

II.2.6 - Estudo de Decaimento da Energia Sonora

II.2.6.1 - Justificativa

A avaliação do impacto da emissão sonora sobre o meio biótico é um dos critérios mínimos para a definição da Área de Influência da Atividade de Pesquisa Sísmica. Para a área da Pesquisa Sísmica Marítima 3D/4D *Streamer* e *Nodes* na Bacia de Campos Cluster BC - Campos de Albacora e Forno (AB-Forno), Tartaruga Verde (TVD), Marlim Leste, Marlim Sul (MMBC), Barracuda e Caratinga (BRC-CRT) e Marlim, Voador e Brava (MRL-VDR-BRV), faz-se necessário um estudo de decaimento da energia sonora diante das incertezas na reação dos grupos mais sensíveis da fauna local aos disparos das fontes sísmicas a serem utilizadas.

Neste estudo, o decaimento acústico foi estimado a partir da modelagem numérica da propagação do campo de onda emitido por fontes sísmicas, utilizando um modelo de velocidade regional da região. Foram avaliados os efeitos sinérgicos da sobreposição de duas fontes sísmicas distantes 60 Km uma da outra, diante da possibilidade de ocorrência simultânea de operações de aquisição sísmica na Bacia de Campos. Foi realizada a calibração das amplitudes do dado modelado utilizando como referência um dado real adquirido em levantamento sísmico anterior na mesma área. Além disso, a fim de compensar a limitação do conteúdo de frequências do dado modelado (até 15 Hz) foi realizada uma estimativa da curva de decaimento sonoro que seria obtida caso fosse possível modelar frequências até 250 Hz, limite máximo registrado em dados sísmicos utilizados rotineiramente na exploração de petróleo. Essa extrapolação da energia de decaimento foi avaliada utilizando o dado nodes de Búzios, comparando as curvas de decaimento calculadas com todas as frequências (250 Hz) e com um filtro corta-altas de 15 Hz aplicado. Também estimamos o impacto da variação de velocidade da coluna de água nas curvas de decaimento sonoro, utilizando modelos de velocidade da água representativos para as estações do verão e inverno.

II.2.6.2 - Objetivo

O estudo visa estabelecer a relação entre a emissão sonora das fontes sísmicas – compostas por um arranjo de *air guns*, canhões de ar - e a distância de

segurança aos animais a fim de mitigar a interferência da pesquisa sísmica no ambiente marinho. Os resultados são apresentados na forma de gráficos do Nível de Exposição Sonora, nos quais é possível avaliar o nível de exposição em função da posição relativa entre o ponto de recepção e de emissão de energia sonora proveniente das fontes sísmicas.

II.2.6.3 - Metodologia

Para avaliar o Nível de Exposição Sonora a distância de dezenas de quilômetros da fonte, e simular a interferência entre fontes distantes 60 Km entre si, foram realizadas modelagens em duas regiões na área de interesse (**Figura II.2.6.3-1** e **Figura II.2.6.3-2**) com o propósito de representar rigorosamente os sinais refletidos e refratados pelos diferentes meios associados à estratigrafia, geologia e termoclina local na propagação do som, e possibilitar uma abordagem conservativa na definição da Área de Influência.

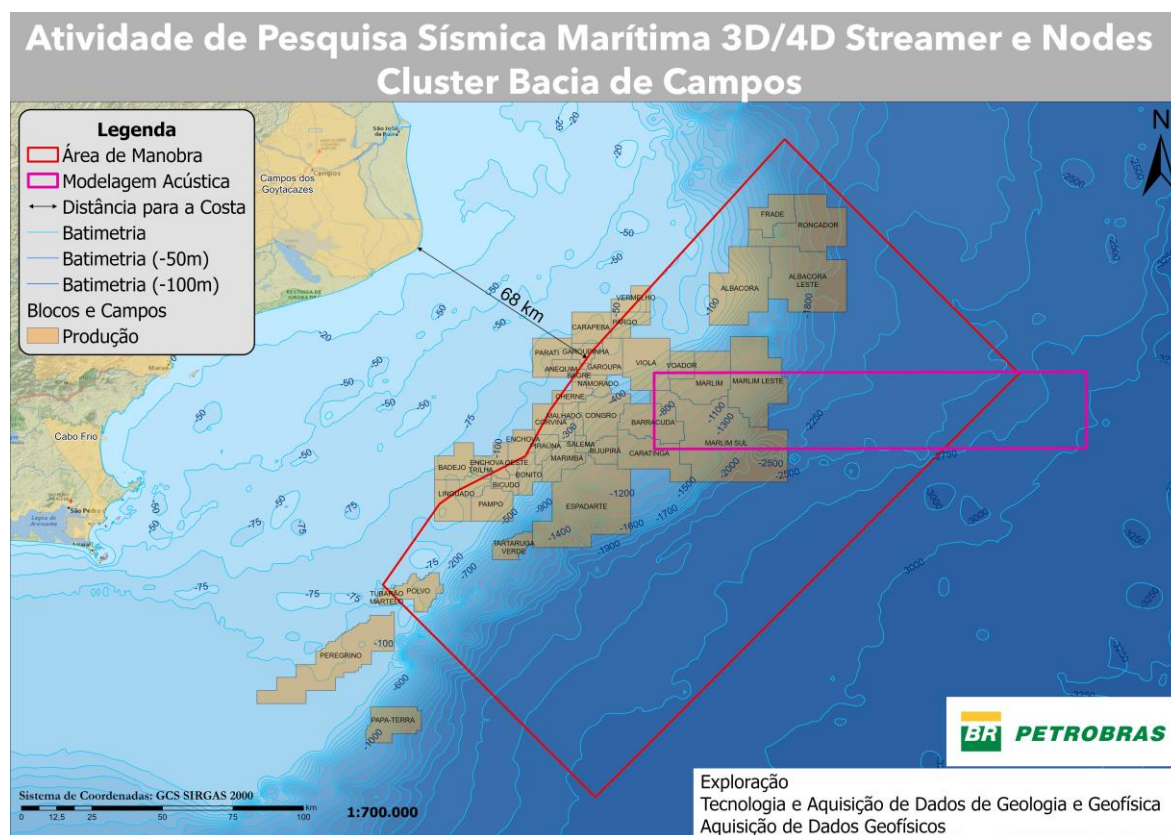


Figura II.2.6.3-1 – Localização do empreendimento e da Área de Modelagem 1.

preexistentes na área, imprimindo realismo ao modelo. Entretanto, para obtenção de uma representação mais fidedigna da velocidade da água na Bacia de Campos, foram gerados dois modelos adicionais modificando apenas a camada de água, considerando os perfis médios de velocidade nas estações do verão e inverno, visando à calibração do modelo de velocidade regional por índices termohalinos sazonais encontrados na literatura.

II.2.6.3.1 - Descrição da Modelagem

O processo de modelagem envolve vários elementos: um algoritmo que simula numericamente a propagação de ondas, um modelo que representa o meio de propagação, um pulso sísmico contendo a assinatura emitida pela fonte sísmica e a geometria de aquisição relacionando a posição de fontes e receptores.

A modelagem do campo de ondas foi realizada com um algoritmo que simula numericamente o fenômeno físico de propagação de ondas desde a fonte, passando pelas camadas de água e do meio geológico, até os receptores. O programa de modelagem utilizado neste estudo foi desenvolvido pela empresa Seismic City, e é baseado numa solução de elementos finitos da equação da onda em meios elásticos que permite simular a propagação acústica e elástica em um meio tridimensional arbitrário isotrópico ou anisotrópico. O algoritmo representa com fidelidade os fenômenos de reflexão, refração e partição de energia nas interfaces, simulando inclusive caminhos de propagação complexos envolvendo múltiplas reflexões no caminho entre fonte e receptores, ondas mergulhantes e refratadas, gerando sismogramas sintéticos similares aos sismogramas de campo.

Para modelos de grandes dimensões, com dezenas de quilômetros de comprimento, como no caso deste projeto, algumas simplificações relacionadas ao meio de propagação e ao campo propagado precisaram ser aplicadas ao processo de modelagem, a fim de acomodar as restrições impostas pelos recursos computacionais disponíveis.

Com relação ao meio de propagação, as simplificações consistiram em assumir que as ondas se propagam em um meio acústico e isotrópico (propriedades do meio independem da direção de propagação), porém variável tridimensionalmente, portanto ainda representando com fidelidade as heterogeneidades da geologia de

subsuperfície desta região. As propriedades que definem um meio acústico são a velocidade de propagação da onda compressional e a densidade. Com a simplificação acústica, assume-se que apenas ondas compressionais propagam-se no modelo, o que de fato ocorre apenas na camada de água, pois as camadas sedimentares possuem comportamento elástico e comportam a propagação de ondas compressionais e cisalhantes. A principal consequência dessa aproximação é desprezar as conversões de parte da energia transportada pelas ondas compressionais em ondas cisalhantes, superestimando os coeficientes de reflexão e consequentemente a energia acústica das ondas compressionais refletidas. Já a aproximação isotrópica tem uma influência menor, afetando em menor grau a energia acústica registrada nos pontos de recepção, pois a partição de energia nas interfaces varia ligeiramente entre os meios acústicos isotrópicos e anisotrópicos. Para ilustrar esse efeito, as figuras seguintes (**Figura II.2.6.3.1-1**, **Figura II.2.6.3.1-2** e **Figura II.2.6.3.1-3**) mostram a variação do coeficiente de reflexão com o ângulo de incidência para uma interface água-sedimentos (representando o fundo do mar) considerando três aproximações para a camada de sedimentos: elástico anisotrópico, acústico anisotrópico e acústico isotrópico.

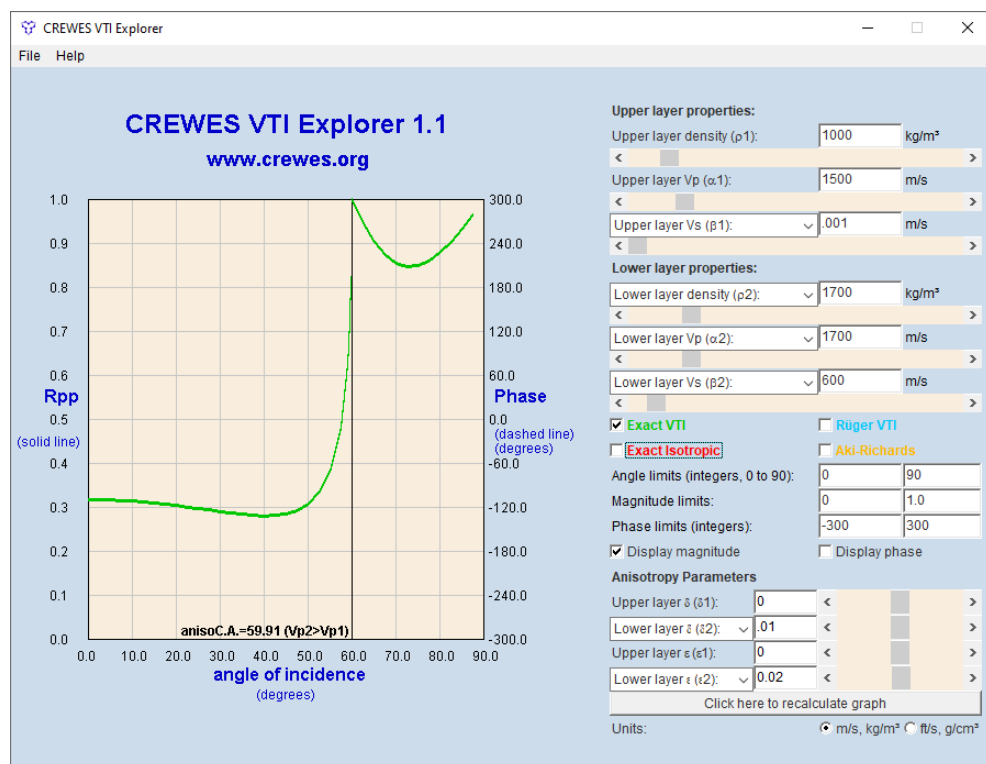


Figura II.2.6.3.1-1 – Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência para a interface água-sedimento elástico anisotrópico.

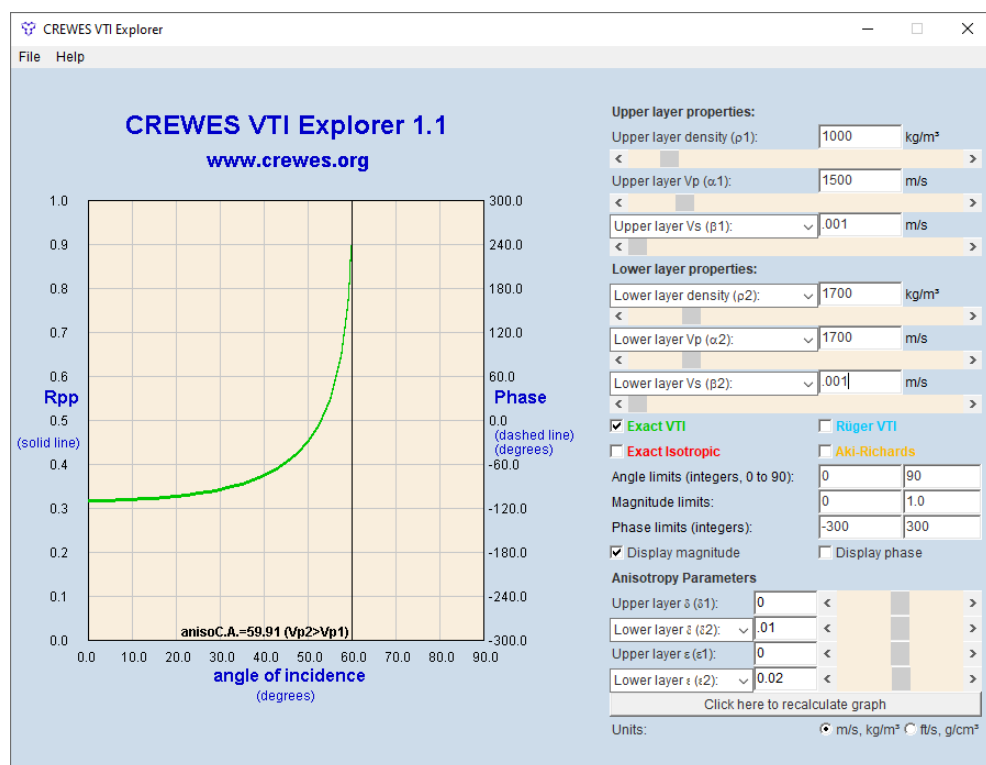


Figura II.2.6.3.1-2 – Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência para a interface água-sedimento acústico anisotrópico.

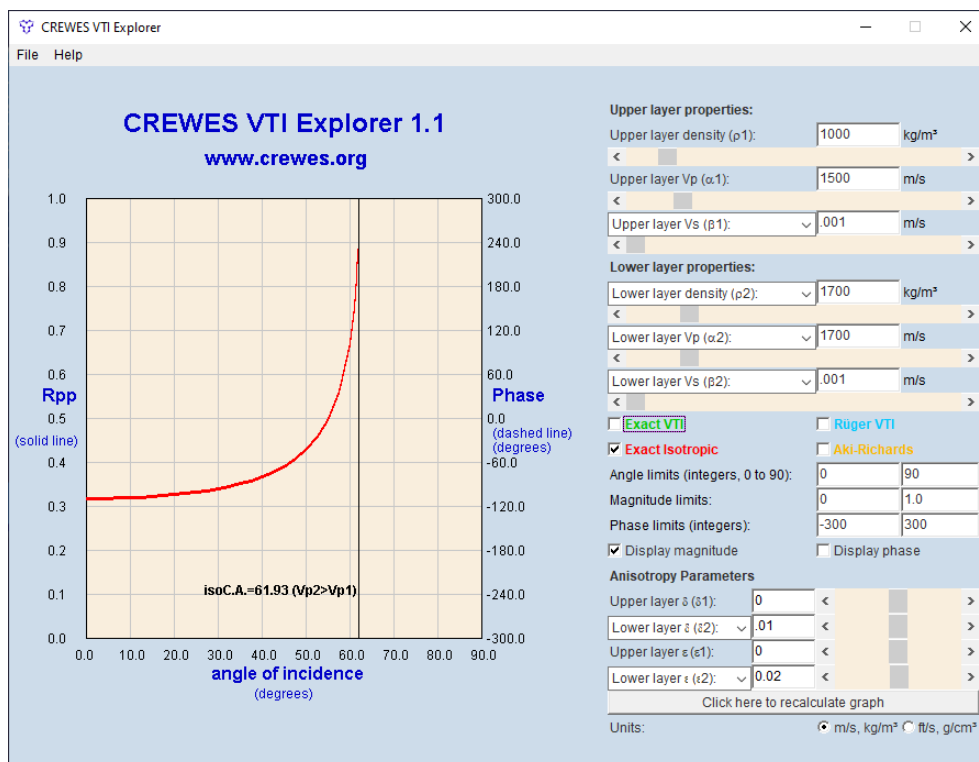


Figura II.2.6.3.1-3 – Coeficiente de reflexão em função do ângulo de incidência para a interface água-sedimento acústico isotrópico.

No caso da interface água-sedimento elástico anisotrópico, o coeficiente de reflexão é visivelmente menor que os demais casos a partir do ângulo de incidência de 10 graus. Para o caso das interfaces água-sedimento acústico anisotrópico e água-sedimento acústico isotrópico as diferenças nos valores dos coeficientes de reflexão são mais sutis, e a maior diferença entre as duas situações é que o ângulo crítico é ligeiramente maior para o caso isotrópico.

Com relação ao campo de onda propagado, limitações associadas aos recursos computacionais disponíveis impuseram uma limitação na frequência máxima do campo de onda modelado. Para as dimensões dos modelos utilizados neste estudo (125 Km de comprimento, 25 Km de largura e 10 Km de profundidade), compostos por uma malha regular de celas cúbicas com dimensão de 25 m de lado, a frequência máxima propagada através do modelo teve de ser limitada a 15 Hz, limitando a esta frequência os dados obtidos da modelagem.

Para representar o meio de propagação foi utilizado um modelo de velocidades regional da Bacia de Campos, recortado em duas áreas, denominadas Áreas de Modelagem 1 e 2. Esse modelo possui variação de velocidade na camada d'água

que dependem principalmente da pressão, temperatura e salinidade e variações de velocidade em subsuperfície estimadas a partir do processamento dos levantamentos sísmicos que recobrem a área. Os modelos de densidade foram calculados a partir dos modelos de velocidade, utilizando a relação de Gardner. Na **Figura II.2.6.3.1-4** e na **Figura II.2.6.3.1-5** são mostrados em perspectiva tridimensional e em seção o modelo de velocidade utilizado na Área de Modelagem 1, e na **Figura II.2.6.3.1-6** é mostrado em seção o modelo de densidade utilizado na Área de Modelagem 1. Na **Figura II.2.6.3.1-7** e na **Figura II.2.6.3.1-8** são mostrados em seção os modelos de velocidade e densidade da Área de Modelagem 2. As propriedades do modelo são representadas em uma malha regular de 25 m nas três direções espaciais.

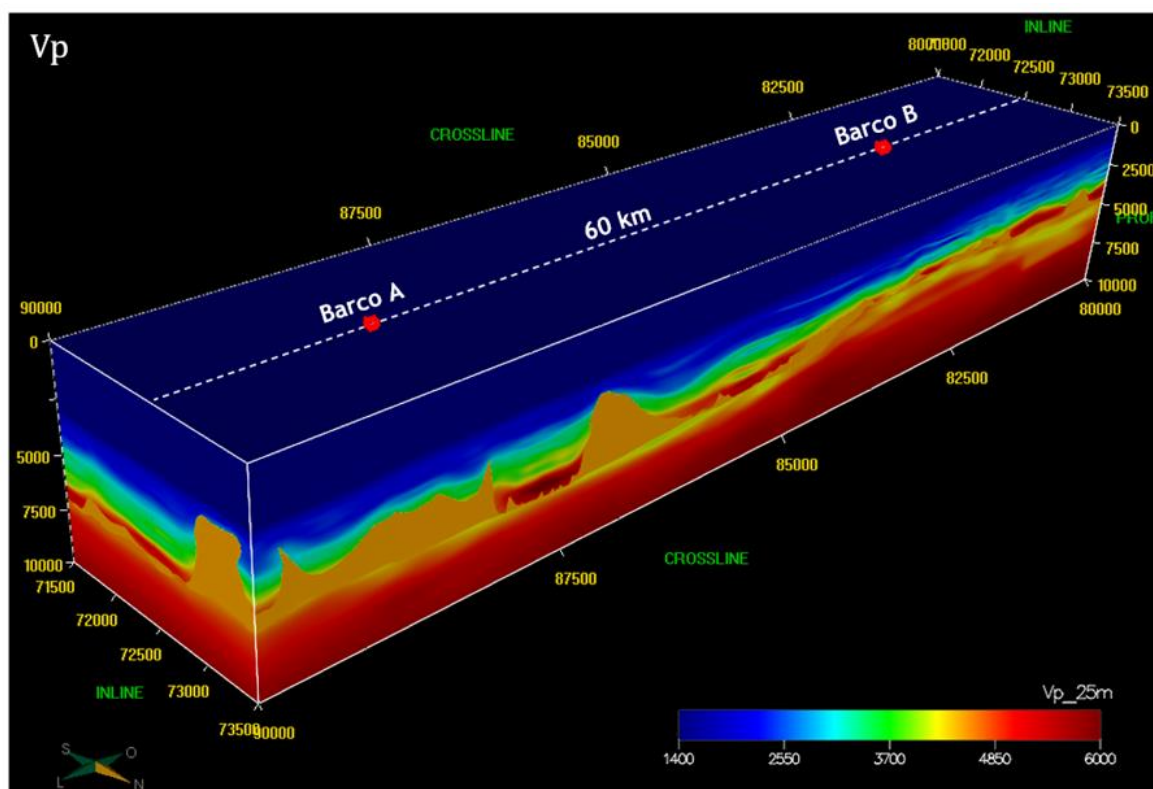


Figura II.2.6.3.1-4 – Vista em perspectiva do modelo de velocidade 3D utilizado na Área de Modelagem 1 do estudo.

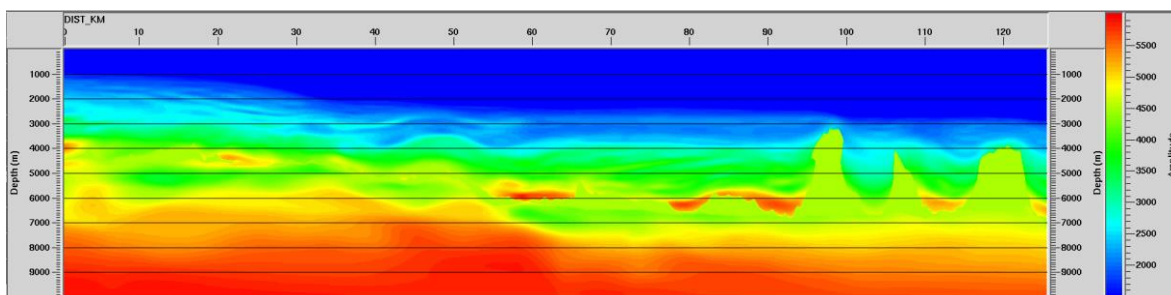


Figura II.2.6.3.1-5 – Vista em seção do modelo de velocidade 3D utilizado na Área de Modelagem 1 deste estudo.

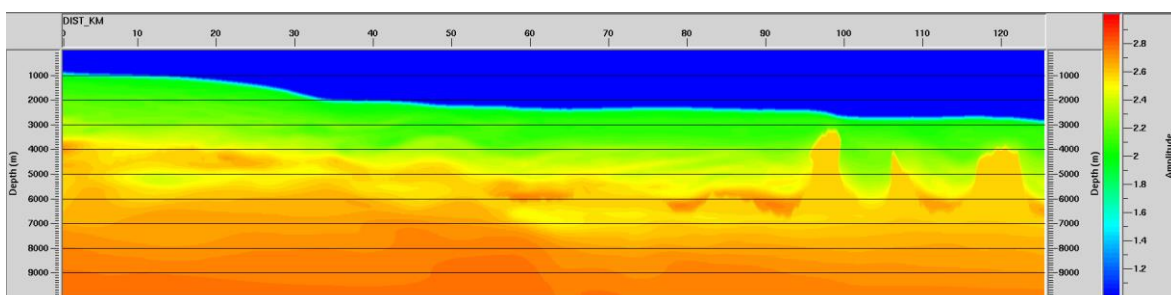


Figura II.2.6.3.1-6 – Vista em seção do modelo de densidade 3D utilizado na Área de Modelagem 1 deste estudo.

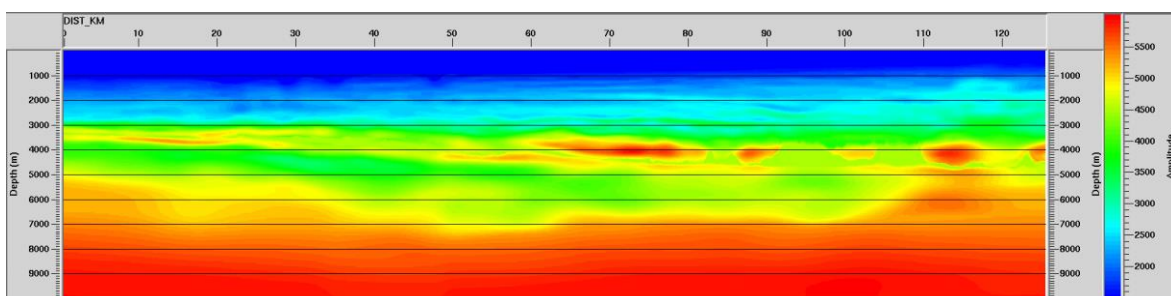


Figura II.2.6.3.1-7 – Vista em seção do modelo de velocidade 3D utilizado na Área de Modelagem 2 deste estudo.

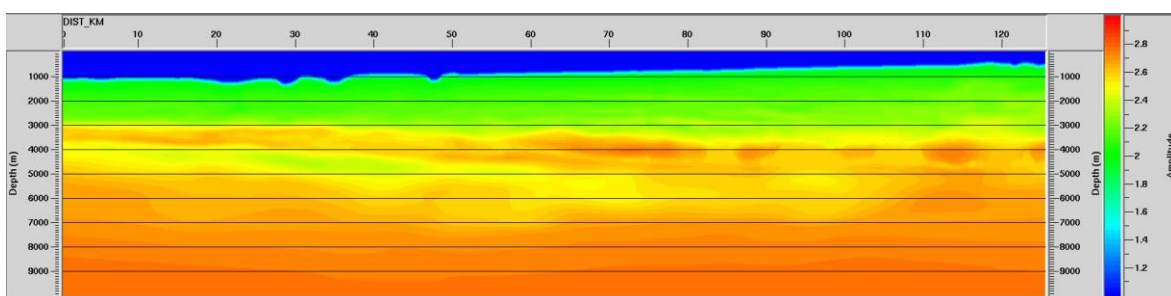


Figura II.2.6.3.1-8 – Vista em seção do modelo de densidade 3D utilizado na Área de Modelagem 2 deste estudo.

Para representar o pulso sísmico emitido pela fonte na modelagem da propagação do campo de ondas foi utilizada um pulso do tipo *Ricker*, utilizado

rotineiramente em estudos de modelagem sísmica, com frequência de corte de 15 Hz (**Figura II.2.6.3.1-9**). Como pode ser verificado na figura, o pulso de *Ricker* tem forma simétrica e apresenta o pico principal central com amplitude bem maior que a dos lobos laterais adjacentes, características que facilitam a interpretação de dados sísmicos gerados com esse pulso. Vantagens adicionais desse pulso são a sua fácil reprodutibilidade, visto que é definido analiticamente, possui simplicidade de parametrização (necessita apenas um parâmetro - a frequência central) e tem facilidade de comparação com outros estudos de modelagem, dada sua larga utilização.

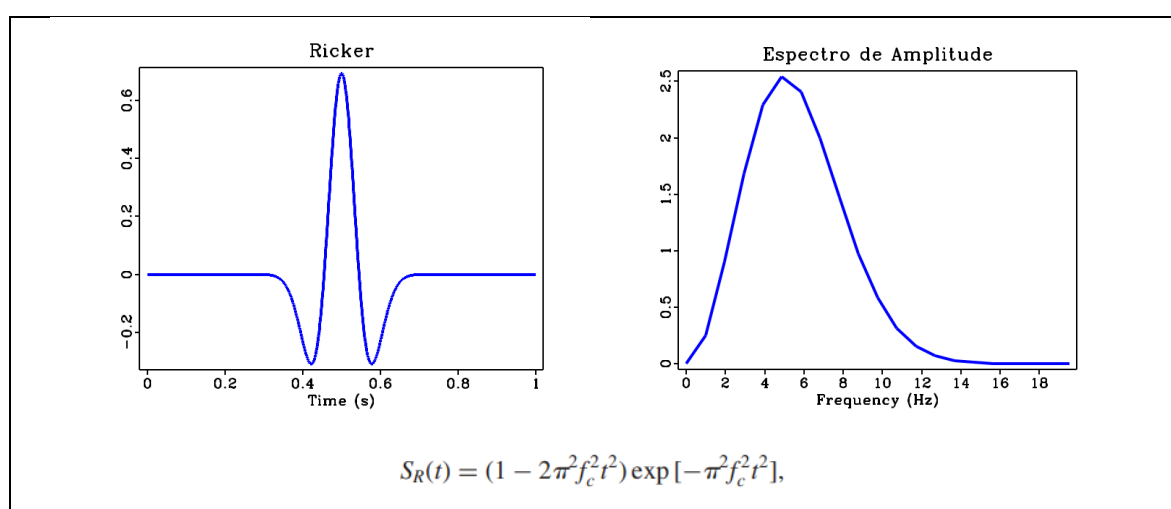


Figura II.2.6.3.1-9 – Assinatura da fonte (pulso do tipo Ricker) utilizada na modelagem, seu respectivo espectro de amplitude e a fórmula analítica utilizada para sua geração.

A Geometria de aquisição empregada neste estudo consistiu em duas posições de fonte para cada modelo, separadas de 60 Km. Os receptores estão posicionados ao longo da linha que conecta as duas fontes, com espaçamento de 25 m. Tanto a fonte como os receptores estão posicionados a 25 m de profundidade.

A propagação acústica na Área de Modelagem 1 está representada na **Figura II.2.6.3.1-10** e na **Figura II.2.6.3.1-11** a partir de imagens tipo *snapshots* da energia acústica emitida a partir de duas posições distintas, que denominamos de Barco A e Barco B, respectivamente. Esses *snapshots* representam o avanço do campo de onda emitido pela fonte ao longo de vários instantes de propagação pelo meio acústico. Nessas figuras o campo de onda é sobreposto ao modelo de velocidade. É possível perceber o avanço da frente de onda em todas as direções a partir da

posição da fonte. Cabe ressaltar que além da onda direta, a propagação simula ondas refletidas e refratadas que se propagam por todo o modelo, sendo que para a geração dos sismogramas sintéticos considera-se apenas o campo de onda na posição dos receptores, posicionados a uma profundidade constante de 25 m ao longo da linha que liga as posições dos Barcos A e B. O tempo de registro das modelagens foi de 60 s com um intervalo de amostragem de 10 ms. Os sismogramas correspondentes às posições de fonte nas posições dos Barcos A e B são mostradas na **Figura II.2.6.3.1-12** e **Figura II.2.6.3.1-13**. Nestes sismogramas o eixo horizontal corresponde à distância ao longo da linha que liga os Barcos A e B, contadas a partir da posição do Barco A. O eixo vertical corresponde ao tempo de propagação do campo de onda, contado a partir do instante em que a fonte foi acionada. Esses sismogramas representam, portanto, o campo de onda registrado em um intervalo de tempo de 60 segundos em cada um dos receptores posicionados ao longo das fontes posicionadas nos Barcos A e B. Tanto os snapshots como os sismogramas são representações gráficas do campo de onda, sendo os *snapshots* úteis para visualizar o avanço do campo de onda no espaço e os fenômenos de propagação envolvidos, enquanto os sismogramas são utilizados para visualizar o campo de onda que atinge um conjunto de receptores ao longo de um intervalo de tempo.

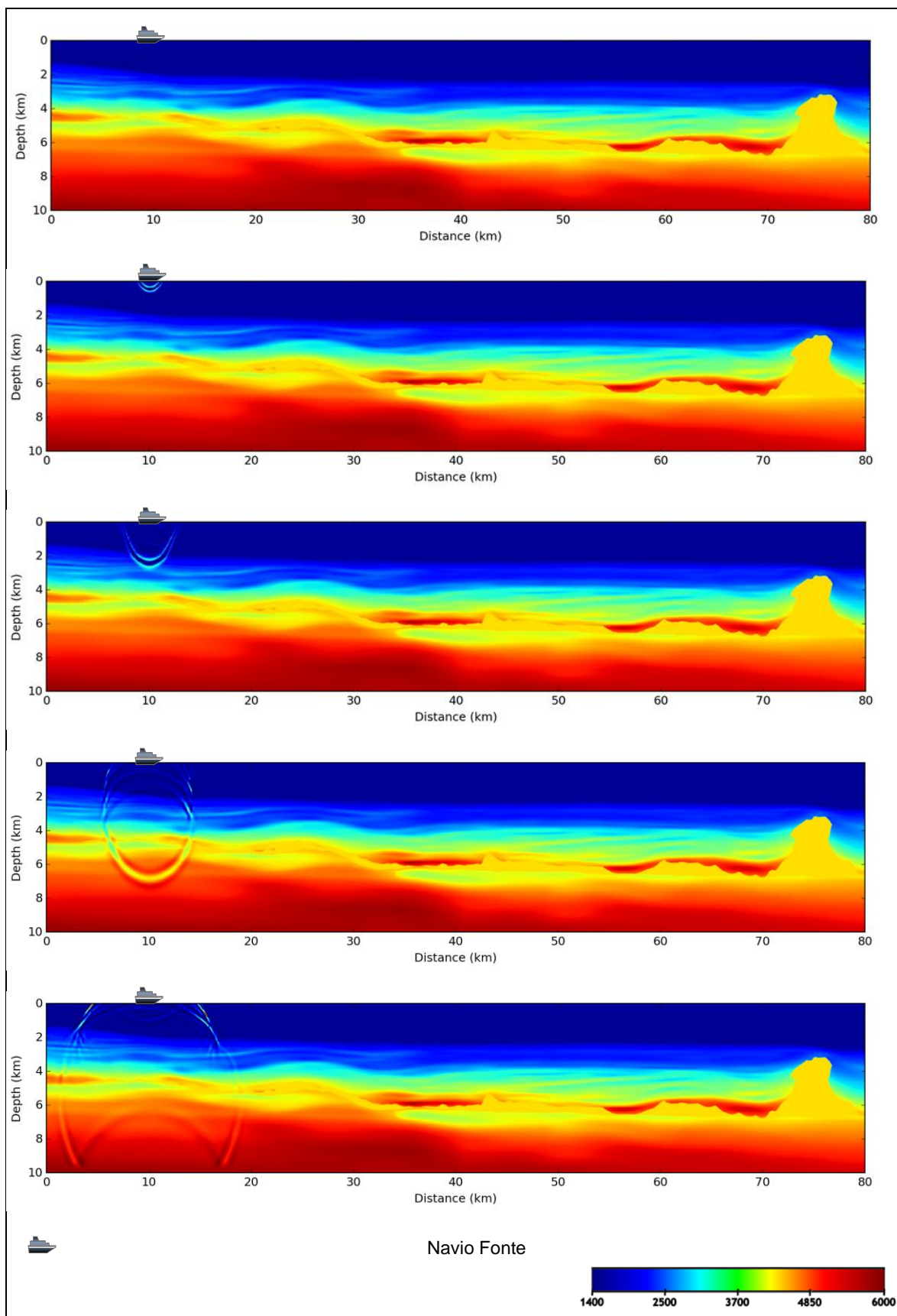


Figura II.2.6.3.1-10 – Exemplo de snapshots na Área de Modelagem 1 na situação em que a fonte está posicionada no Barco A.

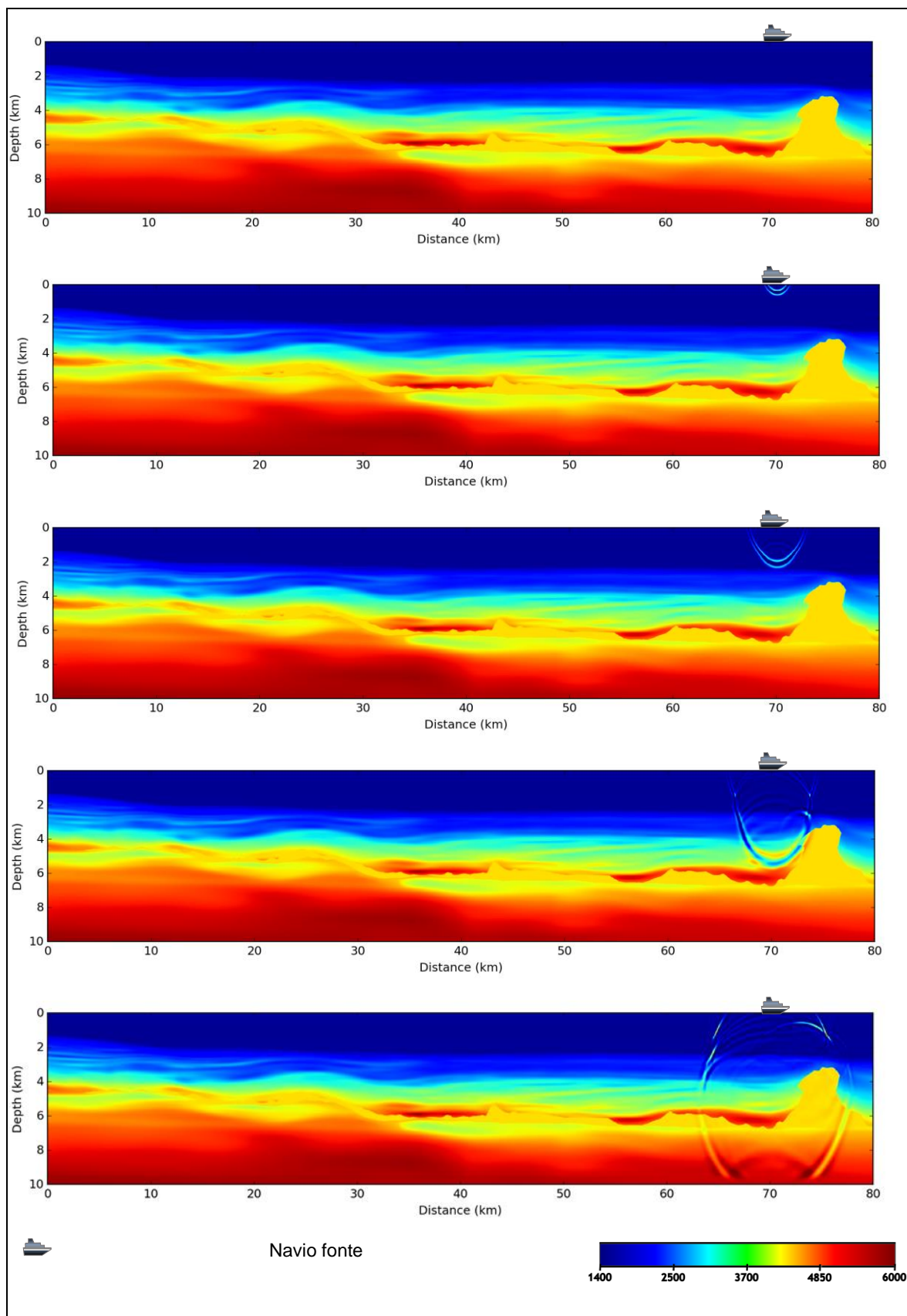


Figura II.2.6.3.1-11 – Exemplo de snapshots na Área de Modelagem 1 na situação em que a fonte está posicionada no Barco B.

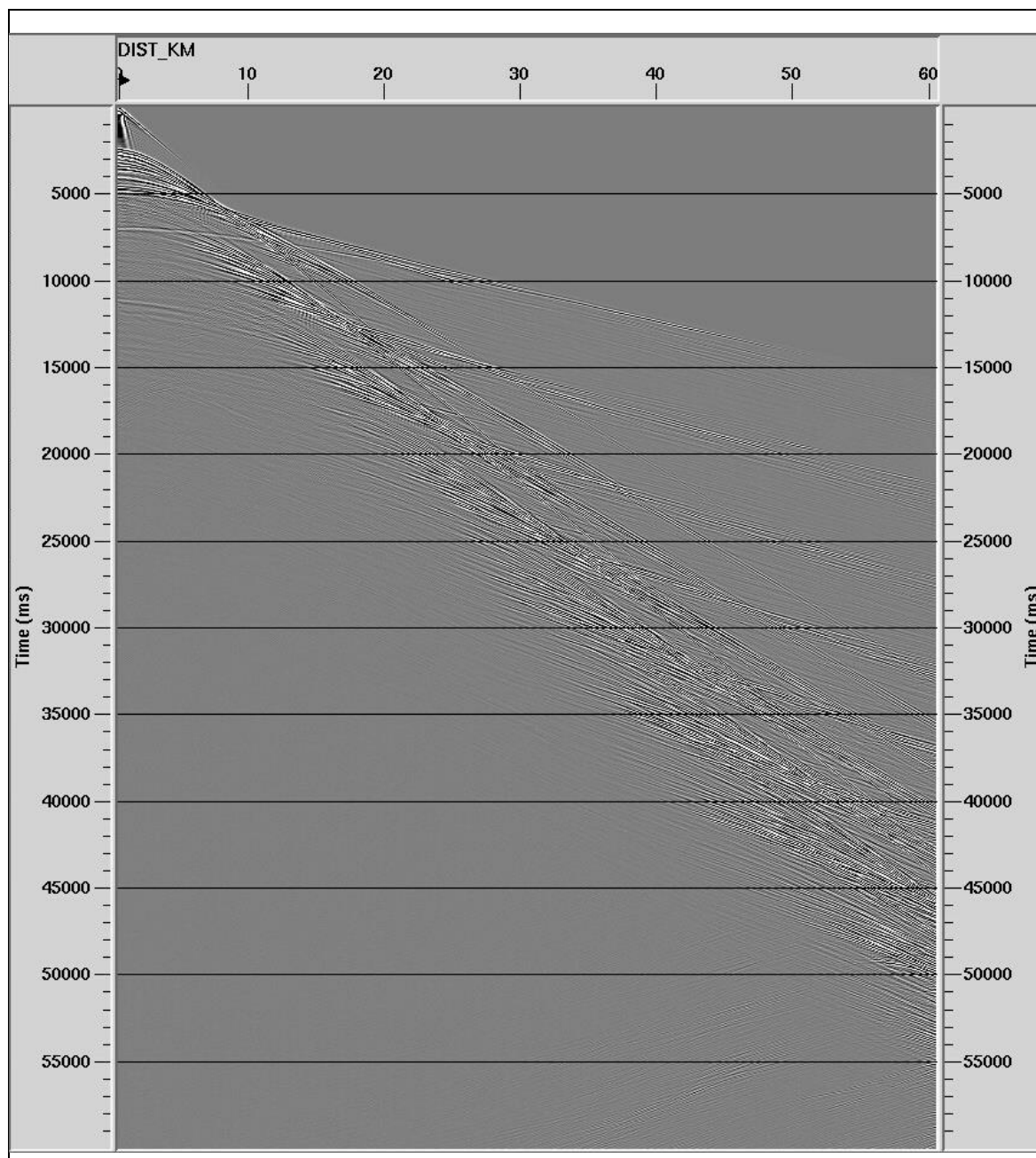


Figura II.2.6.3.1-12 – Sismograma na Área de Modelagem 1 na situação em que a fonte está posicionada no Barco A.

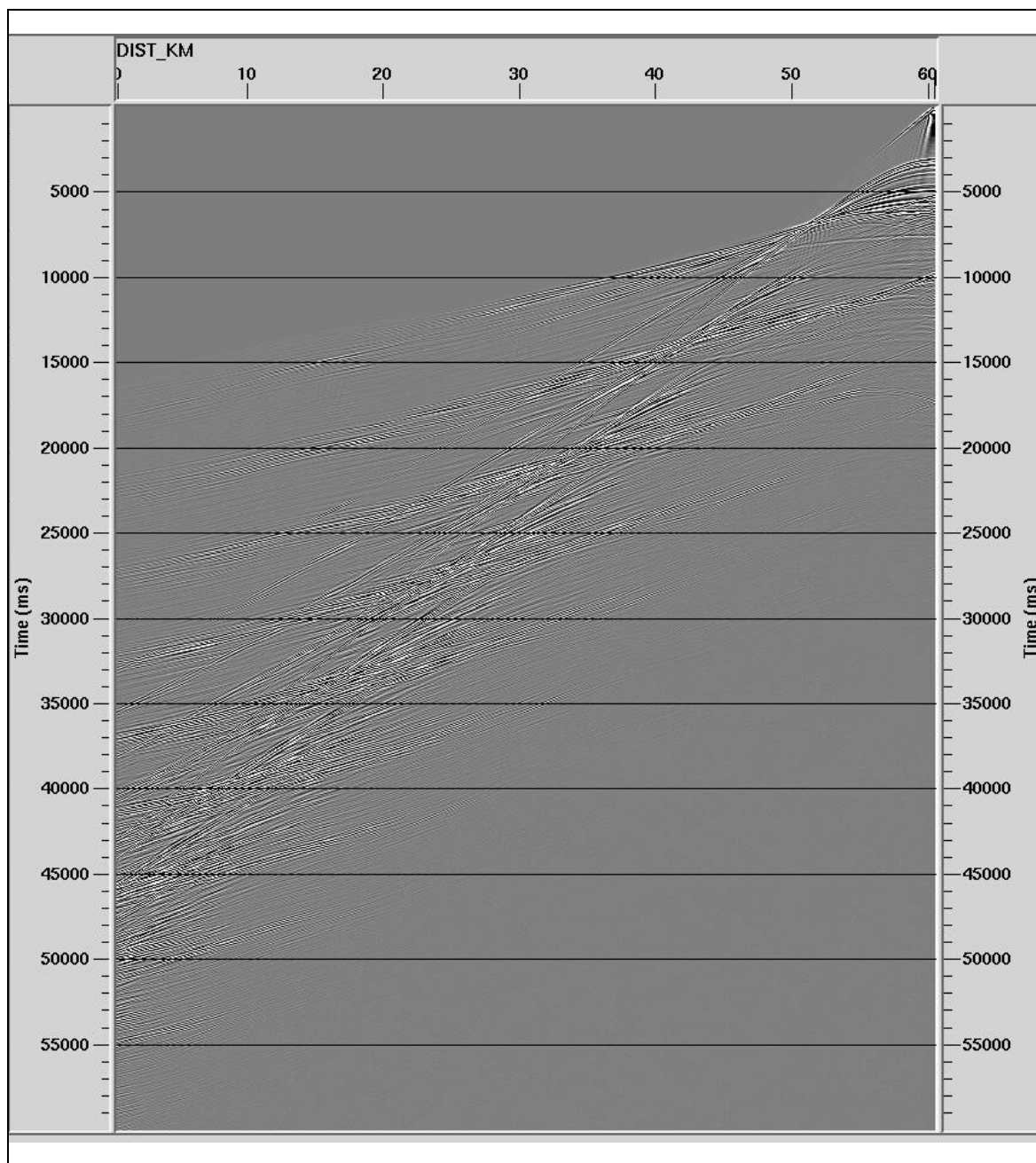


Figura II.2.6.3.1-13 – Sismograma na Área de Modelagem 1 na situação em que a fonte está posicionada no Barco B.

II.2.6.3.2 - Impactos sinérgicos

Duas fontes sonoras localizadas em intervalo de 60 Km

Foram modeladas, separadamente, a propagação do campo de onda emitido em duas posições distintas (nas posições dos barcos A e B), separadas entre si de

60 Km. Os sismogramas obtidos em cada uma dessas modelagens foram combinados de duas formas:

- I. Soma dos dois sismogramas, simulando a situação em que as duas fontes são emitidas simultaneamente; e
- II. Soma dos dois sismogramas de modo a maximizar a interferência construtiva em cada traço do sismograma.

Embora essa segunda situação seja impossível de replicar em uma situação real, ela é útil pois fornece um limite superior de interferência construtiva em cada um dos pontos de recepção entre os dois navios. A **Figura II.2.6.3.2-1** mostra, para a Área de Modelagem 1, os sismogramas obtidos nas seguintes situações: fonte posicionada no Barco A; fonte posicionada no Barco B; fontes disparadas simultaneamente nos Barcos A e B; máxima interferência construtiva entre as fontes A e B, para cada ponto de recepção. A **Figura II.2.6.3.2-2** mostra, para a Área de Modelagem 2, os sismogramas obtidos nas seguintes situações: fonte posicionada no Barco A; fonte posicionada no Barco B; fontes disparadas simultaneamente nos Barcos A e B; máxima interferência construtiva entre as fontes A e B, para cada ponto de recepção.

Fontes sonoras localizadas em intervalo de 60 Km e emitindo múltiplos disparos

Para simular uma situação mais realista, simulamos para os Barcos A e B os sismogramas que seriam obtidos caso a energia sonora fosse emitida a cada 11 segundos, intervalo típico de disparo para aquisições do tipo *streamer*. Esses sismogramas foram obtidos criando cópias atrasadas no tempo dos sismogramas modelados, com atrasos múltiplos de 11 s (11, 22, 33, ...) e somando o sismograma original com suas cópias deslocadas no tempo, porém mantendo o comprimento do registro em 60 s, como nos casos em que ocorre uma única emissão. Esses sismogramas com múltiplas emissões foram combinados de duas formas, de modo similar ao item anterior:

- I. Soma simples dos sismogramas dos Barcos A e B, o que equivale a uma emissão sincronizada dos dois Barcos;
- II. Soma dos dois sismogramas de modo a maximizar a interferência construtiva em cada traço do sismograma.

Embora essa segunda situação seja impossível de replicar em uma situação real, ela é útil pois fornece um limite superior de interferência construtiva em cada um dos pontos de recepção enquanto os dois navios emitem múltiplos disparos. A **Figura II.2.6.3.2-3** mostra, para a Área de Modelagem 1, os sismogramas referentes aos múltiplos disparos da fonte nos Barcos A e B separadamente, aos disparos simultâneos nos Barcos A e B, e o sismograma quando a interferência entre os disparos nos Barcos A e B é máxima em cada ponto de recepção. A **Figura II.2.6.3.2-4** apresenta os sismogramas referentes à Modelagem 2.

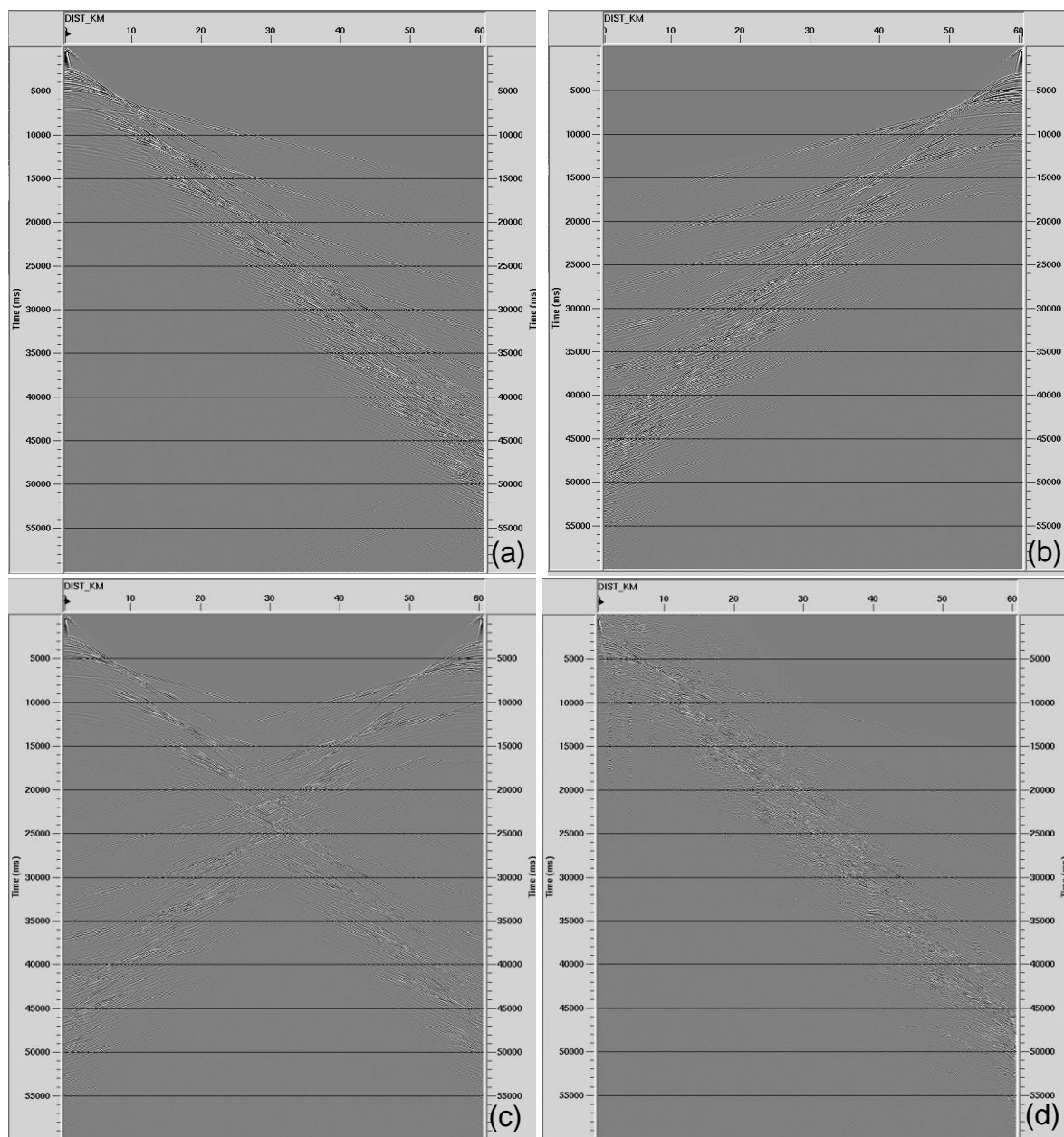


Figura II.2.6.3.2-1 – Sismogramas da Área de Modelagem 1: (a) Fonte no Barco A; (b) Fonte no Barco B; (c) Fontes simultâneas nos Barcos A e B ;(d) Máxima interferência construtiva entre as fontes nos Barcos A e B.

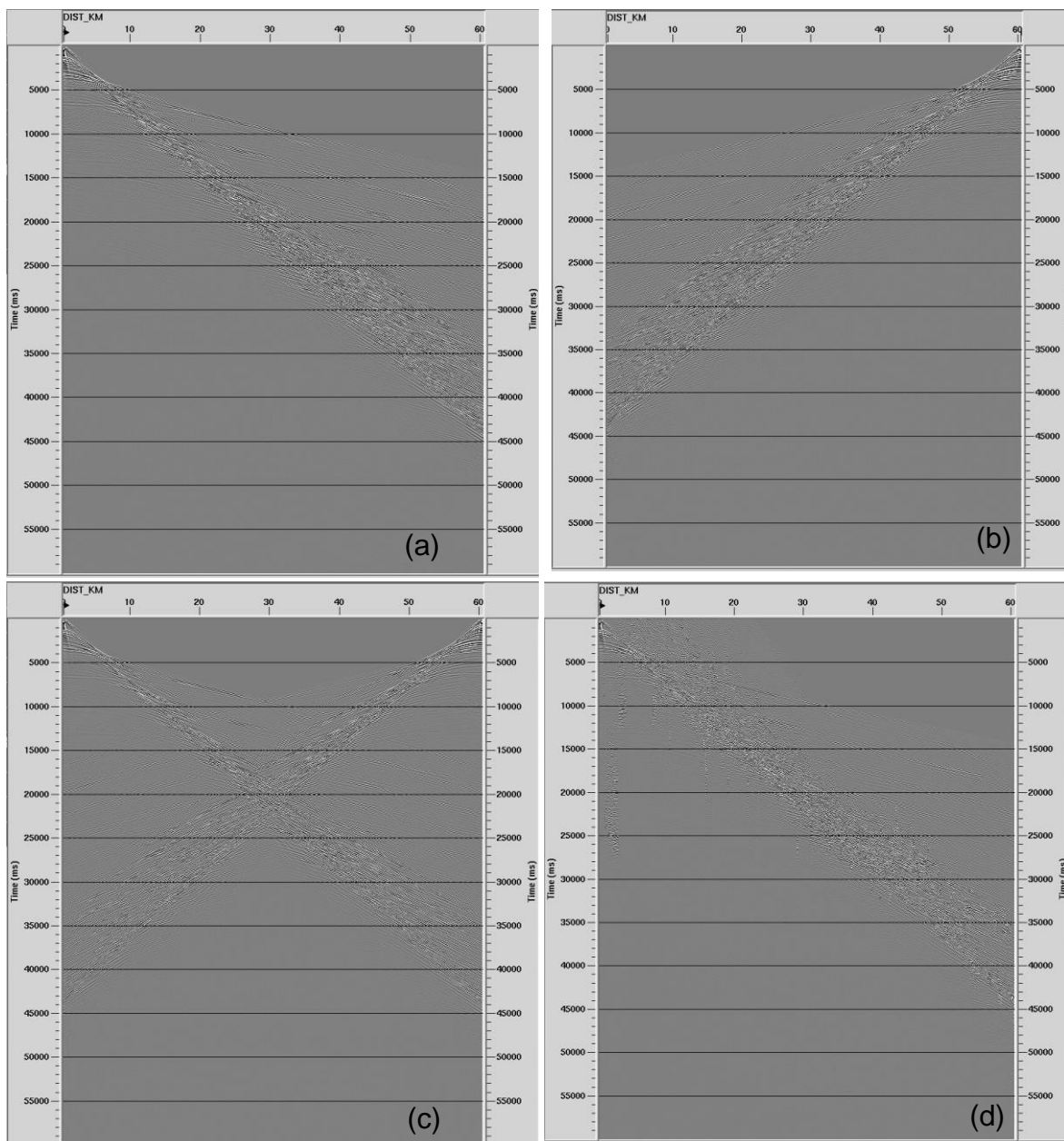


Figura II.2.6.3.2-2 – Sismogramas da Área de Modelagem 2: (a) Fonte no Barco A; (b) Fonte no Barco B; (c) Fontes simultâneas nos Barcos A e B ;(d) Máxima interferência construtiva entre as fontes nos Barcos A e B.

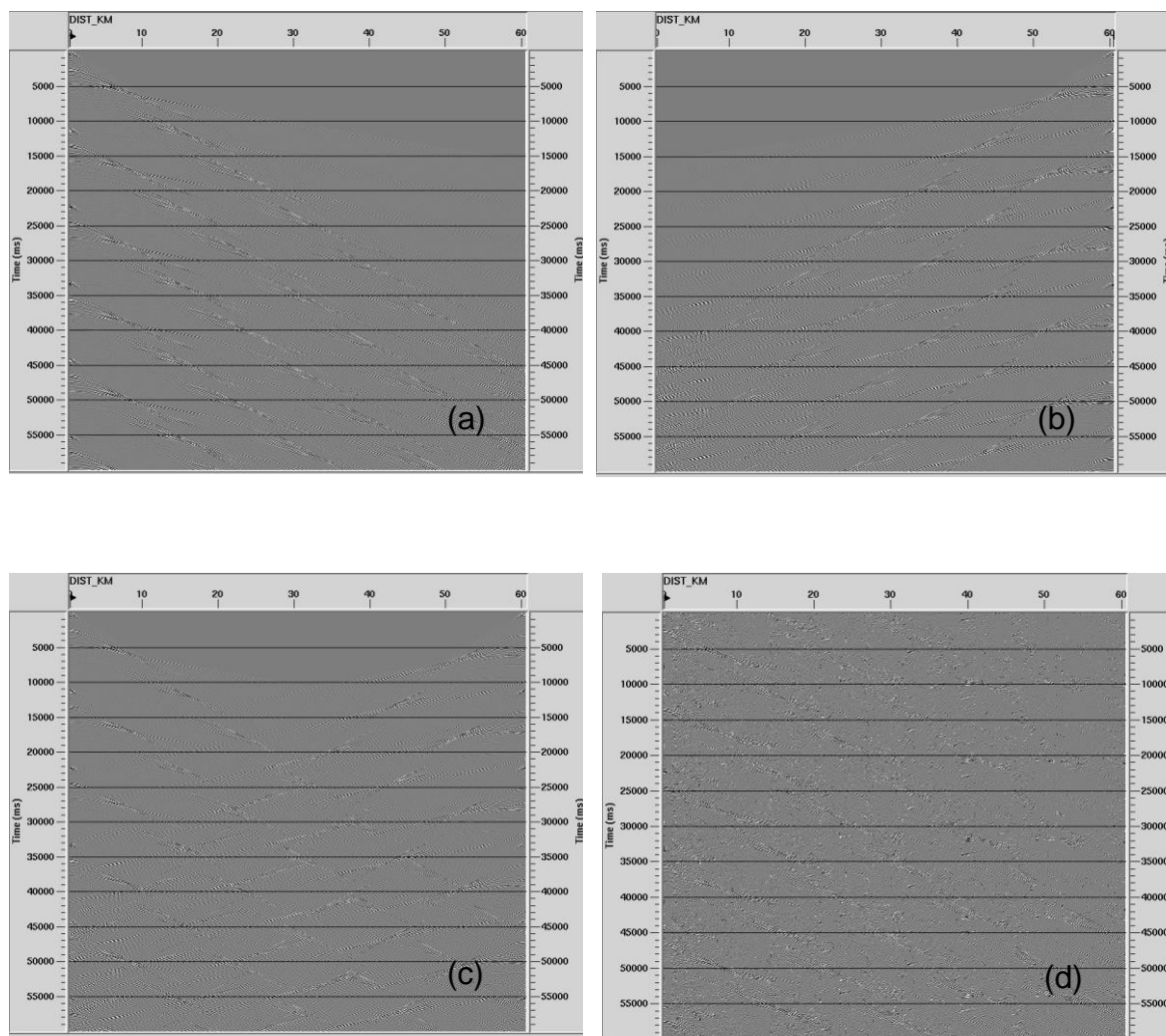


Figura II.2.6.3.2-3 – Sismogramas resultantes da modelagem simulando múltiplos disparos na Área de Modelagem 1: (a) Múltiplas emissões no Barco A; (b) Múltiplas emissões no Barco B; (c) Múltiplos disparos sincronizados nos Barcos A e B; (d) Máxima interferência construtiva entre os múltiplos disparos nos Barcos A e B.

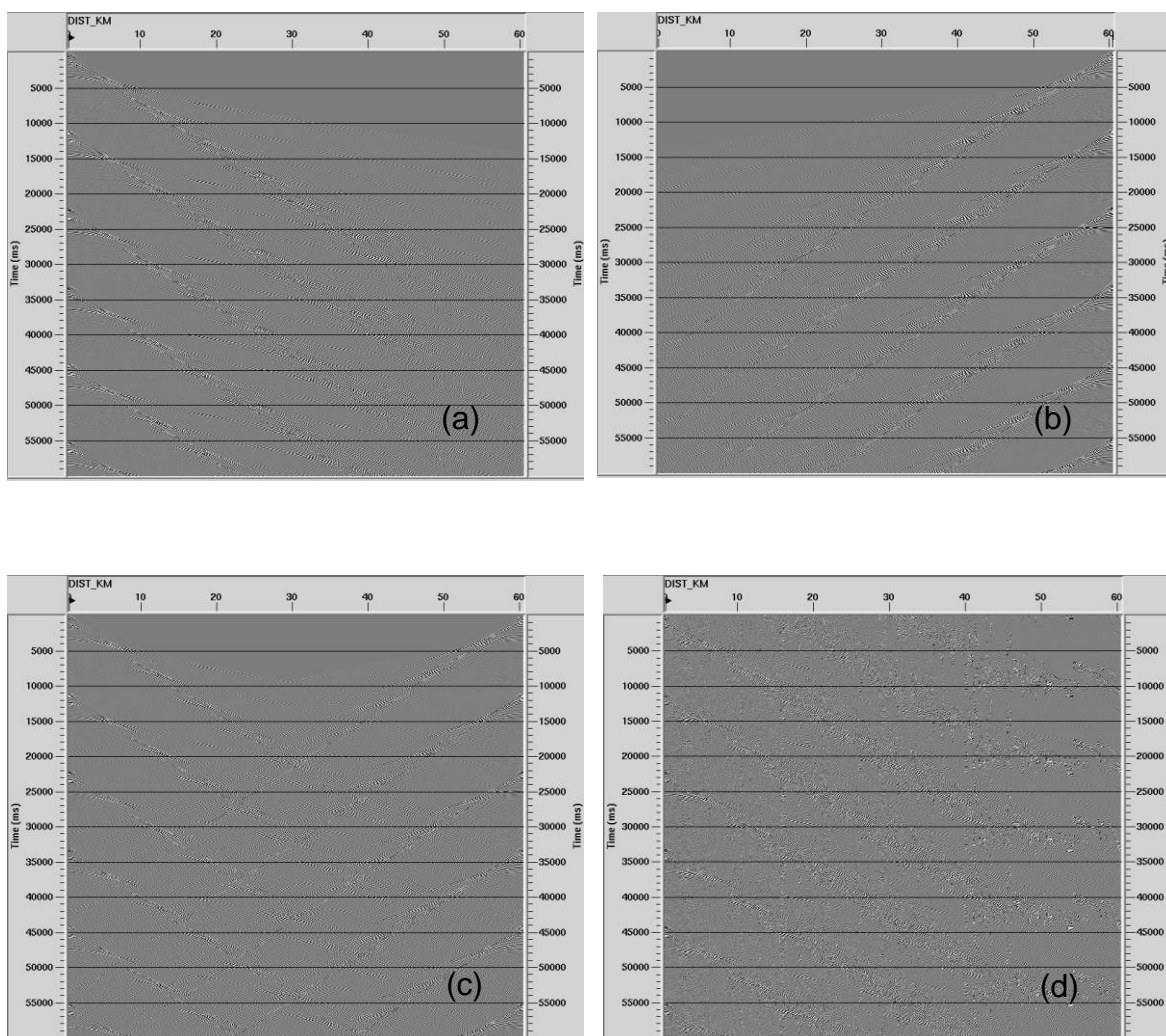


Figura II.2.6.3.2-4 – Sismogramas resultantes da modelagem simulando múltiplos disparos na Área de Modelagem 2: (a) Múltiplas emissões no Barco A; (b) Múltiplas emissões no Barco B; (c) Múltiplos disparos sincronizados nos Barcos A e B; (d) Máxima interferência construtiva entre os múltiplos disparos nos Barcos A e B.

II.2.6.3.3 - Descrição da Fonte Sísmica

A assinatura de uma fonte sísmica com as mesmas características da que será utilizada para a área de pesquisa está representada na **Figura II.2.6.3.3-1**. Esta assinatura foi obtida por modelagem com o programa *Gundalf*, considerando um arranjo de fonte com 24 elementos posicionados a uma profundidade de 6m, volume total de 5.085 polegadas cúbicas e pressão de operação nos canhões de ar comprimido de 2.000 psi. A unidade utilizada para representar o pulso emitido pela fonte é o Bar-m. Essa unidade é o produto da variação de pressão, em Bar,

pela distância em relação ao centro do arranjo, em metros. É possível notar que o pico de energia atinge o valor de 75,8 Bar-m.

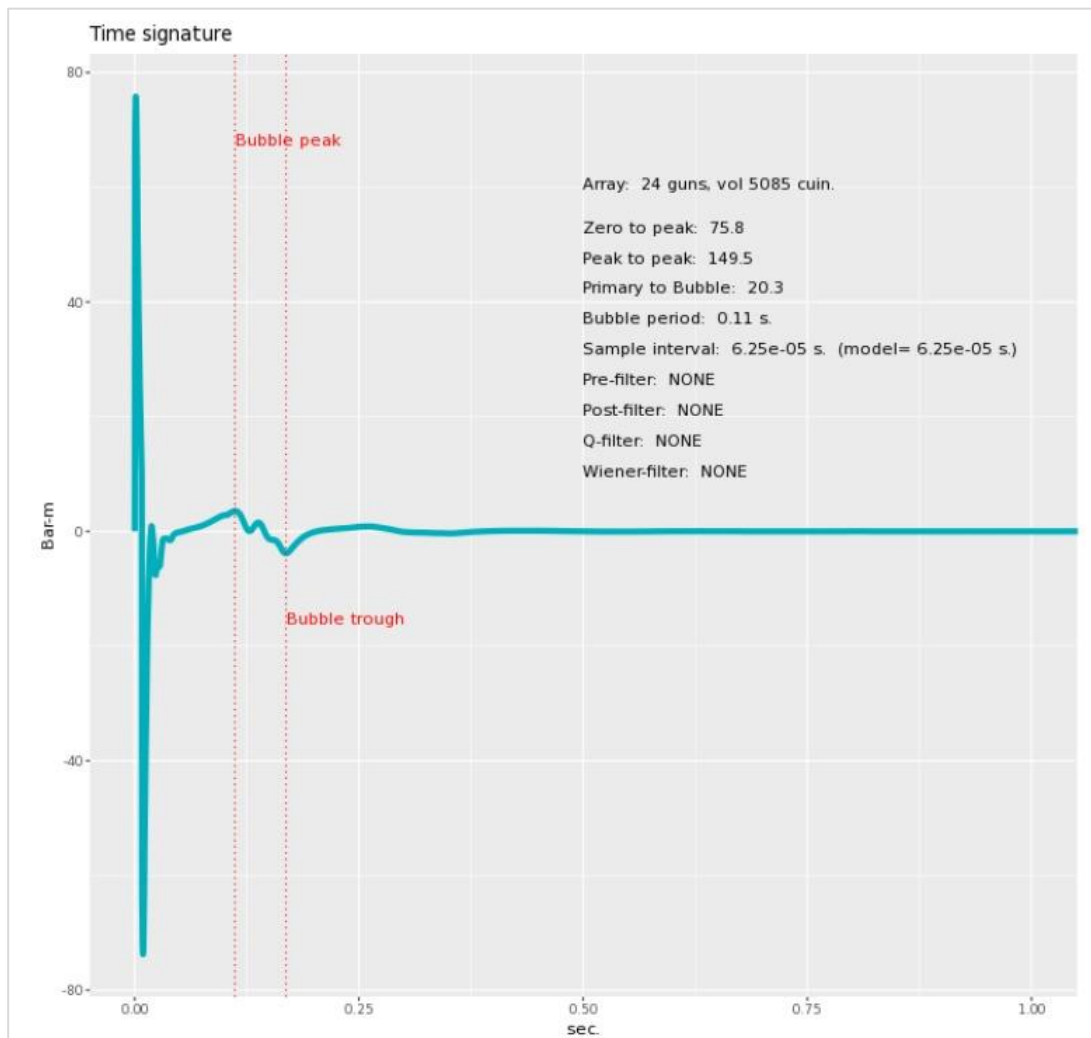


Figura II.2.6.3.3-1 – Assinatura da fonte formada por um arranjo de 24 elementos.

O espectro de amplitude da assinatura da fonte está representado pela linha azul na **Figura II.2.6.3.3-2**. O valor de maior amplitude do espectro encontra-se na frequência de 51.76 Hz, e a partir dessa frequência as amplitudes decaem fortemente. A linha vermelha representa o fluxo acumulado de energia emitido para cada frequência pela fonte a partir de 0 Hz, mostrando que praticamente toda a energia emitida está confinada na faixa entre 0 e 250 Hz.

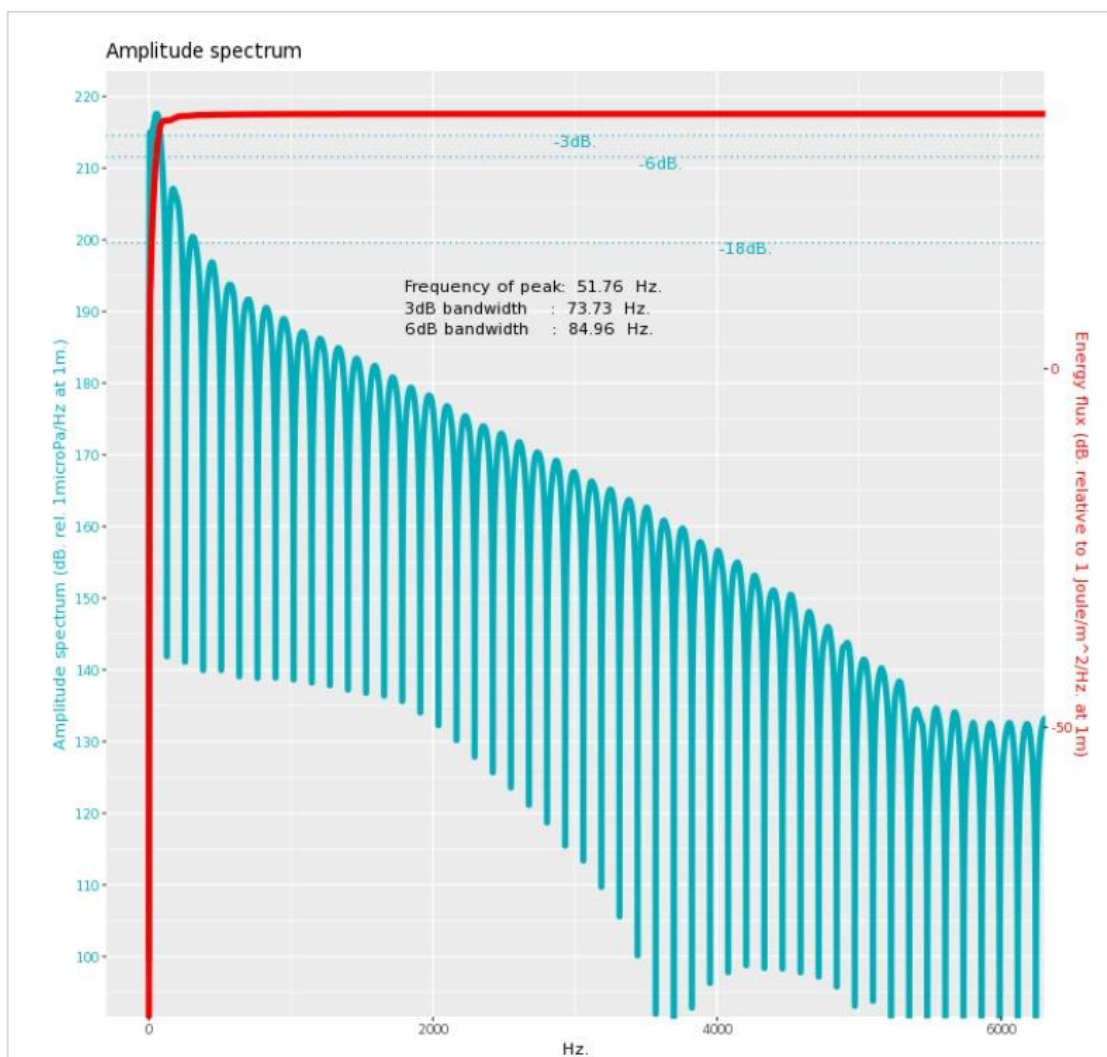


Figura II.2.6.3.3-2 – Espectro de amplitude da assinatura da fonte formada por um arranjo de 24 elementos.

A assinatura da fonte mostrada na **Figura II.2.6.3.3-1** não corresponde a uma distância específica em relação à fonte. Para ilustrar o efeito da divergência esférica sobre o campo de onda emitido pela fonte, foi calculado o Nível de Exposição Sonora da assinatura para diferentes distâncias a partir da fonte, mostrado na **Figura II.2.6.3.3-3**. O eixo vertical representa o Nível de Exposição Sonora em dB, utilizando como referência a Exposição Sonora de 1 microPa a uma distância de 1 m da fonte, e o eixo horizontal representa a distância entre a posição da fonte e a posição em que é avaliada a energia do campo de onda resultante. Para uma distância de 1 m da fonte o Nível de Exposição Sonora é de 233.4 dB.

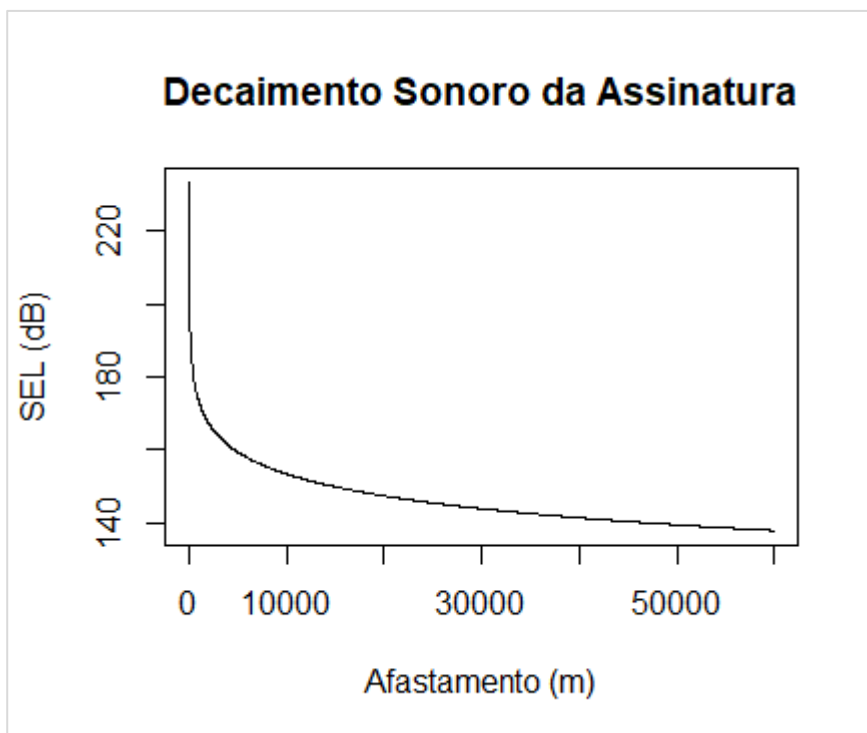


Figura II.2.6.3.3-3 – *Nível de Exposição Sonora da fonte formada por um arranjo de 24 elementos para afastamentos até 60000 m.*

II.2.6.3.4 - Calibração dos dados modelados

A fim de estimar uma curva de decaimento sonoro que represente com fidelidade a atividade de aquisição sísmica, foi realizada a calibração da amplitude dos dados modelados, utilizando como referência um sismograma de um dado real no Campo de Marlim com os mesmos parâmetros de aquisição dos dados *Streamer* da campanha Cluster BC. Por causa da irregularidade das posições de fonte e receptores no dado de campo, não foi possível reproduzir na modelagem uma geometria idêntica à da aquisição. Os dados modelados no ponto A ficaram a uma distância de 440 m de um sismograma do Programa de Aquisição 0258_3D_Marlim_Spec, utilizado para a calibração. Essa distância não interfere na qualidade da calibração, pois a energia registrada nos sismogramas varia lentamente ao longo de uma linha de aquisição sísmica, como pode ser verificado na **Figura II.2.6.3.4-1**, onde são mostradas as curvas de decaimento sonoro de três sismogramas, espaçados de 450m. As três curvas apresentam valores de Nível de Exposição Sonora e curvas de decaimento similares, atestando que o sismograma

utilizado para a calibração, mostrado no centro da figura, representa adequadamente o decaimento da energia sonora da energia emitida por fontes sísmicas nas proximidades do ponto A.

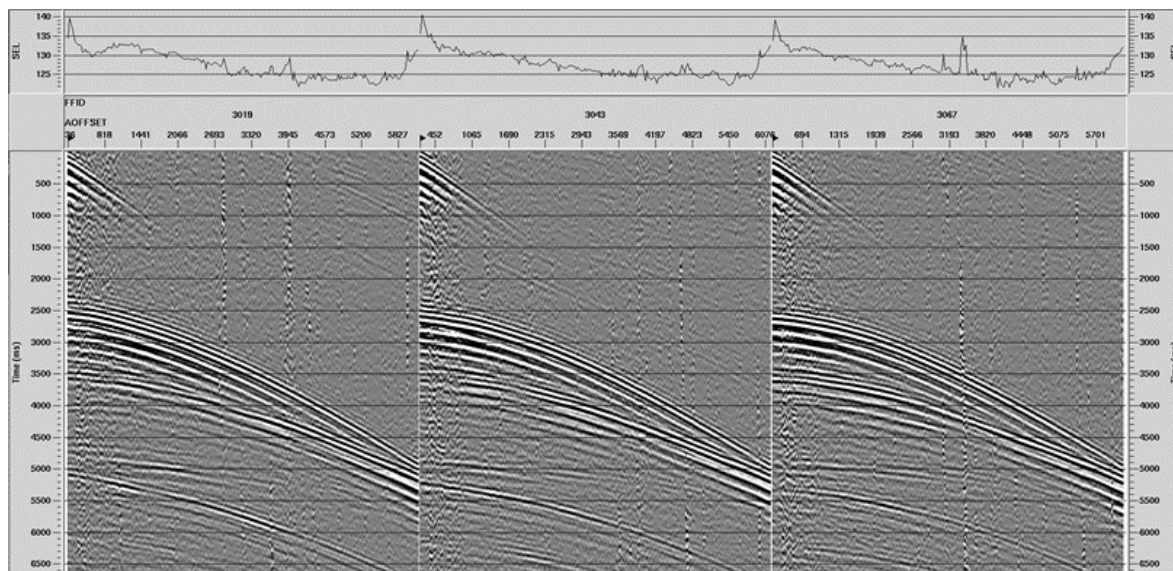


Figura II.2.6.3.4-1 – Sismogramas nas proximidades do ponto A com a curva de decaimento sonoro sobreposta, espaçados de 450 m. O sismograma na posição central foi utilizado para calibrar as amplitudes dos dados modelados.

Para realizar a calibração dos dados modelados é necessário primeiro condicionar os dados de campo, para compatibilizá-los. Os valores de amplitude foram convertidos para a unidade de micropascal, e para adequar o conteúdo de frequência ao dos dados modelados, foi efetuada uma reamostragem para um intervalo de 10 ms, seguida de um filtro corta-altas. A **Figura II.2.6.3.4-2** mostra o sismograma de campo utilizado para a calibração após o condicionamento, a porção do sismograma sintético obtido com a fonte posicionada no ponto A, utilizado como entrada para a calibração, e o sismograma sintético após calibração e adição de ruídos característicos dos dados de campo. Após a calibração e adição de ruídos o sismograma sintético apresenta amplitudes dos eventos sísmicos e nível de ruído bastante similar aos de campo.

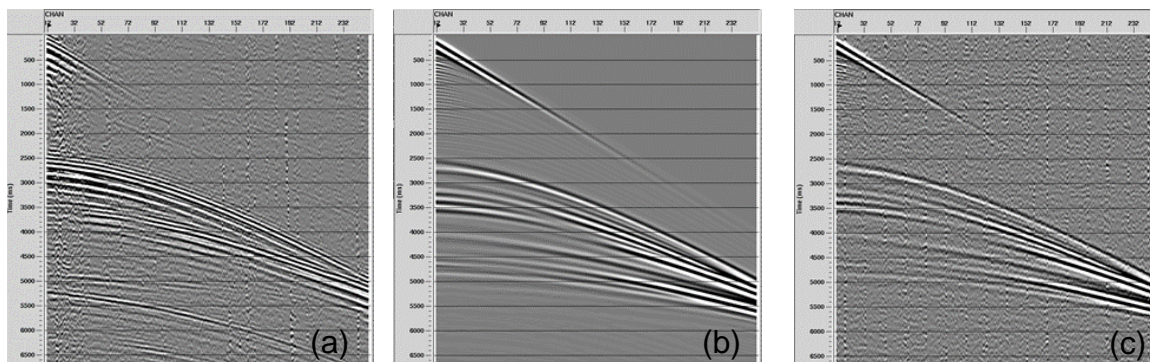


Figura II.2.6.3.4-2 – Sismogramas utilizados para calibrar as amplitudes dos dados modelados: (a) Sismograma real com posição da fonte a 440 m do Barco A; (b) Sismograma sintético com fonte na posição do Barco A, entrada para calibração (c) Sismograma sintético com fonte na posição do Barco A após a calibração e com adição de ruídos característicos da área em estudo.

Após essas adequações no dado de campo, foi calculada uma curva de decaimento sonoro que serviu de referência para a calibração de amplitudes do dado modelado, mostrada na **Figura II.2.6.3.4-3**. Efetuada a calibração de amplitudes dos dados sintéticos, foi calculado, a partir do sismograma sintético do Barco A, o Nível de Exposição Sonora restrito à faixa de afastamentos presente no dado de Marlim, com e sem o ruído ambiental característico do sismograma real adicionado. Essa curva está representada na **Figura II.2.6.3.4-4**.

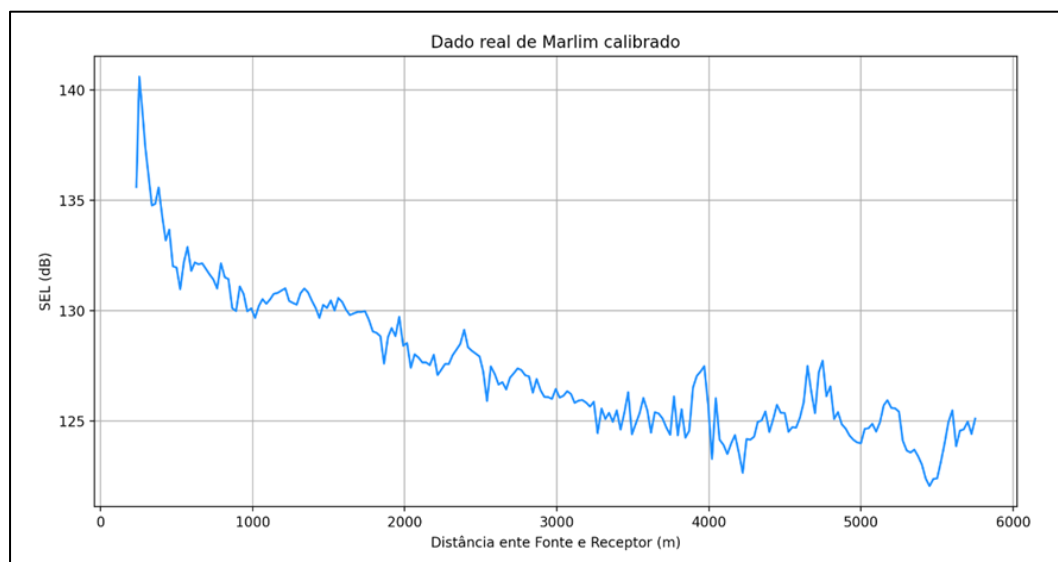


Figura II.2.6.3.4-3 – Nível de Exposição Sonora (dB) calculado a partir de sismograma de Marlim após reamostragem e aplicação de filtro corta-altas. As coordenadas da fonte estão posicionadas a 440 m da posição do Barco A.

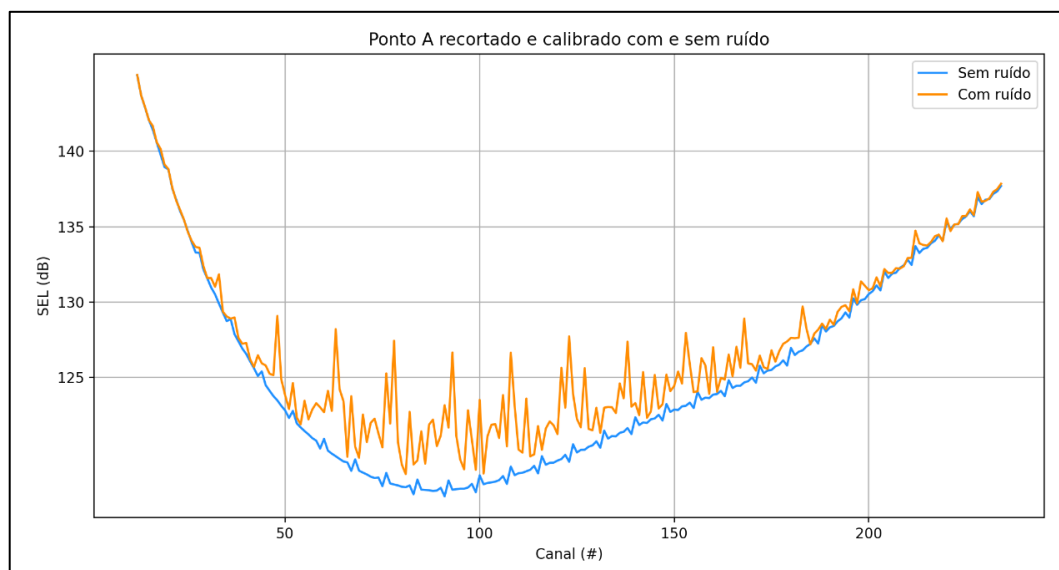


Figura II.2.6.3.4-4 – Nível de Exposição Sonora (dB) calculado a partir de sismograma sintético obtido com fonte na posição do Barco A, restrito à faixa de afastamento presente no dado real. As amplitudes foram calibradas utilizando como referência sismograma do dado real com fonte posicionada a 440 m do Barco A, e ruído ambiental característico do sismograma real foi adicionado.

II.2.6.3.5 - Cálculo do decaimento sonoro

O entendimento de como a variação de pressão do campo de onda emitido pelas fontes sísmicas, após a propagação em subsuperfície e registro nos hidrofones, se relaciona com as amplitudes dos traços no dado sísmico é essencial para o cálculo do Nível de Exposição Sonora.

A variação de pressão ocasionada pela emissão de energia sonora é captada pelo hidrofone e associada a uma voltagem específica, proporcional à variação de pressão. Em seguida, o sinal captado passa por um amplificador, que aplica um ganho a essa voltagem, e por um conversor A/D, que amostra um sinal contínuo em uma série de amostras com intervalo de amostragem predefinido. A voltagem amplificada associada a cada amostra é convertida em valores discretos de amplitude pelo instrumento de registro.

Alguns conceitos importantes:

- 1) Sensitividade do hidrofone (S) (volts/microbar): relação entre a voltagem registrada (V) e a variação da pressão medida (P):

$$V = PS \quad (1.1)$$

2) Ganho (G) aplicado a voltagem de saída (V') do hidrofone:

$$V' = GV \quad (1.2)$$

3) Volts por bit (B) (volts/bit): relação entre voltagem de saída do hidrofone (V') e os valores discretos de amplitude registrados pelo instrumento (A):

$$V' = AB \quad (1.3)$$

Ao se combinar as expressões (1.1), (1.2) e (1.3), tem-se que:

$$P = (A/G)(B/S)$$

Onde, B/S é a sensibilidade em microbar/bit.

Obtém-se então a relação entre a variação de pressão e a amplitude registrada no traço sísmico, em μbar . Entretanto, como a unidade de pressão utilizada para o cálculo do nível de exposição sonora é o μPa , utilizamos relação $1 \text{ Pa} = 10^{-5} \text{ bar}$ para converter as variações de pressão para μPa .

A quantidade de energia acústica incidente em um ponto durante um intervalo de tempo pode ser estimada integrando no tempo a pressão ao quadrado do campo de onda. Essa medida de energia é denominada de Exposição Sonora, E_p , e é calculada segundo a equação:

$$E_p = \int_0^T p_n^2(t) dt \quad (1.4)$$

Já o Nível de Exposição Sonora (SEL), em dB, é calculado em relação a uma quantidade de energia de referência - $E_{p,0}$; para a água, $E_{p,0} = 1 \mu\text{Pa}^2\text{s}$. O Nível de Exposição Sonora é calculado segundo a equação abaixo:

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\frac{E_p}{E_{p,0}} \right) \quad (1.5)$$

Para aplicar essas equações aos dados sísmicos, nos quais os dados de pressão são amostrados discretamente, segundo um intervalo de amostragem Δt , a integral da equação (1.4) é aproximada por um somatório, onde n representa o número de amostras do traço sísmico:

$$E_p = \sum_0^{n\Delta t} p^2(n\Delta t) \Delta t \quad (1.6)$$

II.2.6.4 - Resultados

Neste estudo, o intervalo de tempo utilizado no cálculo dos Níveis de Exposição Sonora (SEL) corresponde ao comprimento dos registros sísmicos obtidos da modelagem (60 segundos), e este intervalo foi utilizado em todos os cálculos, seja para emissões simples ou múltiplas, seja para uma ou duas posições de fonte.

As curvas de decaimento acústico obtidas para as Áreas de Modelagem 1 e 2 quando a fonte está posicionada no Barco A estão representadas na **Figura II.2.6.4-1** e **Figura II.2.6.4-2**. No início das curvas, nas proximidades da fonte (posição X = 32.500 m), o nível de exposição sonora é de cerca de 171 dB. Nos primeiros 2.000 m a partir da posição da fonte ocorre uma forte taxa de atenuação, chegando a valores inferiores a 120 dB, seguido de uma elevação abrupta até atingir um máximo local entre 4.000 e 8.000 m de distância, para um nível por volta de 140 dB. A partir dessa distância as curvas seguem um decaimento mais suave, mantendo-se numa faixa entre 135 e 125 dB até 60 km de distância entre a fonte e o receptor.

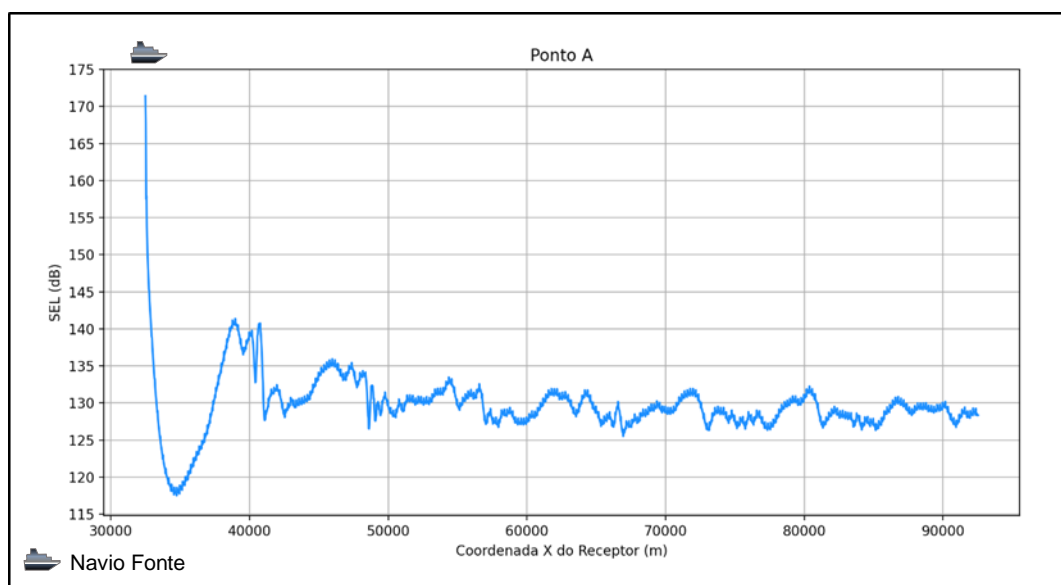


Figura II.2.6.4-1 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para a situação na qual a fonte está posicionada no Barco A (X = 32.500 m).

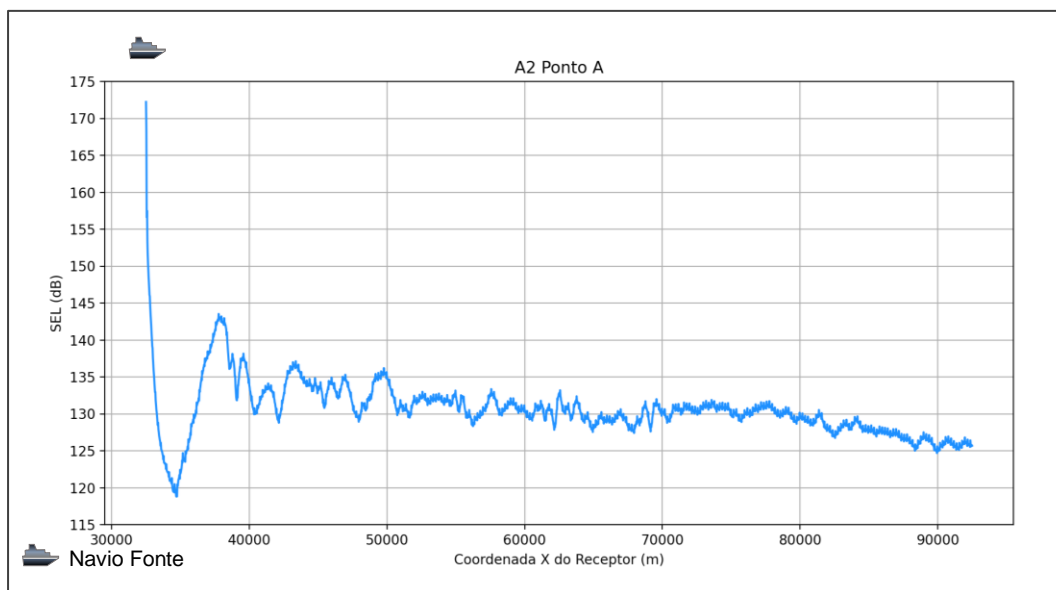


Figura II.2.6.4-2 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para a situação na qual a fonte está posicionada no Barco A ($X = 32.500$ m).

Para verificar se a distância de até 60 Km é suficiente para que o decaimento sonoro a partir da fonte atinja níveis próximos aos naturais do ambiente, foram estimados os níveis sonoros do ruído ambiental a partir dos dados sísmicos de campo utilizados na calibração dos dados modelados. As porções dos sismogramas onde o ruído ambiental é dominante foram separadas e agrupadas, gerando um sismograma representativo do ruído ambiental presente durante a aquisição da linha sísmica utilizada na calibração (**Figura II.2.6.4-3**).

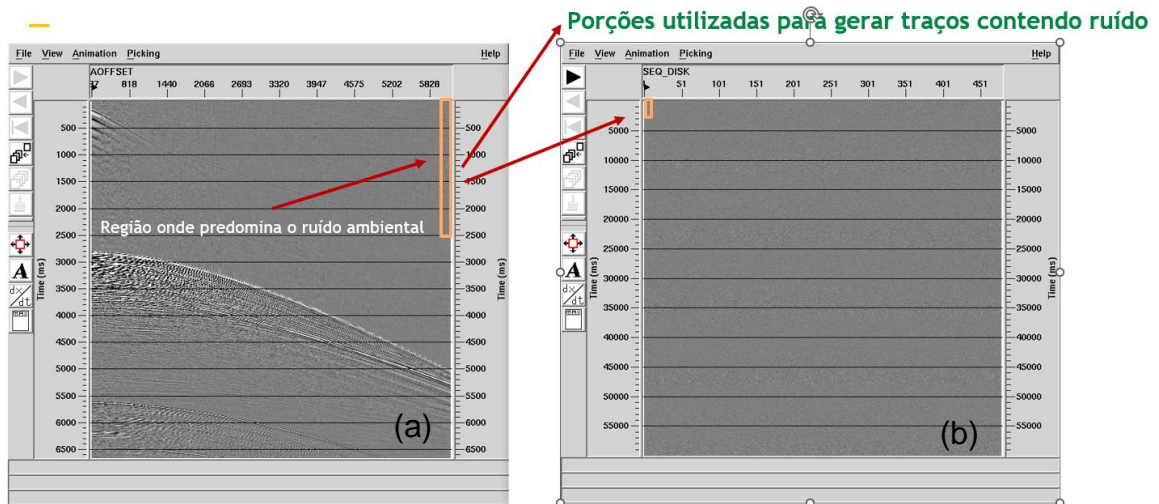


Figura II.2.6.4-3 – Estimando o ruído ambiental a partir de sismogramas: (a) Sismograma de campo com porção onde predomina o ruído ambiental destacada; (b) Sismograma formado a partir da junção de partes do sismograma onde predomina o ruído ambiental. Foram utilizados vários sismogramas para compor esta seção, com comprimento de registro de 60 s.

Foram calculados os Níveis de Exposição Sonora (SEL) de 9242 traços representativos do ruído ambiental, com o mesmo comprimento de registro dos dados modelados (60 segundos). Na **Figura II.2.6.4-4** é mostrado o histograma dos valores de SEL do conjunto de traços da seção contendo o ruído ambiental estimado, do qual foram calculados a média (132 dB) e o desvio padrão (1,64 dB). Uma porção representativa dos traços apresenta valores de SEL dentro do intervalo com largura de dois desvios padrão centrados na média (intervalo entre 130,36 e 133,64 dB). Essa faixa de valores foi sobreposta à curva de Nível de Exposição Sonora para a situação em que a fonte está posicionada na posição do Barco A e são emitidos múltiplos disparos, na Área de Modelagem 1 (**Figura II.2.6.4-5**), mostrando que a uma distância de 35 Km da fonte a energia emitida pelos múltiplos disparos decai para níveis sonoros próximos aos do ruído ambiental.

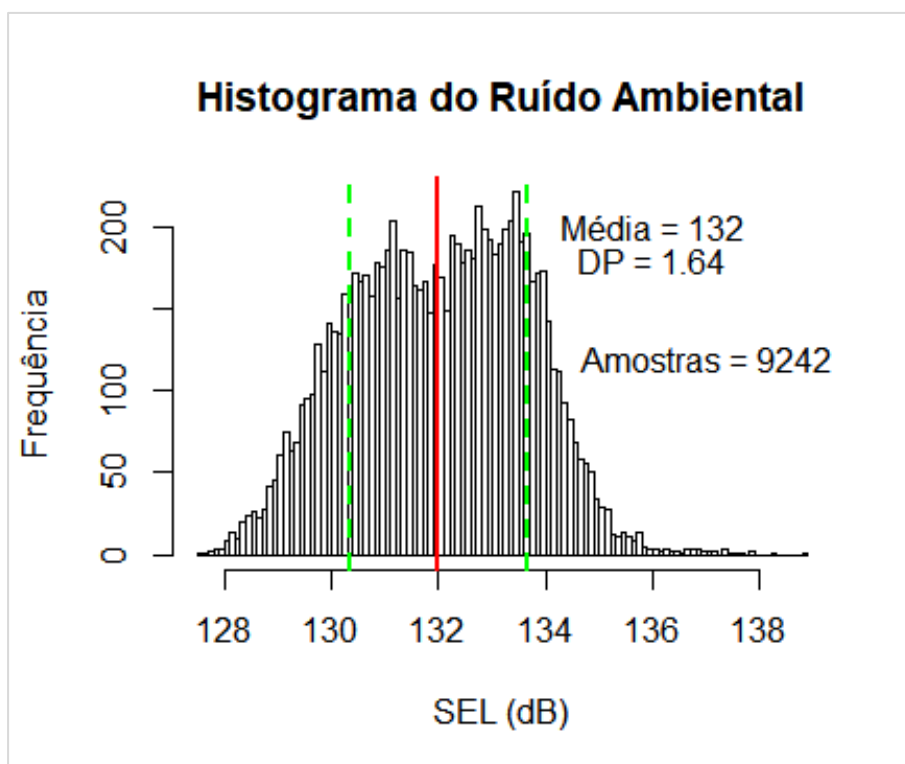


Figura II.2.6.4-4 – Histograma dos valores de SEL do conjunto de traços agrupados para estimar o ruído ambiental a partir de sismogramas. A faixa de valores entre as curvas verdes tem largura de dois desvios padrão e está centrada na média (linha vermelha).

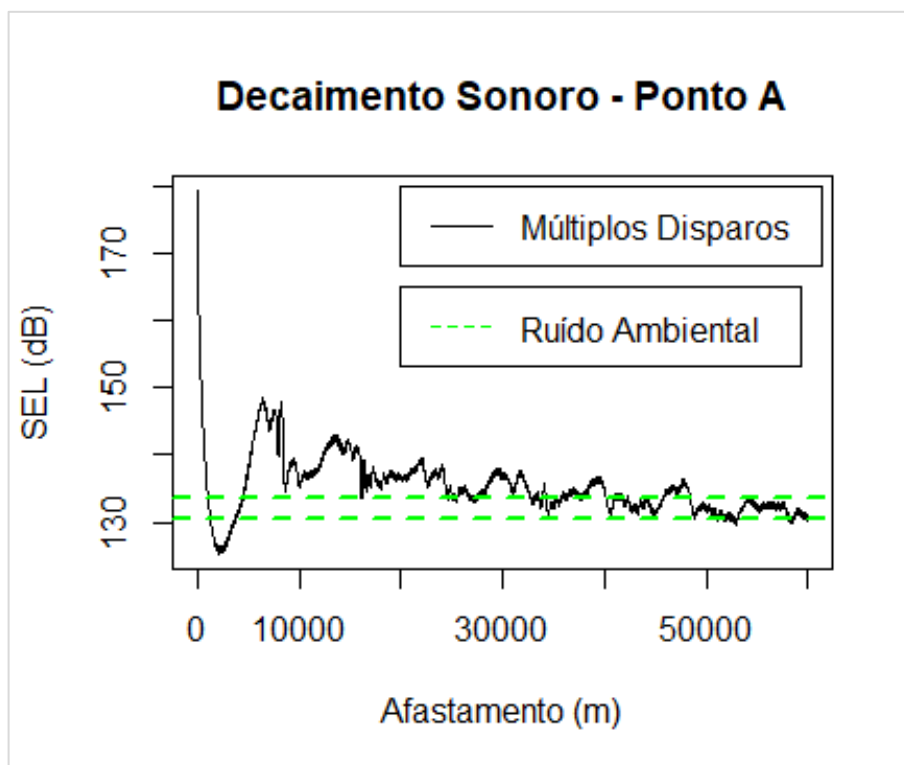


Figura II.2.6.4-5 – Curva de decaimento sonoro para Área de Modelagem 1 com fonte no ponto A e emissão de múltiplos disparos (linha preta). A região entre as linhas verdes tracejadas representa o nível de ruído ambiental estimado a partir de sismogramas (130,36 a 133,64 dB). A partir de aproximadamente 35 Km de distância da fonte o Nível de Exposição Sonora associado a energia dos múltiplos disparos decai para níveis sonoros próximos aos do ruído ambiental.

Na **Figura II.2.6.4-6** o gráfico do Nível de Exposição Sonora está posicionado acima do sismograma obtido com a fonte posicionada no Barco A, de modo a relacionar o comportamento da curva de decaimento sonoro com os eventos sísmicos observados no sismograma. O comportamento da curva é explicado pelos fenômenos de propagação que ocorrem com o campo de onda ao longo do trajeto entre a fonte e os receptores. A forte taxa de atenuação observada com o progressivo afastamento da fonte a partir da posição do Barco A até atingir um valor mínimo a uma distância de aproximadamente 2.000 m da fonte é explicada pelo espalhamento geométrico da onda direta, responsável pela maior parte da energia nas proximidades da fonte. A elevação abrupta que se segue é devida à energia das ondas refletidas, que sofrem um aumento de amplitude ao se aproximarem do

ângulo crítico, onde atingem seu valor máximo. O decaimento da curva a partir de aproximadamente 8.000 m da fonte é bem mais suave, pois nessa região dominam as ondas refratadas, com uma curvatura bem menor que nas proximidades da fonte. Adicionalmente, apesar da contínua ação dos efeitos do espalhamento geométrico e da absorção, parte da energia acústica é confinada entre o fundo e a superfície do mar, sendo este último um refletor muito eficiente, contribuindo para que a curva apresente um decaimento mais suave.

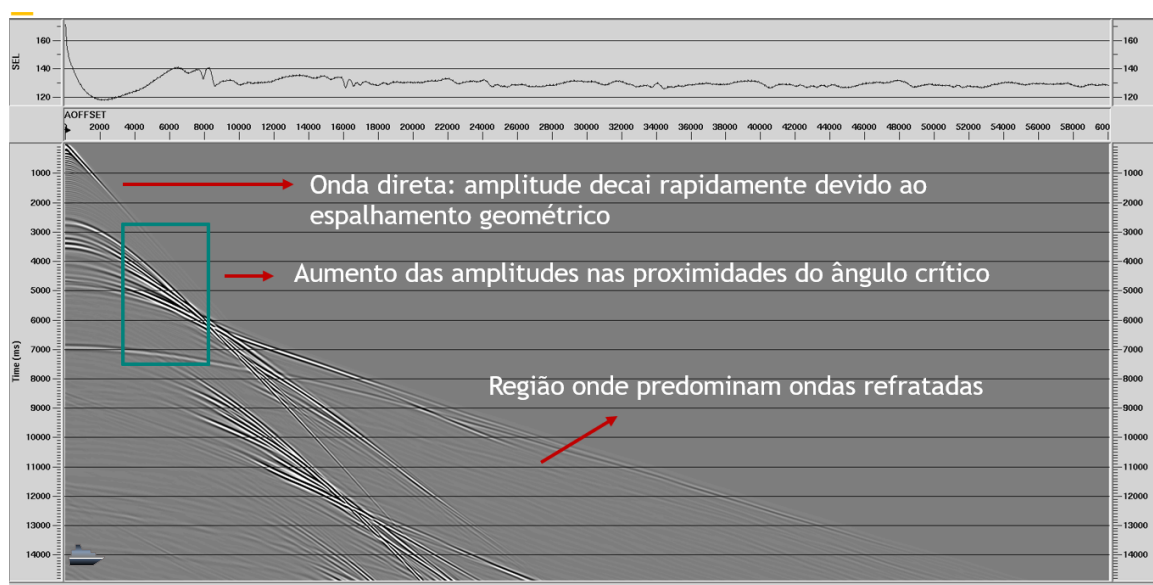


Figura II.2.6.4-6 – *Nível de Exposição Sonora (dB) para a situação na qual a fonte está posicionada no Barco A ($X = 32.500$ m), mostrado acima do sismograma. Podemos relacionar as principais feições da curva com os eventos registrados no sismograma.*

As curvas de decaimento acústico para as Áreas de Modelagem 1 e 2 no caso em que a fonte está posicionada no Barco B apresentam comportamento similar ao caso em que a fonte está posicionada no Barco A, e estão representadas na **Figura II.2.6.4-7** e na **Figura II.2.6.4-8**. Na porção da curva situada nas proximidades da fonte (posição $X = 92.500$ m), o nível de exposição sonora é de cerca de 171 dB. Nos primeiros 2.000 m a partir da posição da fonte (em direção à esquerda) ocorre uma forte taxa de atenuação, chegando a valores inferiores a 125 dB para a Área de Modelagem 1 e 130 dB para a Área de Modelagem 2, seguido de uma elevação abrupta a partir dos pontos da curva com valor mínimo, atingindo o máximo entre 4.000 e 8.000 m de distância, para um nível por volta de 140 dB. A partir dessa

distância a curva apresenta um decaimento mais suave, mantendo-se numa faixa entre 135 e 125 dB até 60 km de distância entre a fonte e o receptor.

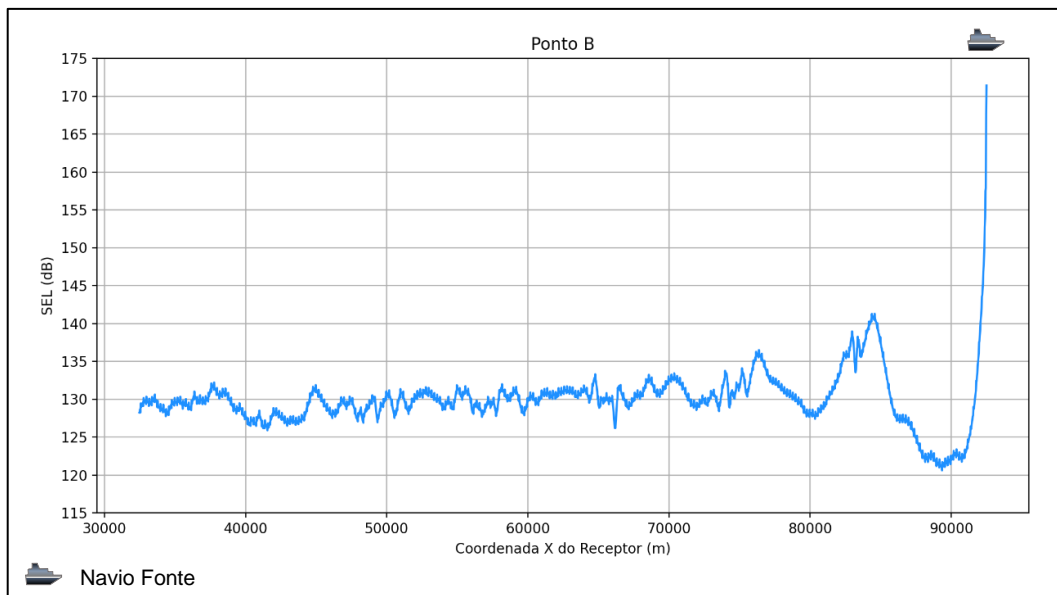


Figura II.2.6.4-7 – *Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para a situação na qual a fonte está posicionada no Barco B (X = 92.500 m).*

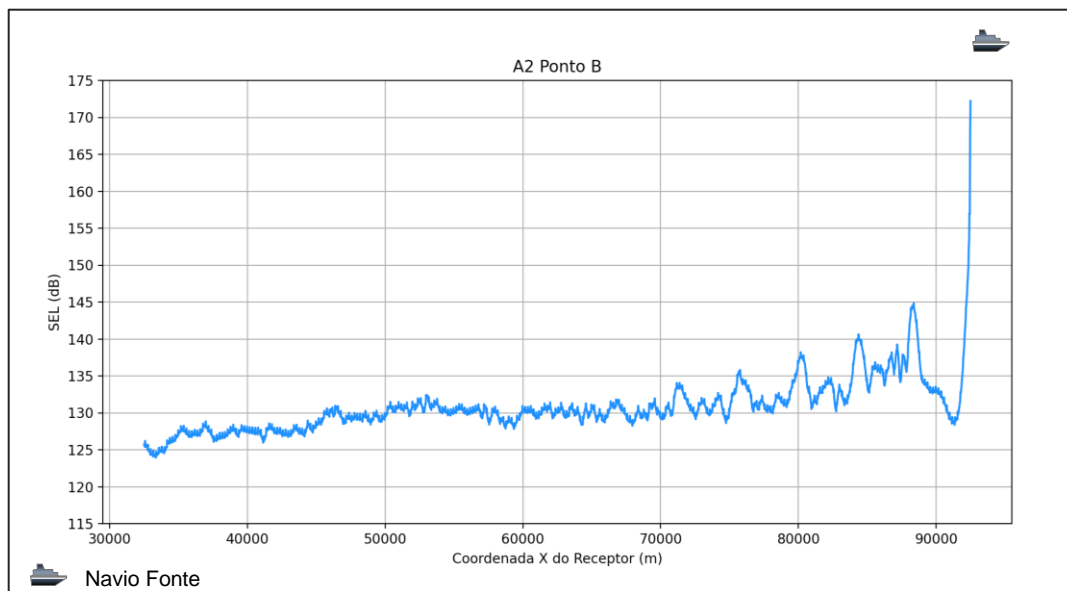


Figura II.2.6.4-8 – *Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para a situação na qual a fonte está posicionada no Barco B (X = 92.500 m).*

As curvas de decaimento acústico quando as fontes estão posicionadas nos Barcos A e B e são disparadas simultaneamente, para as Áreas de Modelagem 1

e 2, estão representadas na **Figura II.2.6.4-9** e na **Figura II.2.6.4-10**. Nas proximidades das fontes (posições $X = 32.500$ m e $X = 92.500$ m), o nível de exposição sonora é de cerca de 171 dB. Nos primeiros 2.000 m a partir da posição de cada fonte (em direção ao centro do gráfico) ocorre uma forte taxa de atenuação, chegando a valores inferiores a 130 dB, seguido de uma elevação abrupta até atingir um máximo local entre 4.000 e 8.000 m de distância a partir de cada fonte, com valores por volta de 140 dB. Nas posições em que a distância mínima entre o ponto de recepção e qualquer uma das fontes é superior a 10 Km, a curva atinge um patamar relativamente constante, mantendo-se numa faixa entre 130 e 137 dB.

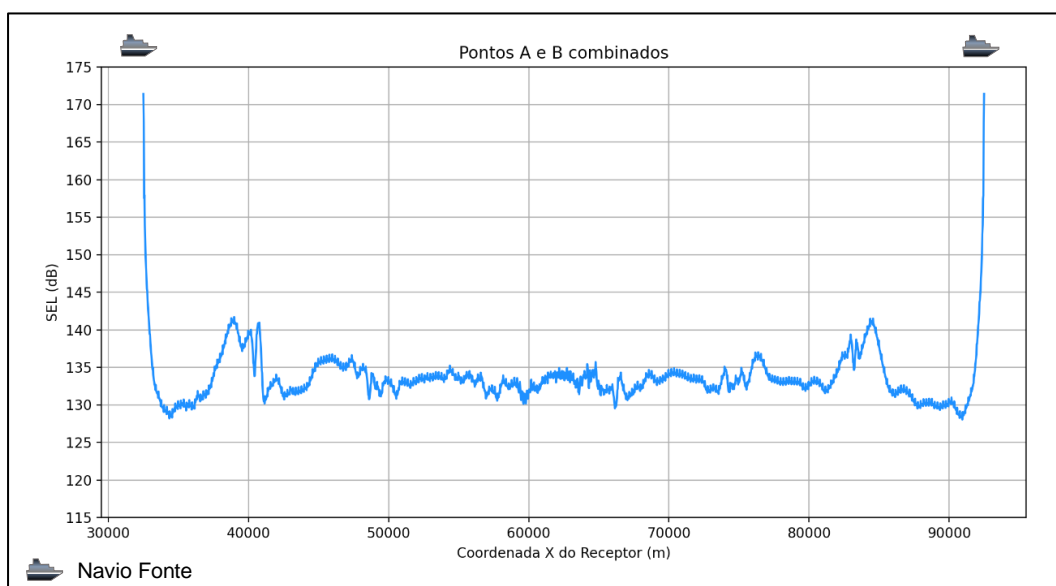


Figura II.2.6.4-9 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para a emissão simultânea nos Barcos A ($X = 32.500$ m) e B ($X = 92.500$ m).

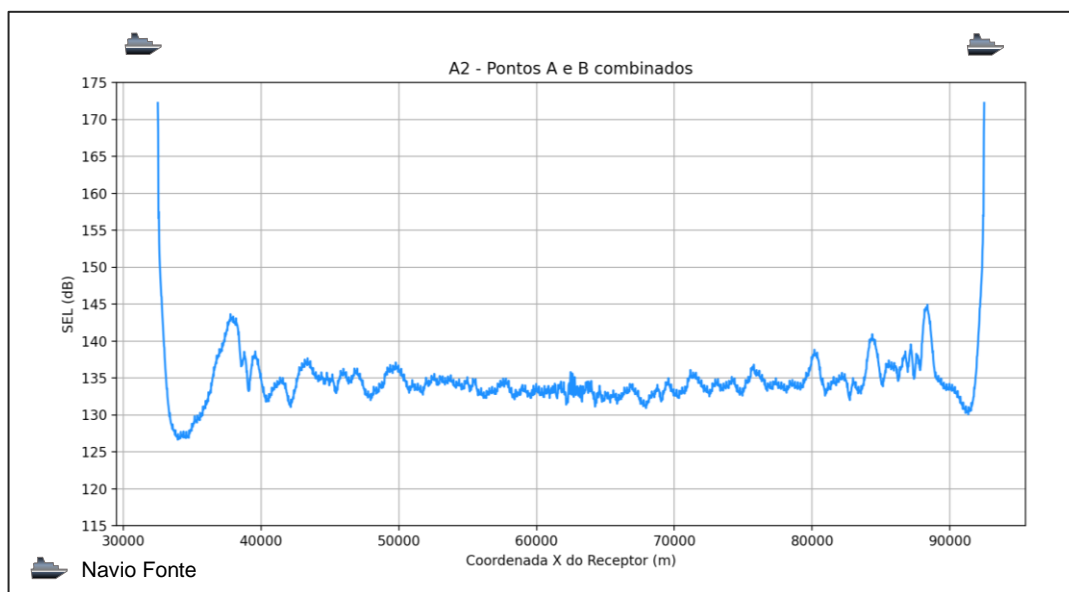


Figura II.2.6.4-10 – *Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para a emissão simultânea nos Barcos A ($X = 32.500$ m) e B ($X = 92.500$ m).*

A **Figura II.2.6.4-11** e a **Figura II.2.6.4-12** mostram as curvas de decaimento acústico quando as fontes estão posicionadas nos Barcos A e B, porém a interferência construtiva é máxima para cada ponto do gráfico, sobrepostas às curvas mostradas na **Figura II.2.6.4-9** e na **Figura II.2.6.4-10**. Embora esta situação não possa ser reproduzida em uma situação real, estes gráficos são úteis pois mostram o maior nível de exposição sonora possível que pode ser atingido em cada ponto de recepção, quando temos emissão nas posições dos Barcos A e B. As maiores diferenças entre as duas curvas sobrepostas estão na região de recepção na qual a distância mínima para qualquer uma das fontes é superior a 10 Km, onde ocorre um aumento na faixa de 1 a 2 dB na situação de máxima interferência construtiva.

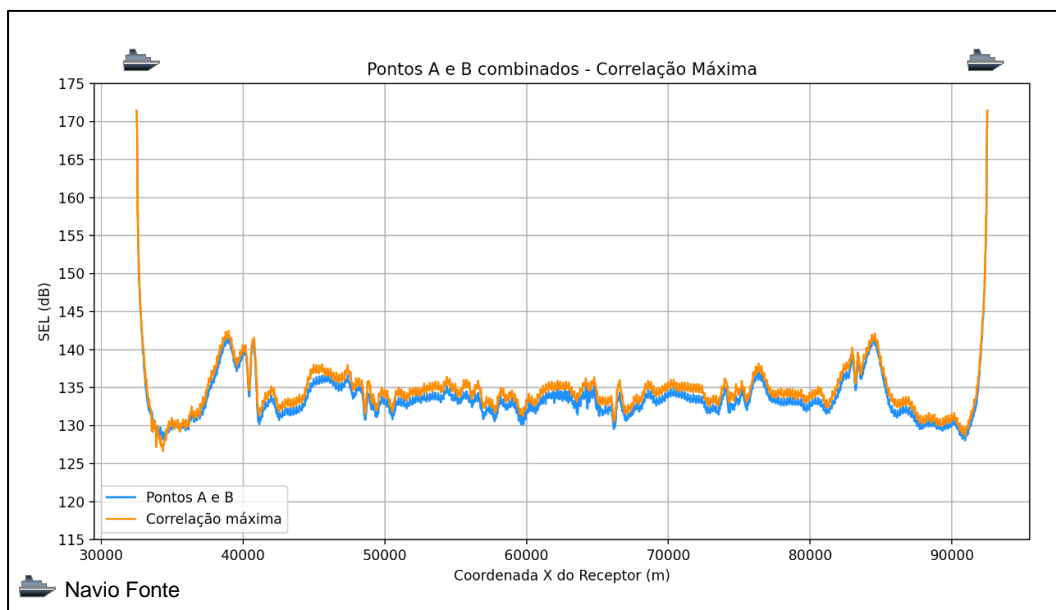


Figura II.2.6.4-11 – *Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 em dias situações de interferência: emissão simultânea nos Barcos A ($X = 32.500$ m) e B ($X = 92.500$ m), e máxima interferência construtiva entre os campos emitidos pelos Barcos A e B.*

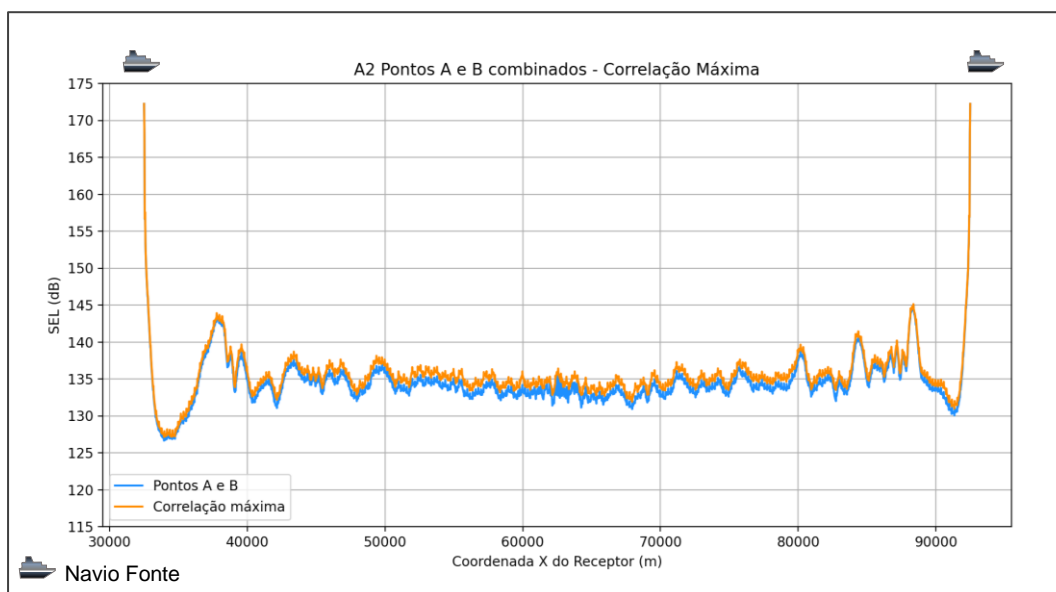


Figura II.2.6.4-12 – *Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 em dias situações de interferência: emissão simultânea nos Barcos A ($X = 32.500$ m) e B ($X = 92.500$ m), e máxima interferência construtiva entre os campos emitidos pelos Barcos A e B.*

Já na **Figura II.2.6.4-13** e na **Figura II.2.6.4-14**, a curva mais escura representa o decaimento acústico obtido para a área em estudo quando a fonte está

posicionada no Barco A, e a emissão da fonte sonora é acionada a cada 11 s, simulando uma situação mais próxima à realidade operacional de uma campanha de aquisição sísmica. A curva mais clara representa a situação na qual ocorre um único disparo. No início das curvas correspondentes aos múltiplos disparos, nas proximidades da fonte (posição $X = 32.500$ m), o nível de exposição sonora é de cerca de 178 dB. Nos primeiros 2.000 m a partir da posição da fonte ocorre uma forte taxa de atenuação, chegando a valores inferiores a 126 dB, seguido de uma elevação abrupta, cujo máximo situa-se entre 4.000 e 8.000 m de distância da fonte, com valores por volta de 150 dB. Para distâncias maiores, as curvas apresentam um decaimento mais suave, mantendo-se numa faixa entre 145 e 135 dB até 60 km de distância entre a fonte e o receptor.

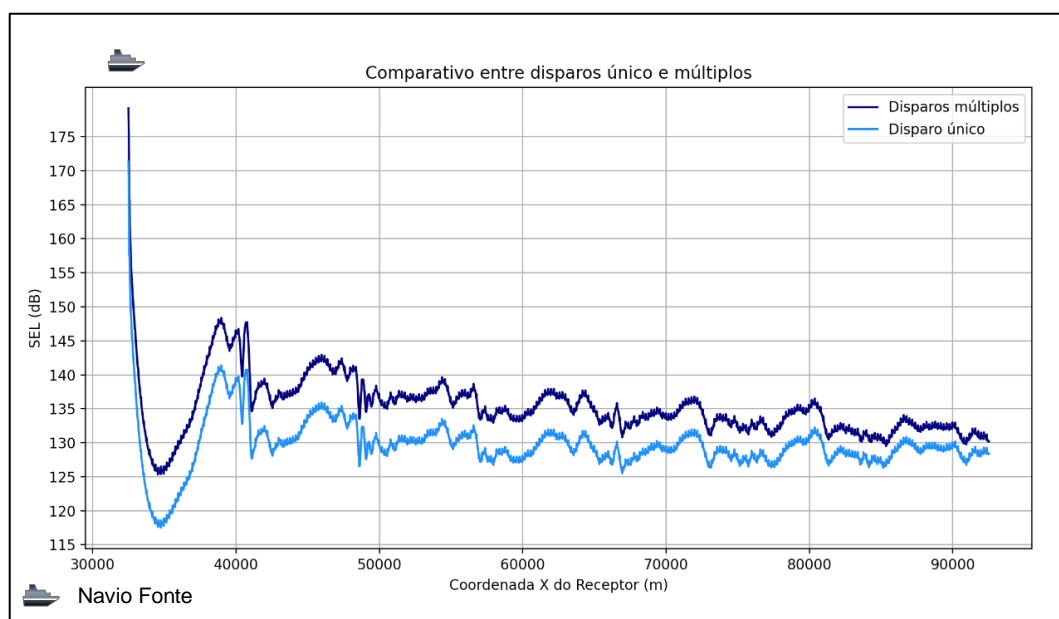


Figura II.2.6.4-13 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para duas condições de emissão da fonte posicionada no Barco A ($X = 32.500$ m): emissão única e múltiplos disparos em intervalos de 11 s.

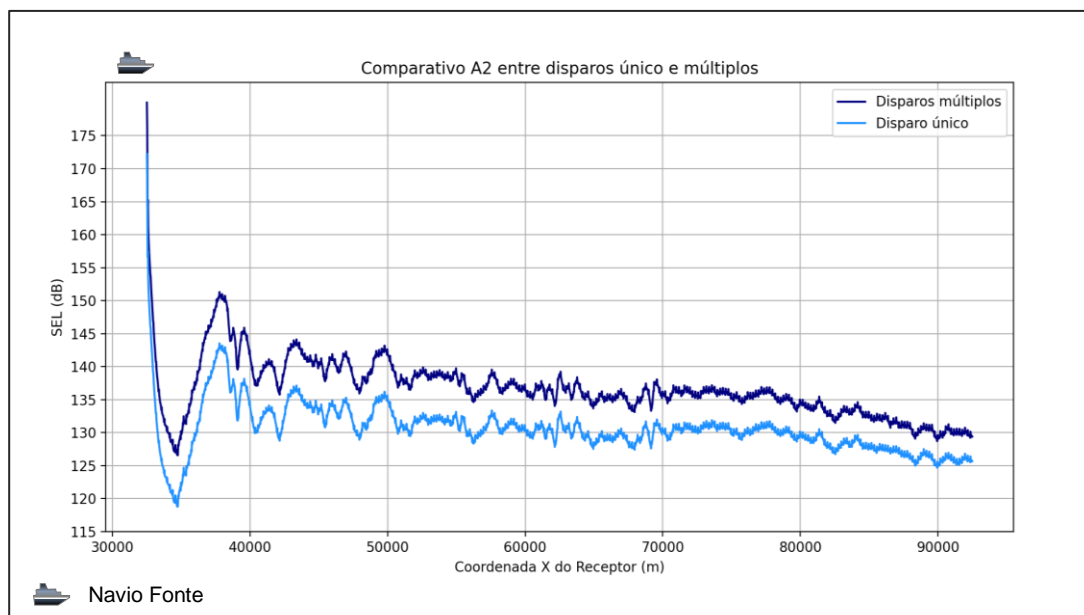


Figura II.2.6.4-14 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para duas condições de emissão da fonte posicionada no Barco A ($X = 32.500$ m): emissão única e múltiplos disparos em intervalos de 11 s.

De modo similar, na **Figura II.2.6.4-15** e na **Figura II.2.6.4-16**, a curva mais escura representa o decaimento acústico obtido para a área em estudo quando a fonte está posicionada no Barco B, e a emissão da fonte sonora é acionada a cada 11 s; a curva mais clara representa a situação em que ocorre um único disparo. No início das curvas correspondentes aos múltiplos disparos, nas proximidades da fonte (posição $X = 92.500$ m), o nível de exposição sonora é de cerca de 178 dB. Nos primeiros 2.000 m a partir da posição da fonte ocorre uma forte taxa de atenuação, chegando a valores inferiores a 140 dB, seguido de uma elevação abrupta, atingindo um máximo local entre 4.000 e 8.000 m de distância da fonte, para níveis por volta de 150 dB. A partir dessa distância as curvas apresentam um decaimento mais suave, mantendo-se numa faixa entre 145 e 135 dB até 60 km de distância entre a fonte e o receptor.

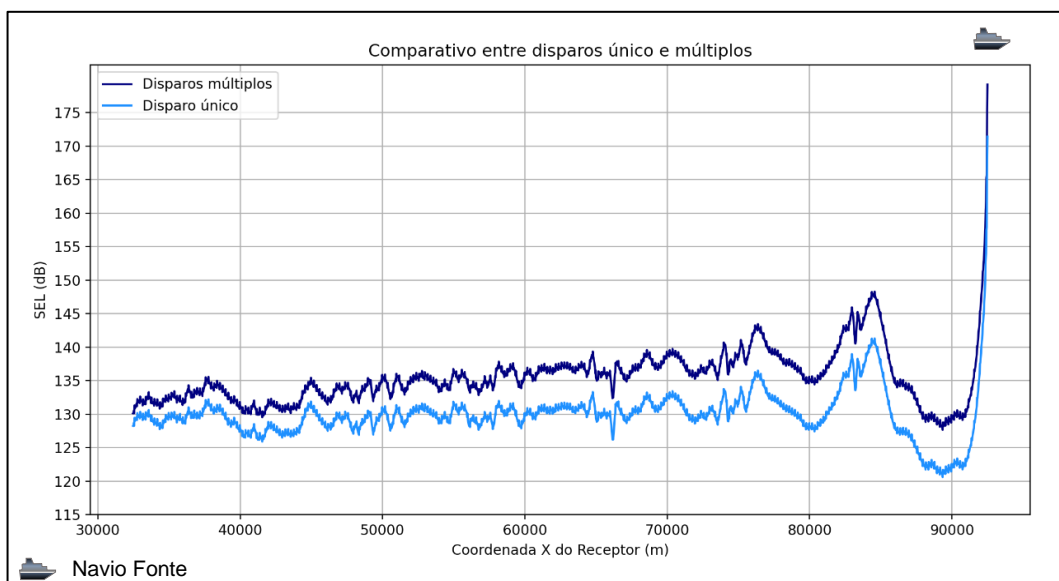


Figura II.2.6.4-15 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para duas condições de emissão da fonte posicionada no Barco B (X = 92.500 m): emissão única e múltiplos disparos em intervalos de 11 s.

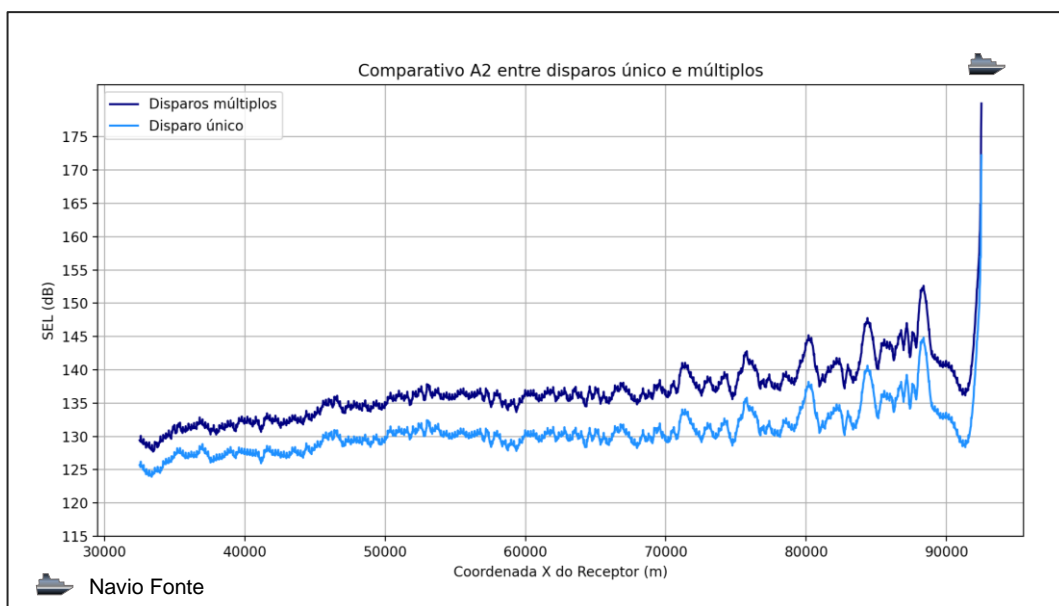


Figura II.2.6.4-16 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para duas condições de emissão da fonte posicionada no Barco B (X = 92.500 m): emissão única e múltiplos disparos em intervalos de 11 s.

As curvas de decaimento acústico quando as fontes estão posicionadas nos Barcos A e B e são disparadas de maneira sincronizada a cada 11 s, estão representadas na **Figura II.2.6.4-17** e na **Figura II.2.6.4-18**. Nas proximidades das

fontes (posições $X = 32.500$ m e $X = 92.500$ m), o nível de exposição sonora é de cerca de 178 dB. Nos primeiros 2.000 m a partir da posição de cada fonte (em direção ao centro do gráfico) ocorre uma forte taxa de atenuação, chegando a valores inferiores a 135 dB, seguido de uma elevação abrupta, atingindo um máximo local entre 4.000 e 8.000 m de distância a partir de cada fonte, para um nível por volta de 150 dB. Nas posições em que a distância mínima entre o ponto de recepção e qualquer uma das fontes é superior a 10 Km, a curva atinge um patamar relativamente constante, mantendo-se numa faixa entre 145 e 135 dB.

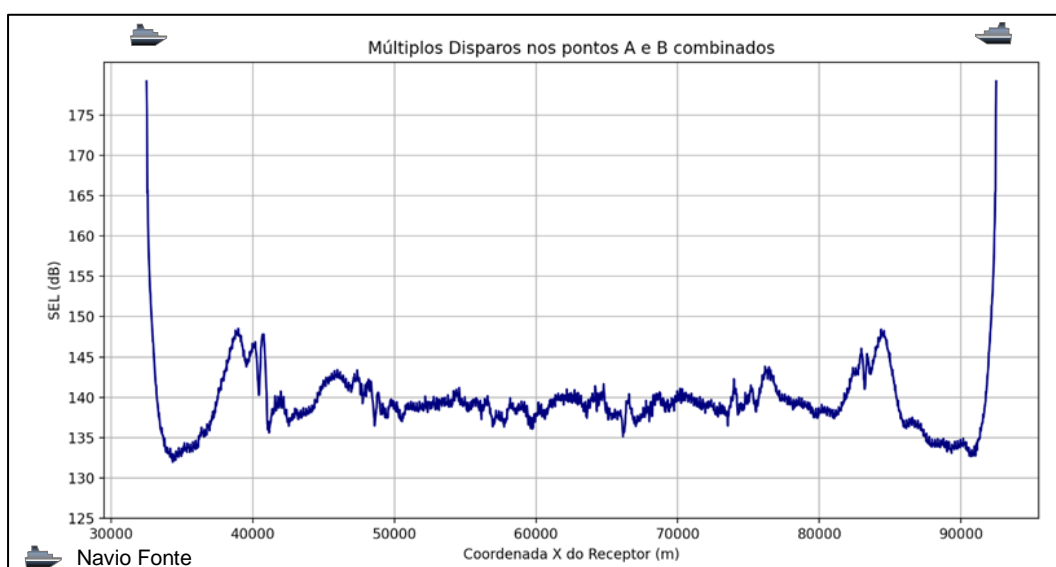


Figura II.2.6.4-17 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para a emissão sincronizada a cada 11s nos Barcos A ($X = 32.500$ m) e B ($X = 92.500$ m).

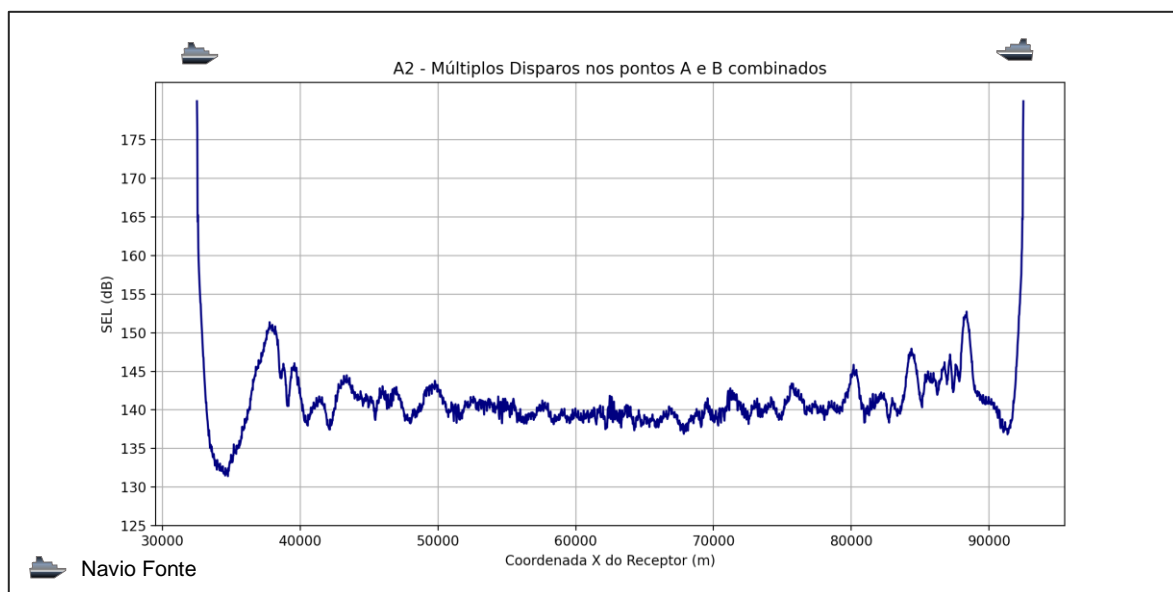


Figura II.2.6.4-18 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para a emissão sincronizada a cada 11s nos Barcos A (X = 32.500 m) e B (X = 92.500 m).

Na **Figura II.2.6.4-19** e na **Figura II.2.6.4-20**, sobrepostas à curvas mostradas na **Figura II.2.6.4-17** e na **Figura II.2.6.4-18**, temos a curva de decaimento acústico quando as fontes estão posicionadas nos Barcos A e B e são disparadas a cada 11 s em cada barco, porém a interferência construtiva é máxima para cada ponto do gráfico. Embora esta situação não possa ser reproduzida em uma situação real, este gráfico é útil pois mostra o maior Nível de Exposição Sonora possível que pode ser atingido em cada ponto de recepção, quando temos múltiplas emissões a cada 11 segundos nas posições dos Barcos A e B. As maiores diferenças entre as duas curvas estão na região de recepção na qual a distância mínima para qualquer uma das fontes é superior a 10 Km, onde ocorre um aumento na faixa de 1 a 2 dB na situação de máxima interferência construtiva.

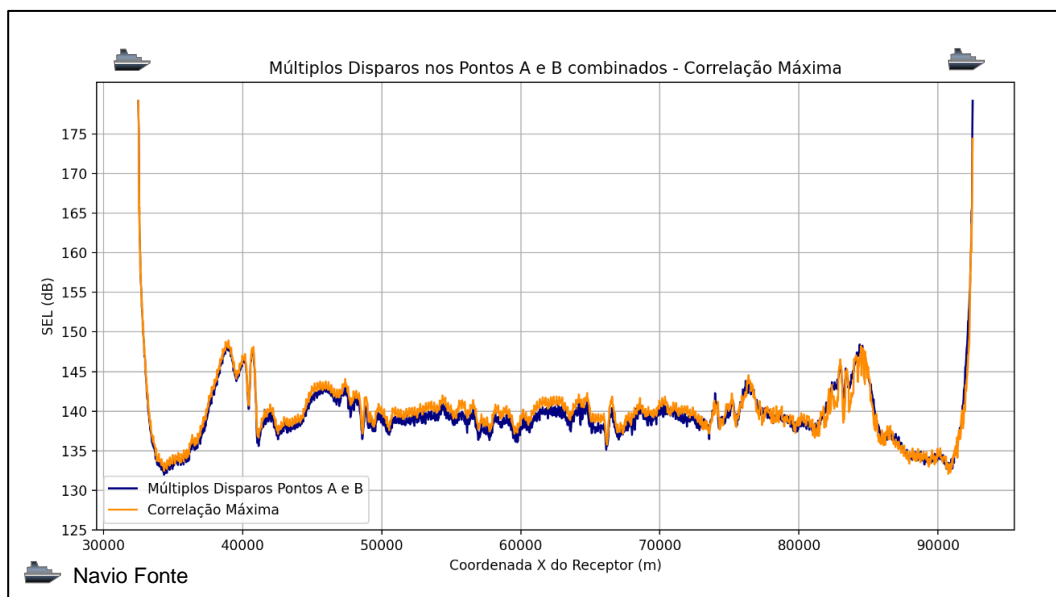


Figura II.2.6.4-19 – *Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 em dias situações de interferência: emissão sincronizada a cada 11s nos Barcos A ($X = 32.500$ m) e B ($X = 92.500$ m), e máxima interferência construtiva entre os campos emitidos por múltiplos disparos pelos Barcos A e B.*

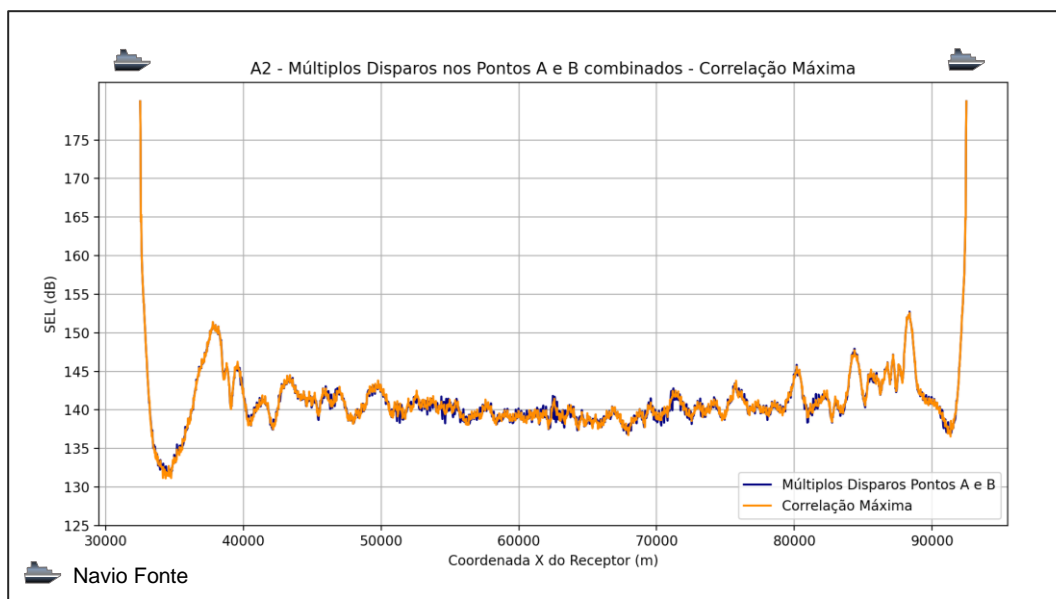


Figura II.2.6.4-20 – *Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 em dias situações de interferência: emissão sincronizada a cada 11s nos Barcos A ($X = 32.500$ m) e B ($X = 92.500$ m), e máxima interferência construtiva entre os campos emitidos por múltiplos disparos pelos Barcos A e B.*

II.2.6.4.1 - Extrapolação para frequências máximas de registro

A fim de estimar o efeito da limitação do conteúdo de frequências do dado modelado (até 15 Hz), calculamos nível de energia de decaimento em um dado real - o dado nodes de Búzios (**Figura II.2.6.4.1-1**) – utilizando todas as frequências disponíveis (até 250 Hz) e após a aplicação de um filtro corta-altas atenuando frequências acima de 15 Hz.

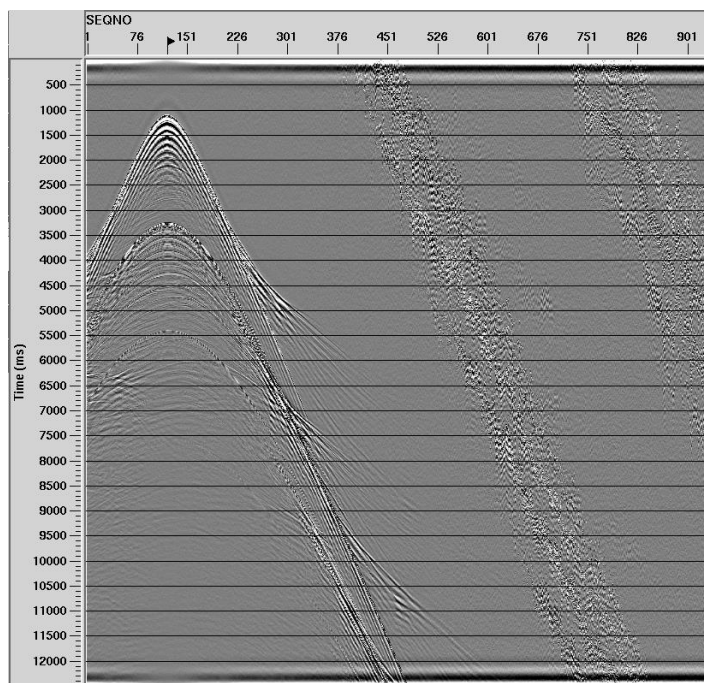


Figura II.2.6.4.1-1 – Sismograma de um receptor da aquisição Nodes de Búzios, contendo frequências até 250 Hz.

Na **Figura II.2.6.4.1-2** mostramos as curvas de decaimento sonoro calculadas a partir do dado original e do dado filtrado até 15 Hz. Nota-se que, em ambos os casos, em uma distância menor que 3 Km entre a fonte e o receptor, o Nível de Exposição Sonora diminui de forma abrupta até aproximadamente 7 Km de distância entre fonte e receptor, quando passa a decair de forma mais suave até aproximadamente 40 Km. Como esperado, os valores de decaimento calculados a partir dos dados filtrados são sempre menores, embora essa diferença diminua para maiores distâncias entre fonte e receptor, refletindo o efeito cumulativo da

absorção das altas frequências que ocorre naturalmente ao longo do caminho de propagação das ondas sísmicas em um meio real.

Na **Figura II.2.6.4.1-3**, mostramos a razão entre os níveis de exposição sonora dos dados original e filtrado, bem como uma curva do tipo exponencial ajustada para descrever de maneira aproximada o comportamento dessa razão em função da distância entre fonte e receptor. Essa curva pode ser utilizada para compensar o efeito da limitação do conteúdo de frequências da modelagem nos valores obtidos nas curvas de decaimento. A título de exemplo, o valor de SEL calculado na modelagem até 15 Hz, após a compensação utilizando a curva exponencial ajustada, ficaria entre 7 e 9% maior para afastamentos menores que 5 Km; para afastamentos maiores que 20 Km essa correção resultaria num aumento do Nível de Exposição Sonora entre 4 e 5 %.

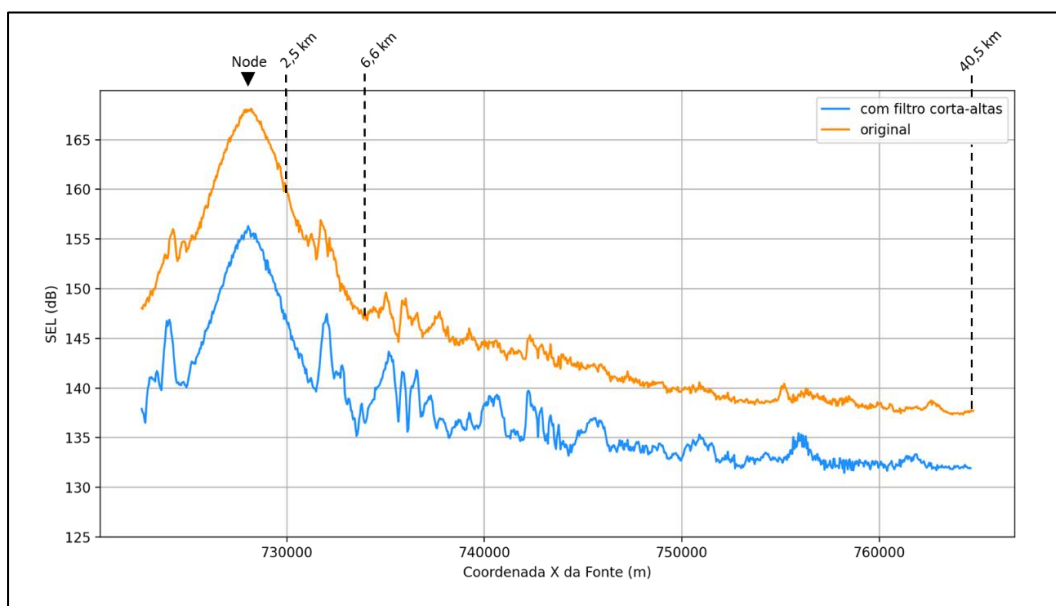


Figura II.2.6.4.1-2 – Nível de Exposição Sonora (dB) calculado a partir de sismograma de Búzios original (frequências até 250 Hz) e com aplicação de filtro corta-altas de 15 Hz. Na parte superior do gráfico são mostradas as distâncias entre fonte e receptor para alguns pontos do gráfico.

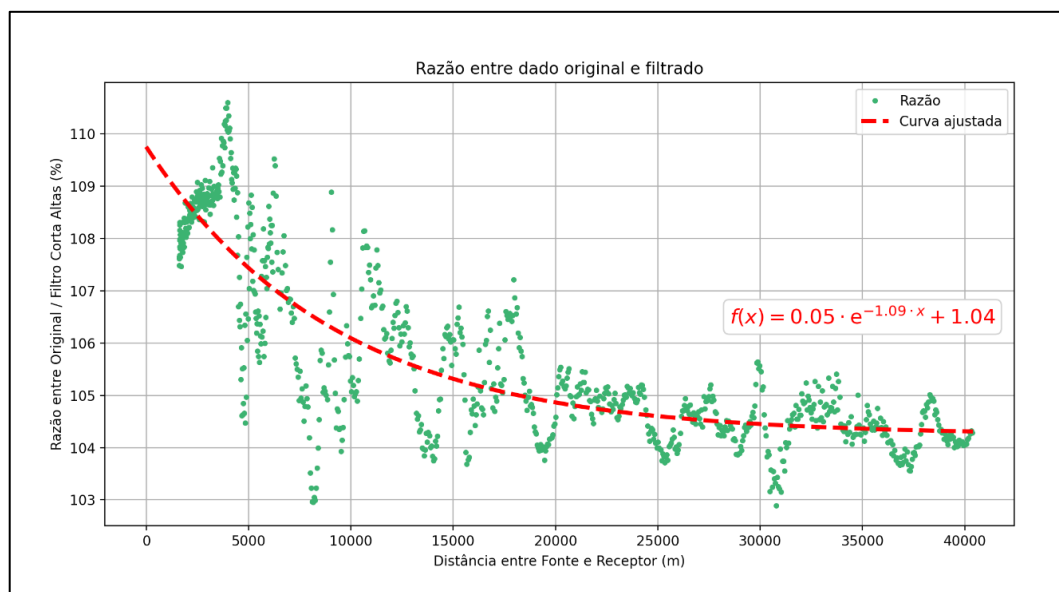


Figura II.2.6.4.1-3 – Razão entre os Níveis de Exposição Sonora (dB) dos dados original e filtrado, e curva exponencial ajustada (em vermelho).

Nas **Figura II.2.6.4.1-4** e **Figura II.2.6.4.1-5** mostramos as curva de decaimento obtidas quando a fonte está posicionada no Barco A, simulando múltiplos disparos, após o ajuste aplicado com a curva exponencial, de modo a estimar o Nível de Exposição Sonora correspondente a uma frequência máxima de modelagem de 250 Hz. Também mostramos nos gráficos a curva antes do ajuste, obtida pela modelagem até 15 Hz, para servir de referência. Para distâncias entre fonte e receptor por volta de 10 Km, observa-se que a diferença no Nível de Exposição Sonora entre as duas curvas é por volta de 10 dB, decaindo para algo em torno de 5 dB a partir de distâncias entre fonte e receptor de 30 Km. Após o ajuste o valor mínimo da curva a aproximadamente 2.000 m da fonte é inferior a 140 dB, e o máximo local a distâncias entre 4.000 e 8.000 m da fonte tem valor próximo a 160 dB. A região após o máximo local apresenta uma clara tendência de decaimento com o aumento da distância em relação à fonte, partindo de valores por volta de 155 dB até atingir valores ao redor de 135 dB.

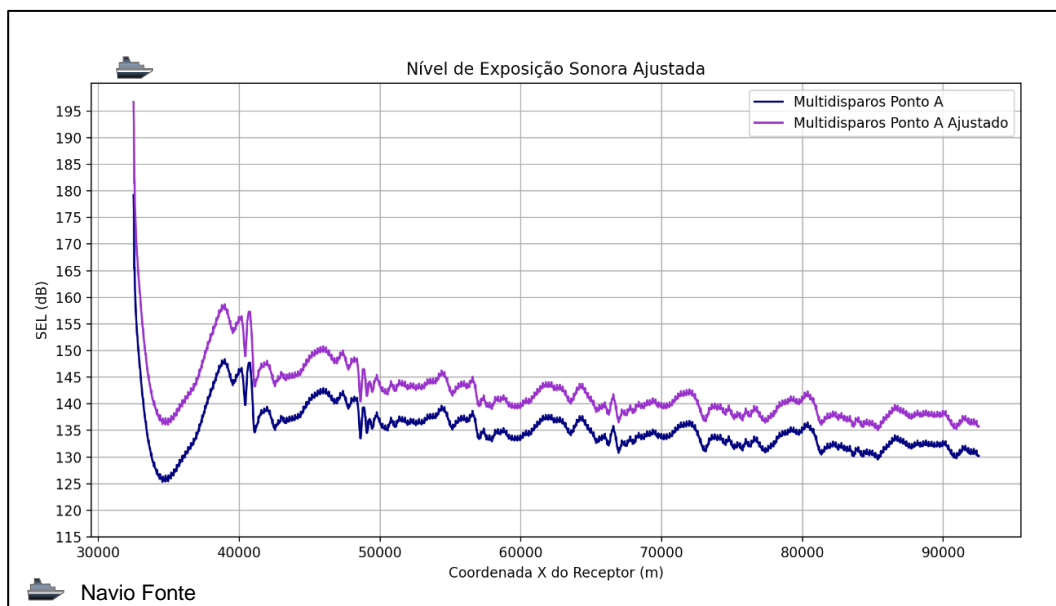


Figura II.2.6.4.1-4 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para múltiplos disparos em intervalos de 11 s para fonte posicionada no Barco A ($X = 32.500$ m) original (frequências até 15 Hz) e ajustada para simular conteúdo de frequências até 250 Hz.

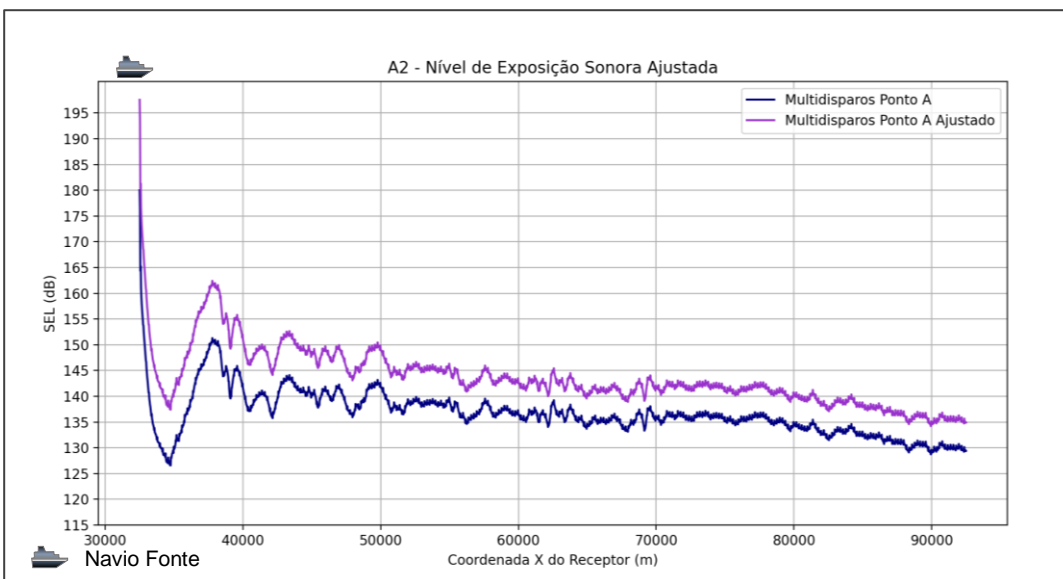


Figura II.2.6.4.1-5 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para múltiplos disparos em intervalos de 11 s para fonte posicionada no Barco A ($X = 32.500$ m) original (frequências até 15 Hz) e ajustada para simular conteúdo de frequências até 250 Hz.

Na **Figura II.2.6.4.1-6** e na **Figura II.2.6.4.1-7** mostramos as curvas de decaimento obtidas quando a fonte está posicionada no Barco B, simulando

múltiplos disparos, após o ajuste aplicado com a curva exponencial. Também mostramos nos gráficos a curva antes do ajuste para servir de referência. Para distâncias entre fonte e receptor por volta de 10 Km, observa-se que a diferença no nível de exposição sonora entre as duas curvas é por volta de 10 dB, decaindo para algo em torno de 5 dB a partir de distâncias entre fonte e receptor de 30 Km. Após o ajuste o valor mínimo da curva a aproximadamente 2.000 m da fonte é inferior a 150 dB, e o máximo local a distâncias entre 4.000 e 8.000 m da fonte tem valor próximo a 160 dB para a Área de Modelagem 1 e 165 dB para a Área de Modelagem 2. A região após o máximo local apresenta uma clara tendência de decaimento com o aumento da distância em relação à fonte, partindo de valores por volta de 155 dB até atingir valores ao redor de 135 dB.

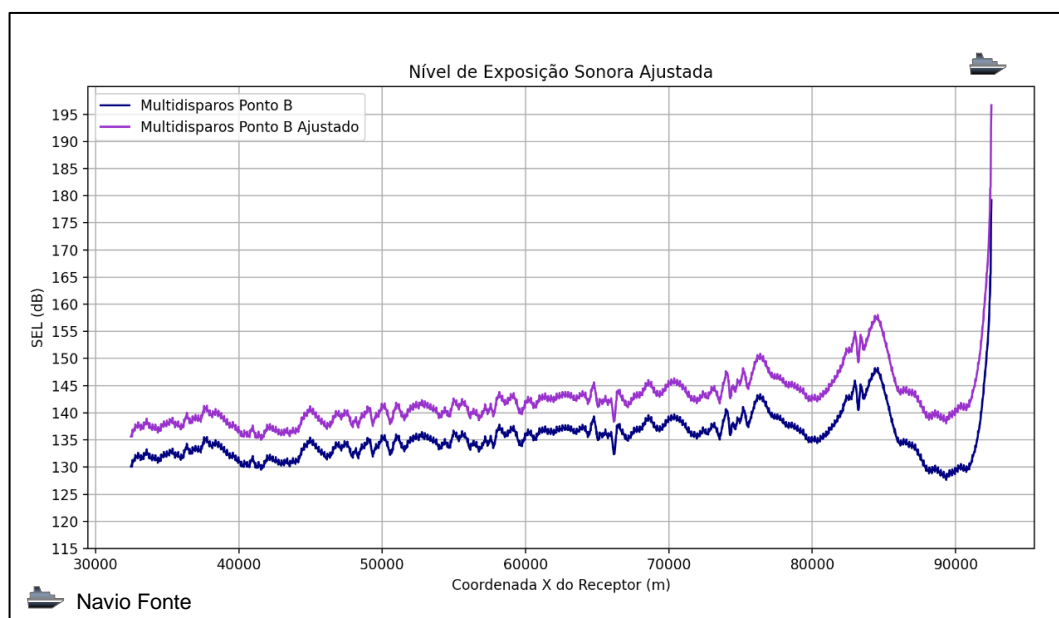


Figura II.2.6.4.1-6 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 1 para múltiplos disparos em intervalos de 11 s para fonte posicionada no Barco B (X = 92.500 m) original (frequências até 15 Hz) e ajustada para simular conteúdo de frequências até 250 Hz.

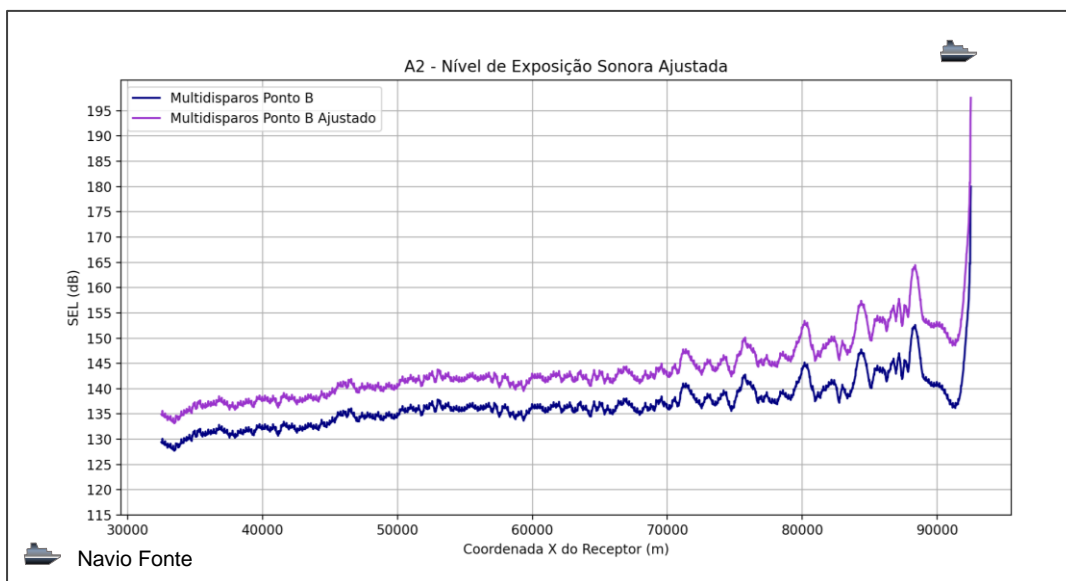


Figura II.2.6.4.1-7 – Nível de Exposição Sonora (dB) na Área de Modelagem 2 para múltiplos disparos em intervalos de 11 s para fonte posicionada no Barco B (X = 92.500 m) original (frequências até 15 Hz) e ajustada para simular conteúdo de frequências até 250 Hz.

II.2.6.4.2 - Efeito da variação sazonal da velocidade da água no decaimento sonoro

Perfis de temperatura, salinidade e velocidade acústica na Bacia de Campos foram fornecidas pelo Suporte técnico de Geodésia e Oceanografia juntamente com Centro de Pesquisas e Desenvolvimento da Petrobras (CENPES) a fim de considerar a variação da velocidade da água ao longo de cada estação do ano, uma vez que os levantamentos sísmicos vão se estender por mais de um ano. Os dados de perfis de temperatura e salinidade foram validados pela reanálise global GLORYS (LELLOUCHE *et al.*, 2018).

A **Figura II.2.6.4.2-1** mostra que, na área do Cluster-BC, as maiores variações de velocidade acústica da água do mar ao longo do ano ocorrem em profundidades de até 300 m. As maiores variações ocorrem entre as estações do verão e inverno, por isso selecionamos os perfis de velocidade dessas duas estações para modificar o volume de velocidade regional utilizado neste estudo. Foram criados dois volumes de velocidade, nos quais a camada de água presente no volume de velocidade regional foi substituída pela camada de água típica das estações verão e inverno da Bacia de Campos na área da modelagem.

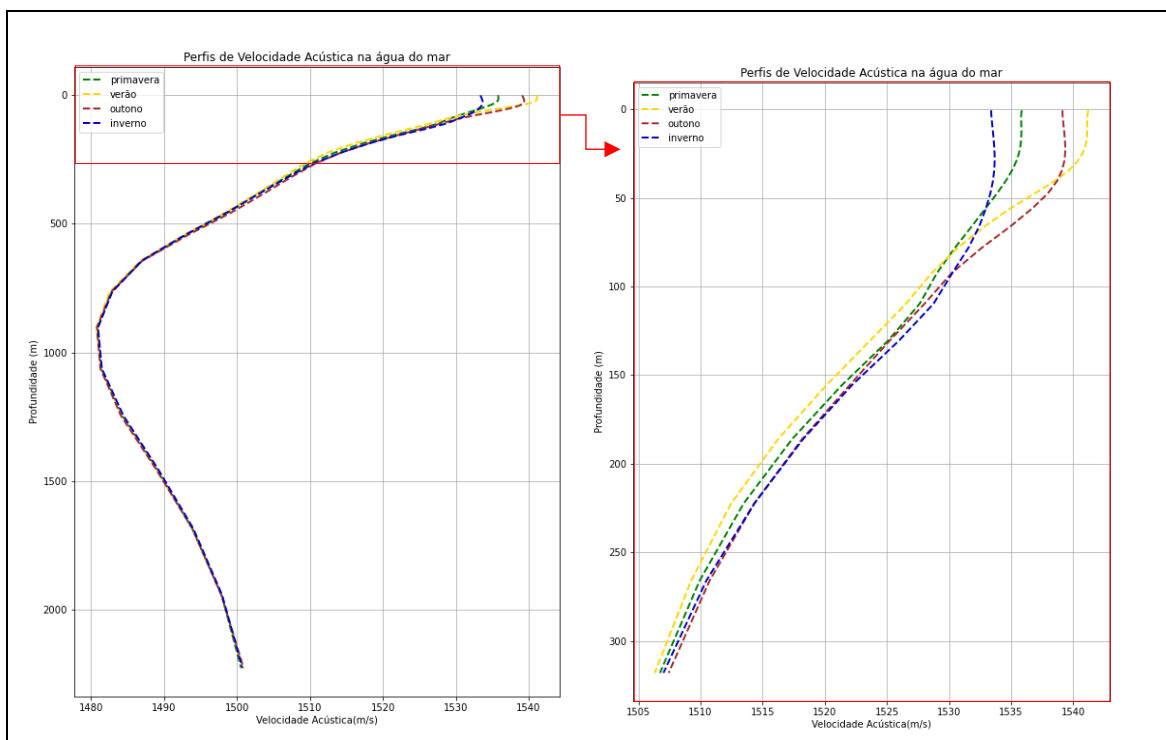


Figura II.2.6.4.2-1 – Perfis representativos da velocidade acústica da água do mar na área do Cluster-BC em cada estação do ano.

A partir desses volumes de velocidade com a camada de água modificada, foram calculadas curvas de decaimento sonoro considerando a fonte no Ponto A e a fonte no Ponto B, e as comparamos com a curva calculada com o volume de velocidade regional. Na **Figura II.2.6.4.2-2** podemos observar que as curvas de decaimento calculadas no Ponto A com as velocidades da coluna de água típicas da área de estudo para as estações verão e inverno são muito similares, e ligeiramente inferiores em comparação com a curva obtida com o modelo de velocidade regional.

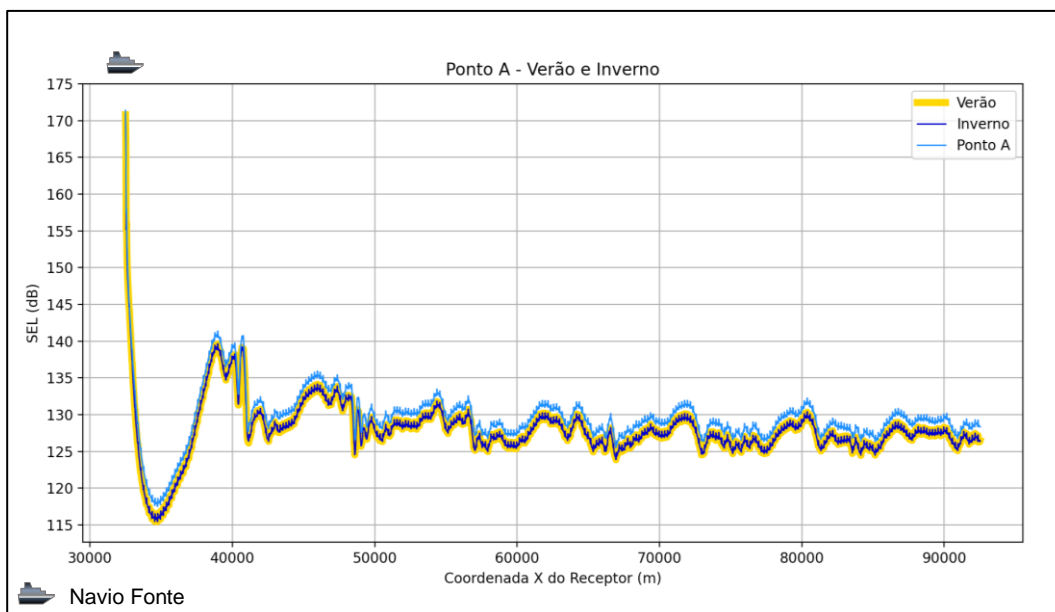


Figura II.2.6.4.2-2 – Ponto A – Comparação entre os Níveis de Exposição Sonora (dB) para as estações verão e inverno.

A mesma comparação foi realizada considerando a situação em que a fonte está posicionada no Ponto B (**Figura II.2.6.4.2-3**). Novamente, a diferença entre as curvas de decaimento sonoro para as estações - verão e inverno - é muito pequena, e ambas as curvas têm níveis de exposição sonora ligeiramente inferiores aos calculados com o modelo de velocidade regional.

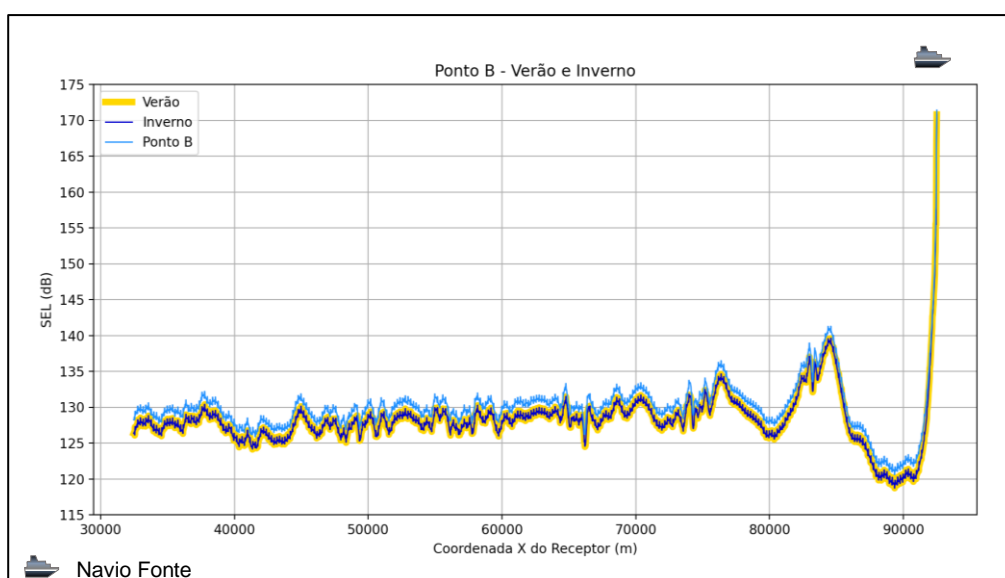


Figura II.2.6.4.2-3 – Ponto B – Comparação entre os Níveis de Exposição Sonora (dB) para as estações verão e inverno.

II.2.6.5 - Conclusão

As informações resultantes do estudo de decaimento sonoro possibilitam a quantificação do potencial grau de percepção e molestamento dos animais marinhos em resposta à energia emitida pelos canhões de ar em diferentes faixas de distância, colaborando para a definição da Área de Influência da Atividade de Pesquisa Sísmica e possibilitando um maior entendimento da dispersão da energia acústica emitida pela fonte sísmica em grandes áreas, complementando as informações obtidas a partir de medições em campo.

Neste estudo as modelagens foram realizadas com uma simulação numérica da propagação de ondas acústicas através de um modelo detalhado da camada de água e da seção sedimentar subjacente, abrangendo distâncias de até 60 Km entre fontes e receptores, de modo a possibilitar a simulação realista da propagação de ondas e de eventual interferência entre atividades sísmicas simultâneas. As duas áreas de modelagem contemplam regiões representativas das áreas de pesquisa sísmica situadas em águas profundas e mais rasas, e as amplitudes dos dados sísmicos modelados foram calibradas com dados sísmicos adquiridos anteriormente na área. A frequência máxima dos dados sísmicos modelados foi de 15 Hz. Esta limitação foi contornada aplicando fatores de correção para as curvas de decaimento sonoro obtidas da modelagem, de modo a simular as curvas que seriam obtidas para uma frequência máxima de modelagem de 250 Hz, representando assim a faixa de frequências nas quais se concentra a energia emitida pela fonte sísmica.

As curvas de decaimento sonoro obtidas para as Áreas de Modelagem 1 e 2 apresentaram características similares, apresentando um forte decaimento do Nível de Exposição Sonora (SEL) da posição da fonte até receptores afastados por volta de 2.000 m. A partir desse afastamento, onde ocorrem os menores valores de decaimento para as curvas calculadas, ocorre um aumento do Nível de Exposição Sonora até atingir o máximo nos receptores posicionados a uma distância entre 4.000 e 8.000 m da fonte. Para distâncias de recepção maiores, a curva apresenta novamente uma tendência de decaimento, bem mais suave e acompanhada de oscilações. No caso em que a fonte sísmica é acionada em duas posições separadas de 60 Km, a curva de decaimento sonoro apresenta um aspecto

aproximadamente simétrico em relação ao ponto médio entre as duas fontes. O acentuado decaimento do Nível de Exposição Sonora a partir da posição da fonte, seguido de aumento a uma distância entre 4.000 e 8.000 m da fonte ainda é claramente observável, mas o decaimento subsequente não é conspícuo, e o Nível de Exposição sonora oscila num patamar intermediário entre o valor mínimo da curva, que ocorre a aproximadamente 2.000 m de cada fonte, e o máximo local que ocorre a uma distância entre 4.000 e 8.000 m de cada fonte.

Atualmente, a fim de evitar distúrbios temporários em cetáceos (TTS - Temporary Threshold Shift), o Nível de Exposição Sonora de 160 dB re: 1 μ Pa2s é considerado como limite conservador para animais marinhos na presença de atividades de pesquisa sísmica (SOUTHALL *et al.*, 2007). Valores entre esse limite e o nível de ruído ambiental podem afetar o comportamento e a comunicação dos animais marinhos, em especial os mysticetos, que emitem sons com frequência dominante que se sobrepõem a faixa de frequências onde se concentra a energia emitida pela fonte sísmica (3 a 250 Hz).

A análise realizada para a área da Pesquisa Sísmica Marítima 3D/4D *Streamer* e *Nodes* na Bacia de Campos Cluster BC - Campos de Tartaruga Verde (TVD), Marlim Leste, Marlim Sul, Barracuda e Caratinga (MMBC) e Marlim-Voador-Brava (MRL-VDR-BRV), constatou que o Nível de Exposição Sonora na posição da fonte sísmica, considerando múltiplos disparos a cada 11 s e aplicando fatores de correção para simular a curva que seria obtida caso a frequência máxima de modelagem atingisse 250 Hz é de cerca de 197 dB, porém uma forte taxa de atenuação desde a fonte é percebida logo nos primeiros 2.000 m de afastamento da fonte em todas as simulações, atingindo valores entre 140 e 150 dB. O aumento no Nível de Exposição que vem em seguida, a distâncias entre 4.000 e 8.000 m da fonte atinge valores máximos que podem ocasionalmente atingir picos acima de 160 dB; a partir dessa distância a tendência da curva é de decaimento suave, acompanhada de oscilações, de maneira que é pouco provável que valores acima de 160 dB ocorram a partir do máximo local que ocorre entre 4.000 e 8.000 m da fonte. Para distâncias entre 10 e 60 Km da fonte é evidente uma tendência de diminuição constante, apesar das oscilações presentes na curva de decaimento sonoro. Os Níveis de Exposição Sonora variam de valores por volta de 155 dB a 10 Km, atingindo valores inferiores a 140 dB a 60 Km da fonte.

A análise do nível de ruído ambiental presente nos dados sísmicos utilizados na calibração deste estudo indica que a partir de distâncias de aproximadamente 35 Km da fonte o nível de energia acústica emitido pela fonte sísmica aproxima-se do nível de energia acústica do ruído ambiental. Análises adicionais precisam ser realizadas para avaliar a variabilidade do nível de ruído ambiental e se os valores utilizados neste estudo podem ser considerados típicos.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BERNARD P, BRÜEL & KJÆR. LEQ, **SEL What? Why? When? Application notes**. BO 0051-14. Printed in Denmark by Nærum Offset.

MICHAEL A. AINSLIE, CHRIST A.F. DE JONG, MICHELE B HALVORSEN, DARLENE R KETTEN, 2016. Underwater Acoustics - Task 1: Terminology. A report prepared by TNO for the Joint Industry Programme on E&P Sound and Marine Life. JIP Topic - **Sound source characterization and propagation**, TNO 2016 R11076, 46.

SOUTHALL B L, BOWLES A E, ELLISON W T, FINNERAN J J, GENTRY R L, GREEN JR. C R, KASTAK D, KETTEN D R, MILLER J H, NACHTIGALL P E, RICHARDSON W J, THOMAS J A, TYACK P L. 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. **Aquatic Mammals**, 33 (4), pp. 411-509.

LELLOUCHE *et al.* 2018. Recent updates to the Copernicus Marine Service global ocean monitoring and forecasting real-time 1=12 high-resolution system. **Ocean Science**, 14, 1093–1126, 2018. Published by Copernicus Publications on behalf of the European Geosciences Union. <https://doi.org/10.5194/os-14-1093-2018>.