpolados horizontalmente por *spline* suave. Adicionalmente, de modo a evitar que o modelo acústico apresente instabilidades numéricas, os

dados dos 9 perfis de velocidade do som foram amaciados por meio de média móvel centrada com 50 pontos de cálculo. O campo de velocidade do som (m/s) ao longo da longitude de 35°W, plotado no sentido N-S, a partir da estação mais ao norte (estação 19, na latitude 30°S), é representado no gráfico em forma de superfície da figura 3.

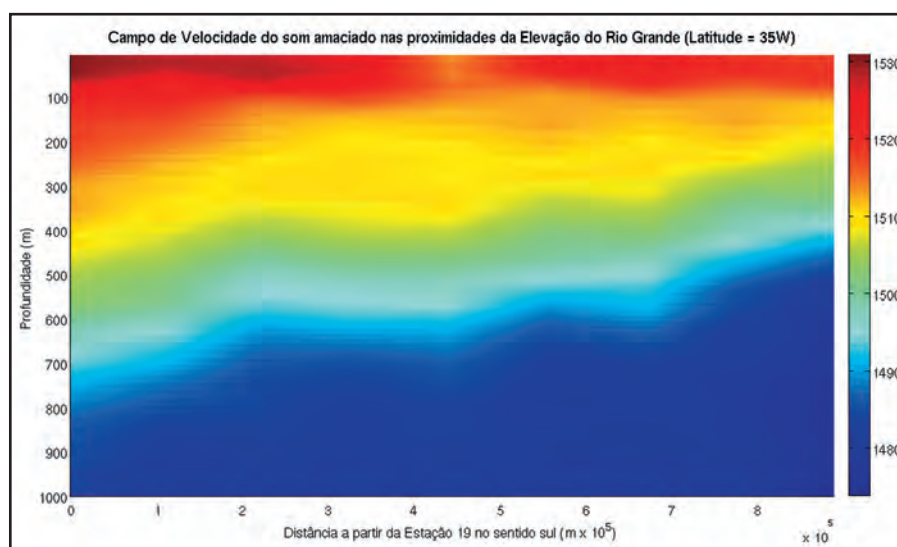


Figura 3 – Campo de velocidade de propagação do som (m/s) empregado nas simulações representativo da área de pesquisa sobre a longitude de 35°W, na direção N-S, a partir da estação mais ao norte (estação 19, latitude 30°S).

No campo de velocidade do som apresentado, pode-se notar com maior nitidez a existência de uma camada onde as variações da velocidade são mais sutis (faixa entre 1500 e 1510 m/s, predominantemente esverdeado e amarelado na barra de cores). Tal camada é mais larga nas estações intermediárias (parte central do gráfico, correspondente à estação 23) e tende a afinar nas estações extremas (partes laterais do gráfico, correspondente às estações 19 e 27). Adicionalmente, percebe-se que essa camada é mais rasa ao sul (lado direito do gráfico) e afunda em direção ao norte (lado esquerdo do gráfico), corroborando com os pontos onde ocorre a maior incidência da AMST conforme será apresentado mais adiante no item 3.

Outro parâmetro ambiental de grande importância a ser prescrito para o modelo (principalmente em regiões de águas rasas) são as propriedades geoacústicas do fundo. Devido à indisponibilidade de dados geomorfológicos nos pontos das estações oceanográficas, foram

empregados dados coletados nas proximidades da Elevação do Rio Grande, oriundos de amostras de fundo existentes no Banco de Dados Cartográficos da Marinha do Brasil (*Hydrographic Production Database – HPD / SISGEO*), os quais foram obtidos junto ao Banco Nacional de Dados Oceanográficos (BNDO). A descrição das amostras sedimentares desses dados indica a predominância de tipos de fundo de lama em cerca de 70% dos pontos de coleta. Algumas amostras coletadas em pontos mais próximos da Elevação do Rio Grande indicam a existência de rochas.

Assim sendo, na definição das propriedades geoacústicas do fundo a serem prescritas para o modelo acústico, foi adotada uma interface não-homogênea com tipo de fundo de rocha nas proximidades da Elevação do Rio Grande e tipo de fundo de lama para os demais pontos do domínio de modelagem. Os valores das propriedades geoacústicas prescritas para o modelo foram obtidos de HAMILTON (1970) e JENSEN et al. (2011). São eles:

PROPRIEDADE	TIPO DE FUNDO	ROCHA	LAMA
Velocidade compressional de propagação da onda (c_p)		1950 m/s	1519 m/s
1,42 g/cm ³ Velocidade laminar de propagação da onda (c_s)		600 m/s	90 m/s
Atenuação compressional da onda (a_p) Densidade (ρ)	2,10 g/cm ³	0,4 dB/ λ	0,2 dB/ λ
Atenuação laminar da onda (a_s)		1,0 dB/ λ	1,0 dB/ λ

A escolha da frequência da onda sonora emitida pela fonte acústica interfere significativamente na propagação da energia acústica. Frequências mais altas estão mais sujeitas a perdas por atenuação (absorção e espalhamento), porém interagem menos com o fundo. O uso de frequências mais baixas é indicado quando há interesse na propagação de longo alcance, porém exige maior rigor na prescrição das propriedades das diferentes camadas que compõem o fundo (JENSEN *et al.* 2011). Além

disso, frequências mais baixas estão mais sujeitas à interferência por ruído, demandam o uso de transdutores maiores e implicam no uso de sinais com bandas mais estreitas.

Para atender aos objetivos do presente trabalho, foram adotadas duas frequências: uma baixa, de 70 Hz, correspondente ao ruído de rotação do hélice de um navio, e outra alta, de 4 kHz, correspondente à frequência de emissão do transdutor de um equipamento sonar ou ecobatímetro. A profundidade da fonte variou

de modo a simular um navio na superfície ($z_s = 7\text{m}$), a cota de operação de um submarino submerso ($z_s = 300\text{m}$) ou a profundidade correspondente a um mínimo local de velocidade do som dentro da camada de ocorrência da AMST ($z_s = 275,5\text{m}$), cenário indicado para trabalhos de monitoramento de processos oceânicos. A geometria do domínio de modelagem (distâncias e profundidades) foi definida de acordo com as coordenadas geográficas e profundidades locais nos pontos das estações oceanográficas 19 a 27.

No presente trabalho, foram adotados cálculos dependentes da distância (*range-dependent*), em função da variação horizontal não-homogênea dos parâmetros de velocidade do som, propriedades do fundo e batimetria. Ressalta-se que, por outro lado, o uso de cálculos independentes da distância (*range-independent*) constitui uma aproximação simplificada que considera ambientes horizontalmente estratificados. De fato, existe sempre algum grau de variação lateral no oceano, o que pode influenciar

determinantemente o padrão do campo acústico (JENSEN *et al.*, 2011).

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os mapas da distribuição horizontal de volume, espessura, profundidades máximas e mínimas da camada de AMST detectada por meio dos dados interpolados das 45 estações oceanográficas (figura 4) demonstraram a existência da AMST em menores profundidades ($\sim 100\text{m}$) na porção SE da área de estudo, com maior espessura da camada na porção intermediária e ocorrência em regiões mais profundas (de 250 a 330m) na porção NW.

As posições dos perfis selecionados após o último critério foram plotadas em seções meridionais de temperatura, salinidade, densidade e oxigênio, para cada grau de longitude entre 30°W e 40°W , com anotação da espessura da camada observada no perfil. Tais seções evidenciam a existência de três setores distintos na camada de AMST, conforme o observado nos mapas de distribuição horizontal da AMST na área de estudo.

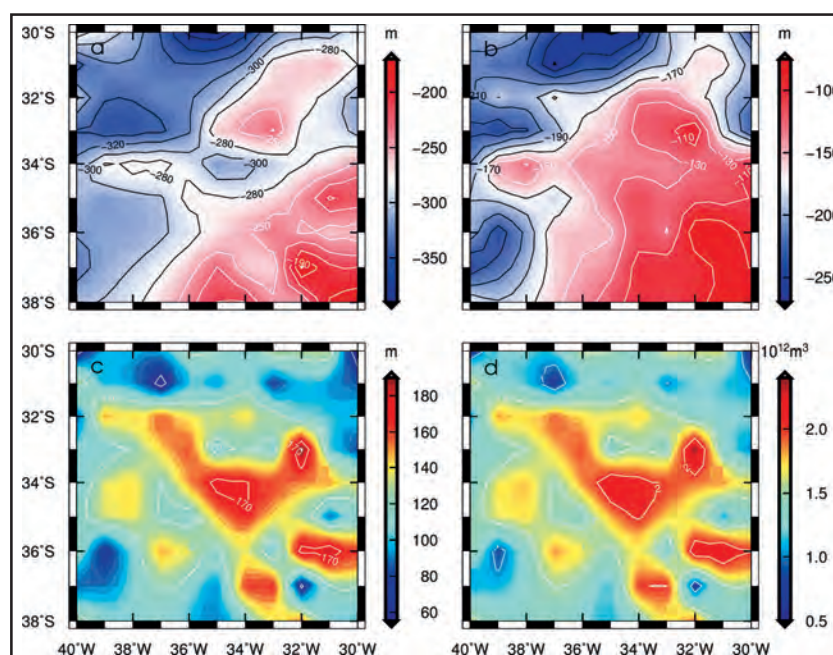


Figura 4 – Mapa horizontal de profundidades máxima e mínima em metros (painéis “a” e “b”), espessura em metros e volume (em m^3) (painéis “c” e “d”), da camada de AMST observada em cada ponto da área de estudo.

A figura 5 apresenta a seção meridional de temperatura (°C) na longitude de 35°W.

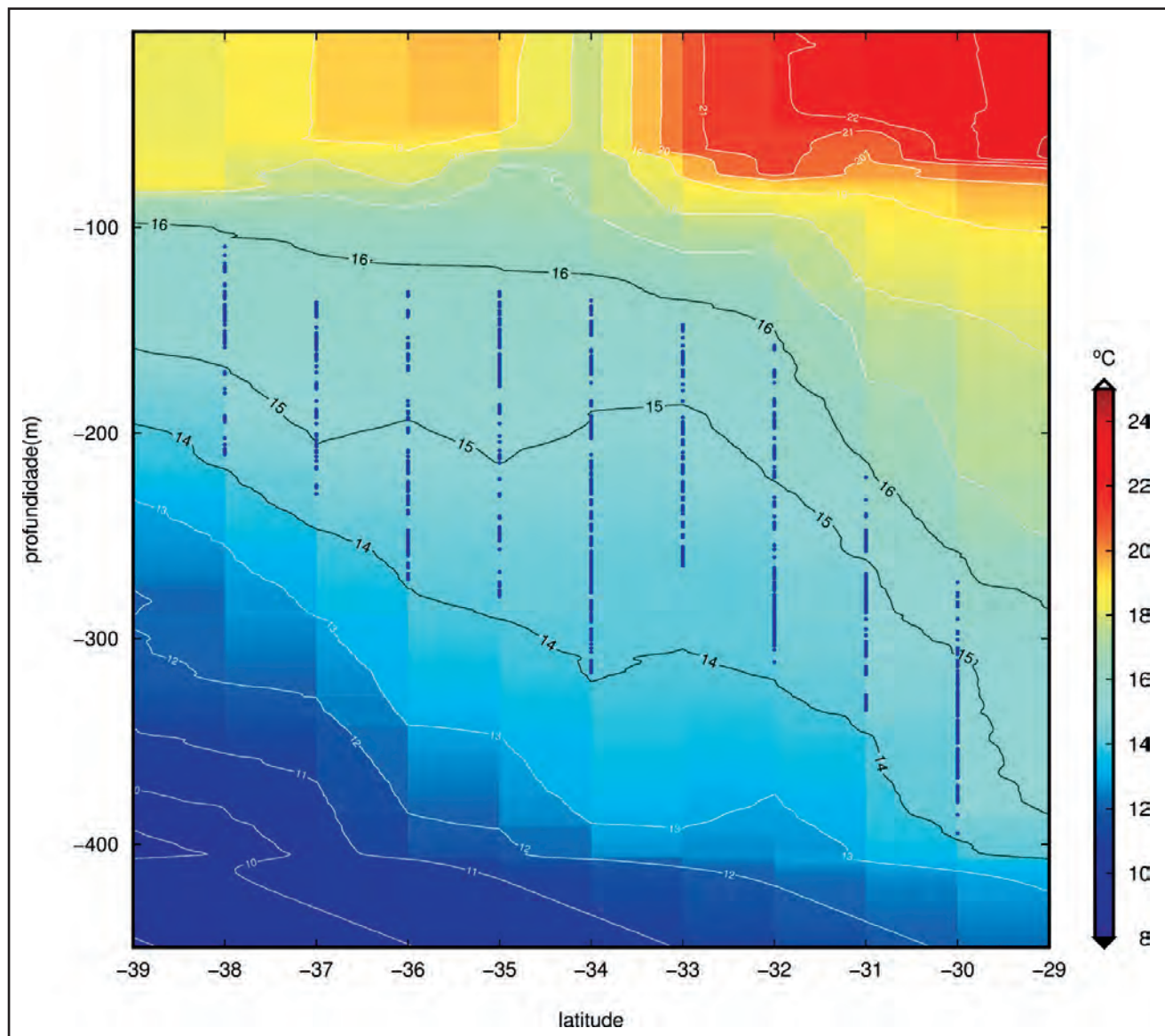


Figura 5 – Seção meridional de temperatura (°C) na longitude 35°W, entre as latitudes de 29°S e 39°S, com os pontos selecionados como amostras de AMST, nas estações oceanográficas, marcados em azul.

A avaliação inicial da propagação acústica ao longo da seção meridional na longitude 35°W pode ser observada na figura 6, por meio da pressão acústica, considerando um perfil de velocidade do som tipo isovelocidade e uma fonte acústica transmitindo um sinal na frequência de 70 Hz. A fonte foi

posicionada na estação 19 (30°S / 35°W), na profundidade de 7m. Ressalta-se que, em propagação acústica, a perda na transmissão (*transmission loss*, TL) é normalmente plotada ao invés da pressão acústica complexa – procedimento esse que foi adotado ao longo de todo o trabalho.

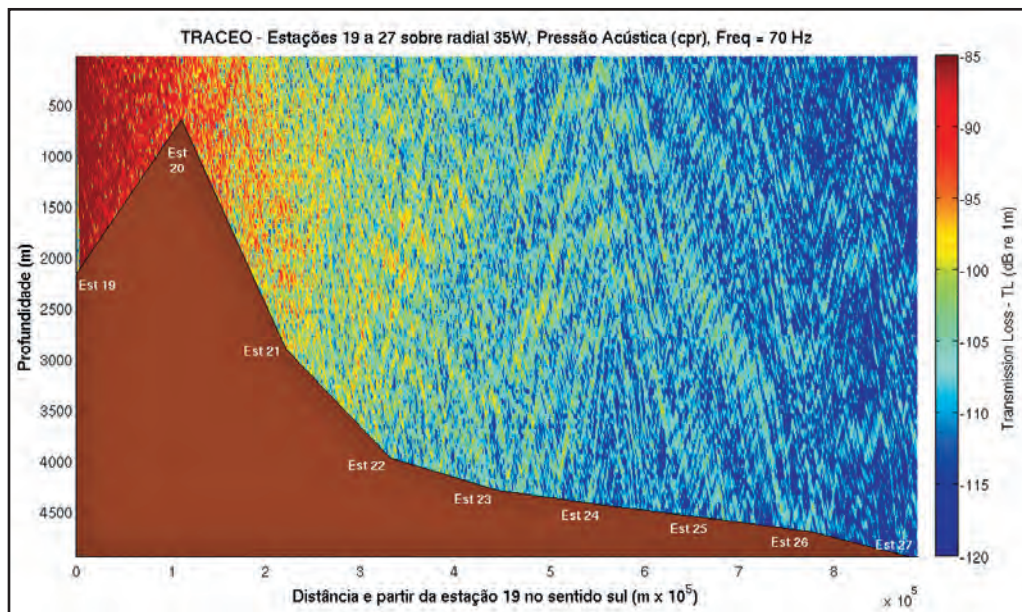


Figura 6 – Variação da pressão acústica ao longo da radial 35°W, considerando uma fonte acústica posicionada no ponto da estação 19 e um perfil de velocidade do som de isovelocidade.

No cenário ilustrado pela figura 6, as encostas da Elevação do Rio Grande, devido à boa refletividade das rochas que as compõem, funcionam como uma espécie de “espalhador” de raios na horizontal, concentrando parte da energia sonora na região anterior à Elevação. Naturalmente, posicionando-se a fonte acústica em pontos distintos ao longo da radial de 35°W, diferentes padrões de propagação acústica serão obtidos.

De modo a otimizar o uso do modelo TRACEO e permitir uma melhor percepção dos

efeitos do perfil real de velocidade do som característico da AMST na propagação acústica, a dimensão do domínio de modelagem foi reduzida para 150 km na distância horizontal ao invés dos quase 890 km iniciais que separam as estações 19 e 27. Dessa forma, um primeiro cenário foi simulado com a fonte acústica posicionada no ponto correspondente à estação 20 (31°S / 35°W), na profundidade local de cerca de 650m, sobre a Elevação do Rio Grande. A figura 7 apresenta o traçado de raios calculado pelo modelo.

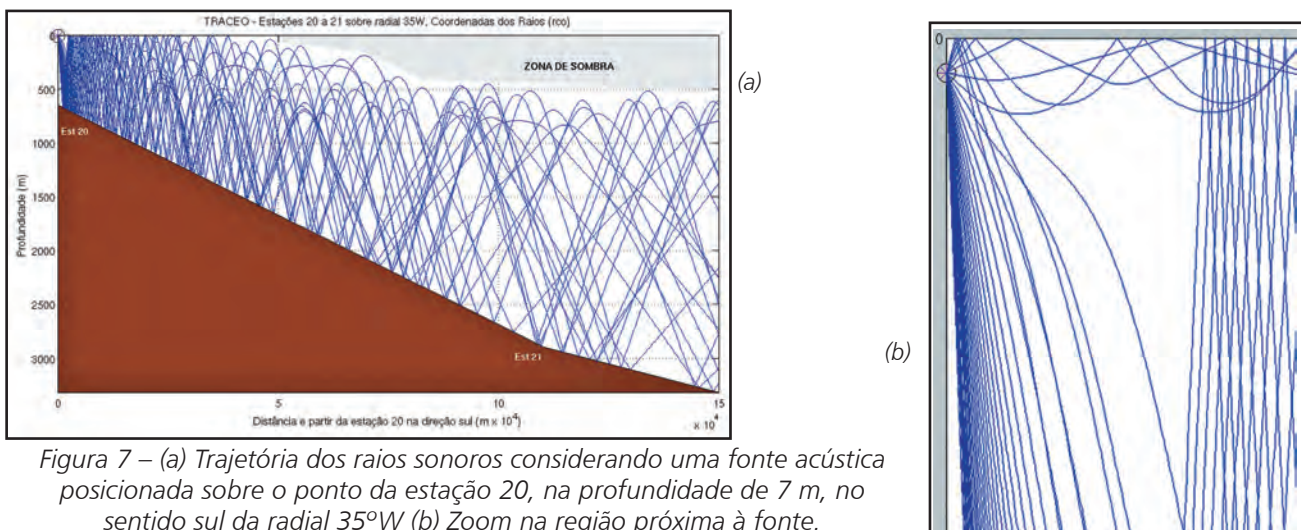


Figura 7 – (a) Trajetória dos raios sonoros considerando uma fonte acústica posicionada sobre o ponto da estação 20, na profundidade de 7 m, no sentido sul da radial 35°W (b) Zoom na região próxima à fonte.

Na figura 7(a), pode-se notar o grande poder refrativo dos raios, principalmente na camada d'água situada entre as profundidades de cerca de 50 e 500m, camada que engloba as profundidades com ocorrência da AMST. Governado pela bem conhecida Lei de Snell, o efeito da refração tende a curvar localmente o feixe sonoro para regiões de menor velocidade de propagação.

A refração é função do ângulo de incidência dos raios através de meios dotados de diferentes valores de velocidade de propagação. Dessa forma, na situação aqui ilustrada (figura 7(b)), os raios lançados com maior inclinação em relação à horizontal tendem a ser curvados diretamente para baixo, interagindo com o fundo. Raios com inclinação mais próxima da horizontal tendem a ser curvados para cima, interagindo sucessivamente com a superfície, sendo depois novamente refratados e gerando assim um duto

sonoro de superfície. Tal padrão de propagação é muito comum e típico de situações em que a temperatura (e consecutivamente a velocidade de propagação) aumenta com a profundidade na camada de mistura e, abaixo dela, decresce continuamente na termoclina permanente.

O aspecto mais interessante do padrão de propagação ocorreu após a distância de 40 km da fonte (figura 7(a)), onde os raios refletidos pelo fundo não mais interagem com a superfície e foram refratados de volta para baixo, o que gerou, a partir dessa distância, uma imensa zona de sombra na superfície, atingindo profundidades desde 40 até cerca de 600m.

A plotagem da pressão acústica (figura 8) também destaca os efeitos da refração (cores avermelhadas com aspecto de "M") e a formação da zona de sombra na superfície (cores azuladas no canto direito superior da plotagem).

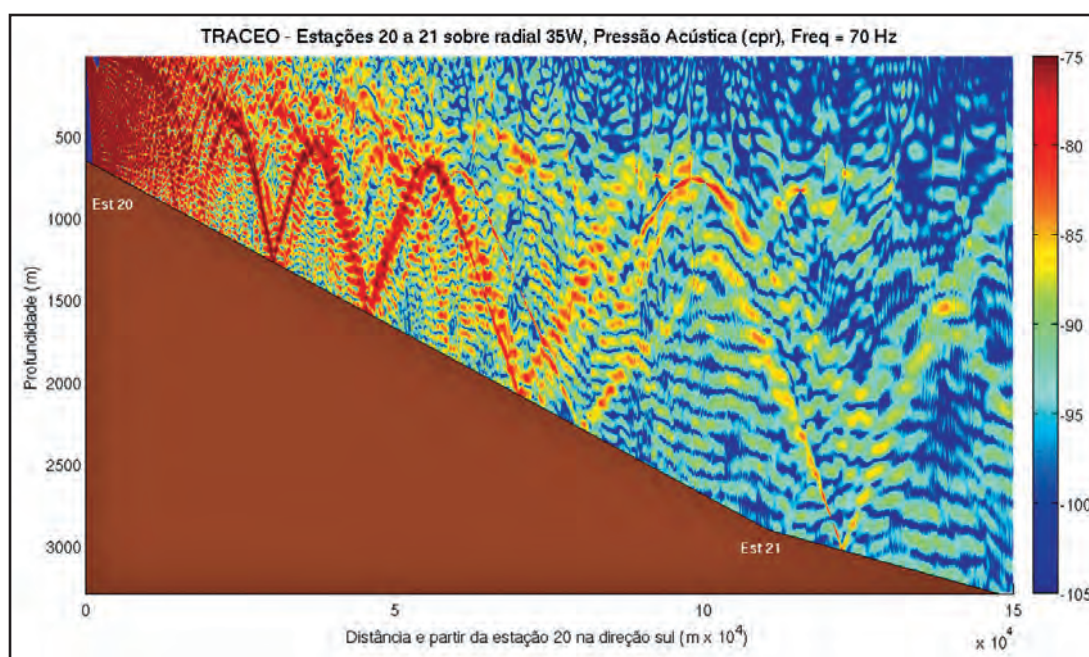


Figura 8 –Variação da pressão acústica considerando uma fonte acústica posicionada sobre o ponto da estação 20, na profundidade de 7 m, no sentido sul da radial 35°W.

Mudando-se o cenário para o correspondente à estação 22 (lat. 33°S, long. 35°W), a alteração do relevo submarino (decorrente do afastamento da Elevação do Rio Grande) faz

com que a zona de sombra de superfície receba uma ensonificação maior em comparação com o cenário anterior, principalmente em função da energia acústica refletida pelo fundo (figura 9).

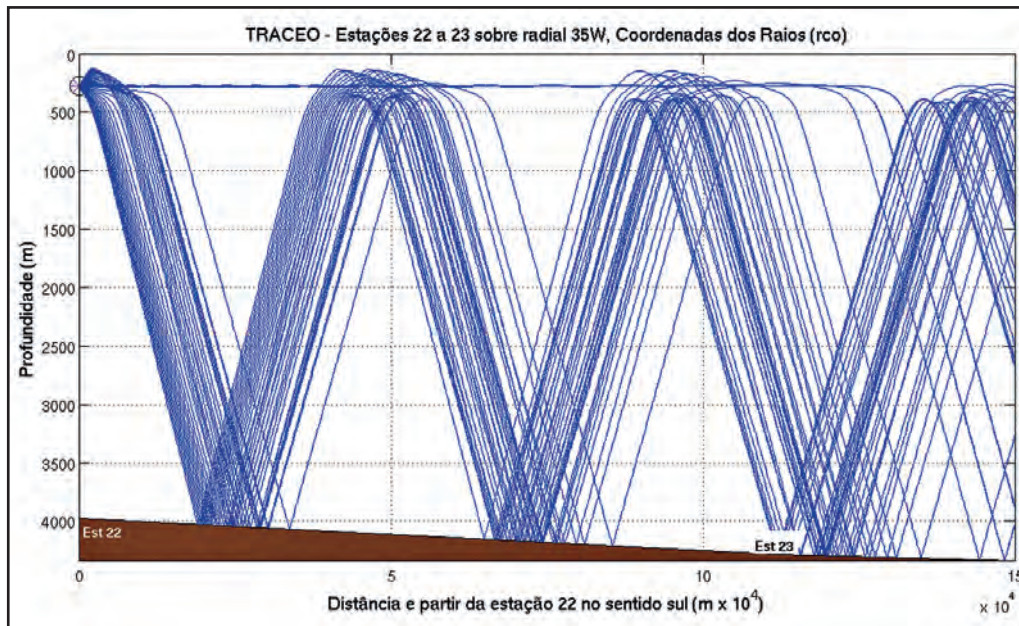
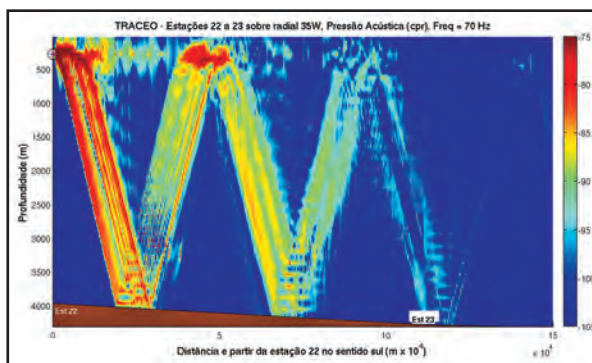


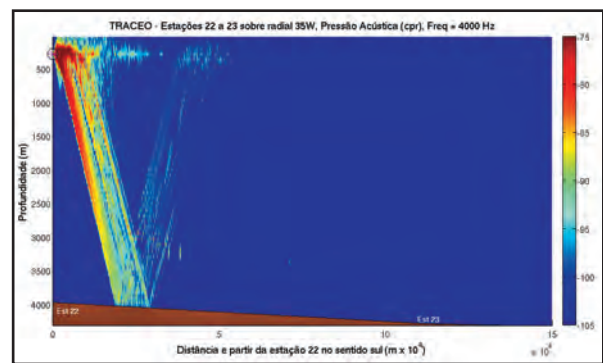
Figura 9 – Trajetória dos raios sonoros considerando uma fonte acústica posicionada sobre o ponto da estação 22, na profundidade de 275,5 m, no sentido sul da radial 35°W.

Nessa situação, o fundo é de lama, considerado um refletor ruim; além disso, as profundidades aqui envolvidas são grandes (~4.000m) o que exige que o feixe acústico percorra uma longa distância até retornar à superfície. Dessa forma, as perdas geométricas e por atenuação também serão maiores (sobretudo com o uso

de altas frequências), o que faz com que a maior parte da energia acústica seja dissipada já mesmo antes da primeira interação com a superfície. As figura 10 (a) e (b) ilustram esse fato para uma fonte emitindo respectivamente nas frequências de 70Hz e 4kHz, evidenciando a maior atenuação da alta frequência.



(a)



(b)

Figura 10 –Variação da pressão acústica considerando uma fonte acústica posicionada sobre o ponto da estação 22, na profundidade de 275,5 m, no sentido sul da radial 35°W.

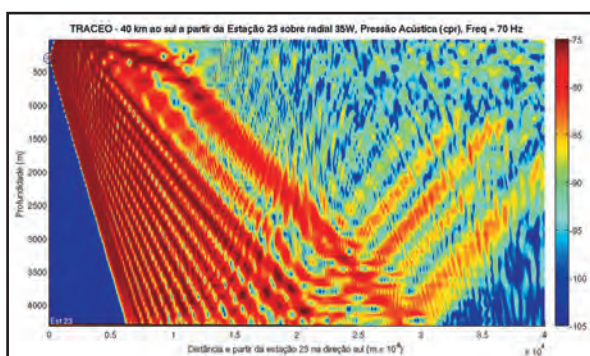
Adicionalmente, percebe-se nas figura 9, figura 10 (a) e (b) uma intensificação da energia acústica ao longo da profundidade da fonte ($z_s = 275,5$ m), devido à ocorrência de um duto sonoro nessa profundidade. Os efeitos do

duto podem ser notados até distâncias de aproximadamente 120 km da fonte. Destaca-se que, nessa simulação, a fonte foi propositalmente posicionada na profundidade correspondente a um ponto de mínimo local de velocidade do

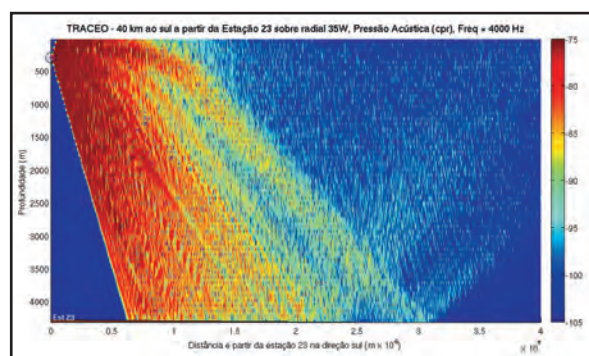
som, dentro da camada de ocorrência da AMST. O aprisionamento da energia na profundidade da fonte ocorre em função da refração dos raios nas camadas adjacentes (de menor velocidade de propagação), o que faz com que a energia acústica seja poupada das perdas decorrentes das interações com o fundo (bastante absorvente nessa situação) e com a superfície.

Um terceiro e último cenário é apresentado a seguir, no ponto correspondente à estação 23 (34°S / 35°W), onde uma fonte, transmitindo nas frequências de 70Hz e 4kHz,

foi posicionada em uma profundidade de 300 m (profundidade próxima ao limite inferior da camada de ocorrência da AMST nessa estação e também equivalente à cota de operação de um submarino submerso). As figura 11 (a) e (b) evidenciam a ocorrência de um padrão de propagação fortemente influenciado pela refração para baixo, onde todos os raios sonoros têm suas trajetórias desviadas para o fundo em função da permanente diminuição da temperatura (e por conseguinte da velocidade de propagação) com o aumento da profundidade.



(a)



(b)

Figura 11 – Variação da pressão acústica considerando uma fonte acústica posicionada sobre o ponto da estação 23, na profundidade de 300 m, no sentido sul da radial 35°W.

Pela análise das figura 11 (a) e (b), pode-se perceber o reduzido alcance da energia acústica na superfície, alcançando perdas na transmissão próximas a 100 dB em distâncias de cerca de 15 km na superfície com o uso da frequência de 70 Hz e de apenas 10 km, com o uso da frequência de 4 kHz.

4. CONCLUSÕES

Os dados coletados no cruzeiro permitiram observar a existência de uma espessa camada de água modal na área de estudo, com variação meridional da sua posição vertical na coluna d'água. Por tratar-se de um fenômeno diretamente relacionado com a interação oceano-atmosfera, é plausível considerar que as menores profundidades iniciais observadas ao sul da área de estudo se devem à existência de

AMST formada recentemente e mais próxima da região de formação, quando comparadas às maiores profundidades de ocorrência observadas ao norte da área de estudo, possivelmente associadas à AMST mais antiga. As espessuras maiores existentes na porção central da área denotam uma zona de transição em que ocorre o acúmulo maior de volumes de AMST formados em diferentes invernos.

A ocorrência da AMST na área de pesquisa, com sua estrutura vertical aproximadamente homogênea, retrata um cenário acústico bastante atraente, com peculiaridades altamente dependentes do aspecto do perfil de velocidade do som e da escolha do posicionamento da fonte acústica (posicionamento horizontal e profundidade). Em todas as simulações realizadas, notou-se o aspecto refratário da camada da AMST, o que acarreta grandes variações

nas trajetórias dos raios sonoros e, consecutivamente, na propagação da energia acústica em função de pequenos deslocamentos na profundidade da fonte. Os efeitos decorrentes do posicionamento horizontal da fonte acústica são, naturalmente, mais perceptíveis nas profundidades mais rasas, em regiões mais próximas das encostas da Elevação do Rio Grande, em função das alterações no relevo submarino lá existentes e da maior interação com o fundo bom refletor característico das encostas.

Há de se considerar que existem inúmeras combinações de parâmetros os quais, por sua vez, produzem diversos cenários acústicos distintos a serem modelados. As simulações selecionadas no presente trabalho indicam, em função da variação do posicionamento horizontal e da profundidade da fonte, fenômenos de formação de zonas de sombra na superfície, dutos sonoros dentro da camada da AMST ou redução do alcance na superfície devido ao desvio da energia sonora para o fundo. Assim sendo, em decorrência dos diferentes padrões de propagação encontrados, o estudo da acústica na AMST apresenta um caráter múltiplo, podendo

ter aplicações em pesquisas de Geoacústica, Oceanografia Acústica (monitoramento ambiental) e na detecção de alvos.

Sugere-se, para futuros trabalhos, a realização de novas pesquisas, por meio de cruzeiros oceanográficos periódicos que permitam o estudo da variabilidade da AMST, possivelmente incluindo o lançamento de fontes acústicas com frequências diferenciadas e *arrays* de receptores dentro da camada da AMST e o uso de outros modelos de propagação acústica que adotem a estratégia de solução por modos normais, a fim de comparar os resultados obtidos pelo modelo de traçado de raios e melhorar a acurácia dos resultados em baixas frequências.

5. AGRADECIMENTOS

Agradecemos ao Comandante do NHO "Cruzeiro do Sul" e sua tripulação pelo empenho na realização das estações oceanográficas, não obstante as condições severas de mar e vento, e pela meticulosa operação e manutenção dos equipamentos afetos à pesquisa antes e durante todo o cruzeiro.





REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

CLAY, C. S. & MEDWIN, H. 1977. *Acoustical oceanography: principles and applications*. Vol. 15, New Jersey, U.S.A., John Wiley & Sons, 544pp.

DOUGLASS E. M., KWON Y.-O & JAYNE, S. R. 2013. A Comparison of North Pacific and North Atlantic Subtropical Mode Waters in a Climatologically-forced Model. *Deep-Sea Research II*, 91, 139–151.

ETTER, P. C. 2003. *Underwater Acoustic Modelling and Simulation*. London, U. K., Spon Press, 384pp.

GAILLARD F., BRION E. & CHARRAUDEAU R. 2009. ISAS V5: Description of the Method and User Manual, Rapport LPO 09-04, 34pp.

GARZOLI, S. L. & GARRAFO, Z. 1989. Transports, Frontal Motions and Eddies at the Brazil-Malvinas Currents Confluence. *Deep-Sea Research*, 36(5), 681–703.

HAMILTON, E. L. 1970. Reflection coefficients and bottom losses at normal incidence computed from Pacific sediment properties. *Geophysics*, 35(6), 995-1004.

HANAWA, K. & TALLEY, L. 2001. Mode Waters, in *Ocean Circulation and Climate*. International Geophysics Series. London, U. K., Academic Press, 373–386.

JENSEN, F. B., KUPERMAN, W. A., PORTER, M. B. & SCHMIDT, H. 2011. *Computational Ocean Acoustic*. Modern Acoustics and Signal Processing. 2 ed. New York, U.S.A., Springer, 794 pp.

MACKENZIE, K. V. 1981. Nine-term equation for the sound speed in the oceans. *Journal of the Acoustical Society of America*, 70(3), 807–812, doi:10.1121/1.386920.

MEDWIN, H. & CLAY, C. S. 1997. *Fundamentals of acoustical oceanography*. London, U. K., Academic Press, 717pp.

PROVOST C., ESCOFFIER C., MAAMAATAUIAHUTAPU K., KARTAVTSEFF A. & GARÇON V. 1999. Subtropical Mode Waters in the South Atlantic Ocean. *Journal of Geophysical Research*, 104(C9), 21033–21049.

RODRÍGUEZ, O. C. 2011. The TRACEO Ray Tracing Program. SiPLAB/FCT/ Universidade do Algarve, Faro, Portugal, Jan. 2011.

SATO, O. T. & POLITO, P. S. 2014. Observation of South Atlantic Subtropical Mode Waters with Argo Profiling Float Data. *Journal of Geophysical Research: Oceans*, 119, doi:10.1002/2013JC009438.