

# **TGS-NOPEC Asker, Norvegia**



**Prospezione Geofisica  
al largo della Costa  
Nord-Occidentale della  
Sardegna – Zona Marina E**

**Risultati del Modello di  
Propagazione del  
Rumore Sottomarino**



# TGS-NOPEC Asker, Norvegia



**Prospezione Geofisica  
al largo della Costa  
Nord-Occidentale della  
Sardegna – Zona Marina E**

**Risultati del Modello di  
Propagazione del  
Rumore Sottomarino**

Rev.	Descrizione	Preparato da	Controllato da	Approvato da	Data
0	Prima Emissione	A. Cargioli F. Di Rosario A. Giovanetti F. Montani	L. Volpi	P. Rentocchini	Agosto 2016

## INDICE

	<u>Pagina</u>
<b>LISTA DELLE FIGURE</b>	<b>II</b>
<b>1 INTRODUZIONE</b>	<b>1</b>
<b>2 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO</b>	<b>3</b>
2.1 APPROCCIO METODOLOGICO	3
2.2 PARAMETRI DELLA MODELLIZZAZIONE	4
2.3 RISULTATI DEL MODELLO	6
<b>3 CONCLUSIONI</b>	<b>8</b>
<b>RIFERIMENTI</b>	
<b>ALLEGATO A: INDAGINE GEOFISICA 2D AL LARGO DELLA COSTA NORD-OCCIDENTALE DELLA SARDEGNA - MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO</b>	

## LISTA DELLE FIGURE

<b><u>Figura No.</u></b>	<b><u>Pagina</u></b>
Figura 2.1: Zone Rappresentative dell'Area di Interesse	4
Figura 2.2: Profilo Batimetrico Zona A	5
Figura 2.3: Profilo Batimetrico Zona B	5
Figura 2.4: Profilo di Velocità	6
Figura 2.5: Caratteristiche del Fondale Marino	6

## RAPPORTO

### PROSPEZIONE GEOFISICA AL LARGO DELLA COSTA NORD-OCCIDENTALE DELLA SARDEGNA ZONA MARINA E

#### RISULTATI DEL MODELLO DI PROPAGAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO

## 1 INTRODUZIONE

TGS-NOPEC intende effettuare una campagna di prospezioni geofisiche al largo della costa Nord-Ovest della Sardegna, all'interno dell'area della "Zona Marina E", come rimodulata dal Decreto Ministeriale 9 Agosto 2013.

Il progetto prevede l'esecuzione di rilievi geofisici tramite la tecnica della sismica a riflessione, finalizzati ad ottenere informazioni sulla struttura geologica del sottosuolo indagato ed individuare la presenza di strutture idonee all'accumulo di idrocarburi.

In data 2 Febbraio 2015 TGS-NOPEC ha presentato al MATTM istanza ai sensi dell'art.23 del D.Lgs 152/2006 e s.m.i. per l'avvio della procedura di Valutazione di Impatto Ambientale (VIA) del progetto "Prospezione Geofisica al Largo della Costa Nord-Occidentale della Sardegna – Zona Marina E" rientrando quest'ultimo nelle tipologie elencate nell'Allegato II alla Parte Seconda del D.Lgs.152/2006 e s.m.i., al punto 7) denominato "Prospezione, ricerca e coltivazione di idrocarburi sulla terraferma e in mare".

Il Gruppo Istruttore della Commissione Tecnica di Verifica dell'Impatto Ambientale VIA-VAS incaricato dell'istruttoria tecnica, ha comunicato con Nota Prot. CTVA-2015-0002687 del 05/08/2015 la necessità di acquisire chiarimenti e approfondimenti relativi alla documentazione già prodotta dalla Società TGS-NOPEC, trasmessa dal MATTM con Nota Prot. DVA-2015-0020981 del 10 Agosto 2015.

In data 10 Settembre 2015 TGS-NOPEC ha inviato al MATTM una nota contenente alcune prime risposte alle richieste di chiarimenti ricevute evidenziando la necessità di alcuni chiarimenti e di un prolungamento dei termini previsti per la presentazione della documentazione integrativa completa, ivi comprese le risposte alle osservazioni del pubblico.

Con nota MATTM del 29 Ottobre 2015 (prot. DVA-2015-0027108) è stata concessa una proroga di 60 giorni per la consegna delle integrazioni (data consegna integrazioni 24 Novembre 2015). Con successiva nota del 14 Marzo 2016 (prot. DVA-2016-0006961) è stata concessa dal MATTM una proroga di 8 mesi per la consegna delle integrazioni a partire dal 24 Novembre 2015.

In risposta alle suddette richieste, in data 22 Luglio 2016, TGS-NOPEC ha provveduto all'invio della documentazione al MATTM e a tutti gli Enti coinvolti, con contestuale pubblicazione dell'avviso al Pubblico su due testate giornalistiche "La Nuova Sardegna" e "la Repubblica".

La documentazione presentata riguarda:

- un aggiornamento dello Studio di Impatto Ambientale (Doc. D'Appolonia No. 16-745-H1 Rev. 0) e relativa Sintesi non Tecnica (Doc. D'Appolonia No. 16-745-H2 Rev. 0) che tengono in considerazione quanto emerso durante l'iter autorizzativo in corso e il modificato scenario riferito alla Zona Marina E, interessata dalle attività. In particolare lo Studio approfondisce i seguenti principali aspetti:
  - esecuzione della sola campagna di indagine geofisica riguardante l'acquisizione dei dati sismici 2D con esclusione della fase di rilievo sismico 3D, come inizialmente previsto dal progetto originario,
  - riduzione della durata delle attività a 80 giorni invece di 200 giorni,
  - utilizzo di una nuova tipologia di air gun (array di air gun), modellizzata tramite il software Gundalf, e configurata in maniera da ottimizzare la disposizione dei singoli air gun con il risultato di limitare le propagazioni orizzontali del rumore e ottenere un segnale acustico maggiormente focalizzato verso l'obiettivo di indagine,
  - utilizzo di un nuovo sistema di ricezione che prevede l'impiego di uno streamer a matrice solida, che, rispetto agli streamer tradizionali a gel o a olio, è caratterizzato da una maggiore compatibilità ambientale (in caso di eventuali rotture del cavo sismico durante le attività non si avranno rilasci di sostanze nell'ambiente marino),
  - impiego di un ulteriore sistema di monitoraggio acustico passivo PAM del tipo Wave Glider per il monitoraggio della presenza di mammiferi marini nelle aree di intervento;
- le risposte puntuali alle richieste di integrazioni effettuate dal MATTM, riportate in un documento dedicato (Doc. D'Appolonia No. 16-745-H3 Rev. 0);
- le risposte alle Osservazioni presentate nell'ambito della fase di consultazione pubblica della procedura di VIA, riportate in un documento dedicato (Doc. D'Appolonia No. 16-745-H4 Rev. 0)

Con riferimento alle richieste di integrazioni del MATTM e come indicato nella documentazione presentata in data 22 Luglio 2016, TGS-NOPEC intende trasmettere lo Studio di modellizzazione acustica sottomarina finalizzato alla valutazione degli effetti della propagazione del rumore sottomarino generato dalle attività in progetto e a stabilire una *Exclusion Zone* così come indicato dalle Linee guida di settore.

Lo Studio è stato predisposto dalla Società "SUBMON Environmental Marine Services" mentre il modello acustico è stato sviluppato e validato dalla Società KeAcoustic, Knowledge and Engineering.

Il presente documento ha lo scopo di presentare il modello di simulazione della propagazione acustica adottato e i risultati ottenuti dalla modellizzazione effettuata, riportando in allegato il testo integrale dello Studio.

## 2 DESCRIZIONE DEL MODELLO DI SIMULAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO

Per lo studio del rumore generato dalla sorgente sonora che sarà impiegata per l'esecuzione delle indagini geofisiche 2D in progetto è stato implementato un modello di simulazione della propagazione del rumore in ambiente marino.

Lo scopo della modellizzazione è stato quello di determinare le distanze alle quali si possono determinare potenziali impatti sulle specie marine (mammiferi e rettili marini) presenti nell'area di indagine e pertanto consentire la valutazione dell'impatto ambientale del rumore sottomarino e determinare le misure di mitigazione più adeguate.

Nel seguito si descrivono:

- l'approccio metodologico adottato;
- i parametri di input della modellizzazione;
- i risultati del modello.

Il testo integrale dello Studio di modellizzazione è riportato nell'Allegato A del presente documento.

### 2.1 APPROCCIO METODOLOGICO

La metodologia impiegata per la modellizzazione del rumore sottomarino è riassunta nel seguito:

- le caratteristiche del segnale della sorgente (*source signature*) derivano dalla simulazione effettuata tramite il software modellistico Gundalf. Lo spettro della sorgente è stato suddiviso in bande d'ottava in un range tra 10Hz e 1kHz. La sorgente di rumore è stata ipotizzata puntiforme e l'emissione sonora è stata considerata omnidirezionale;
- non essendo possibile sviluppare un modello per l'intera estensione dell'area di studio, sono state selezionate due zone rappresentative:
  - Zona A, ubicata nella parte a sud-est dell'area di indagine, in prossimità della scarpata e caratterizzata da profili batimetrici con profondità decrescenti in direzione della costa della Sardegna,
  - Zona B, rappresentativa delle batimetrie caratterizzate da profondità comprese tra 2000 e 3000 metri, tipiche dell'intera area di indagine.

Per ciascuna zona a partire da un punto d'origine sono stati definiti 12 transetti radiali spazati di circa 30° e di lunghezza pari a 60 km, ognuno caratterizzato dal proprio profilo batimetrico;

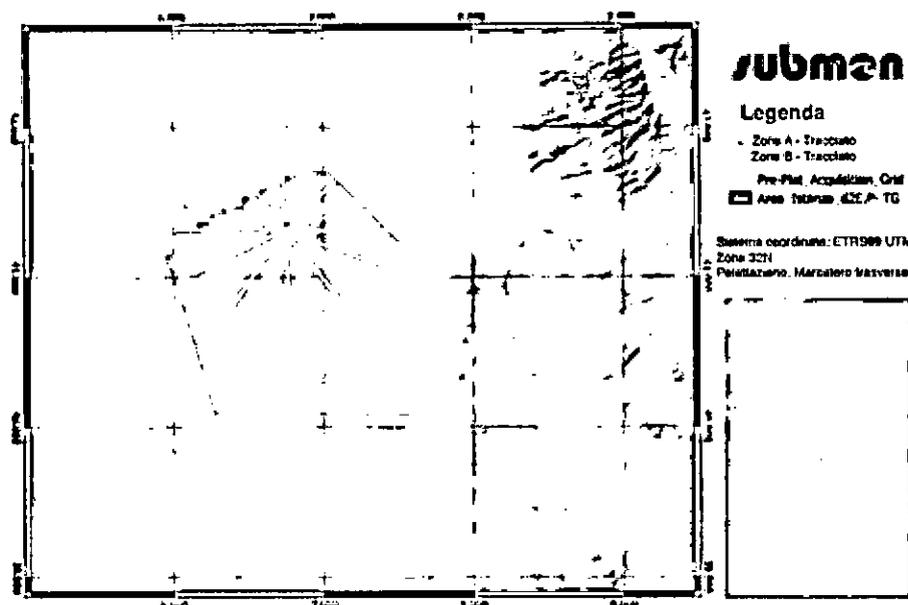


Figura 2.1: Zone Rappresentative dell'Area di Interesse

- è stata calcolata la perdita di trasmissione per ciascun profilo batimetrico attraverso due modelli del tipo “range-dependent”:
  - un modello alle equazioni paraboliche (*Range-dependent Acoustic Model - RAM*) per le basse frequenze,
  - un modello gaussiano di tipo *beam-tracing* (BELLHOP), per le alte frequenze;
- per ciascun profilo batimetrico è stato calcolato il valore di Sound Pressure Level (SPL) sottraendo la perdita di trasmissione dalla pressione sonora emessa dalla sorgente. Il SPL è stato calcolato per diverse profondità (10, 50, 100 e 1500 metri) in funzione della distanza dalla sorgente;
- per ciascuna profondità considerata e in base alla distanza dalla sorgente sono state calcolate tre differenti grandezze (RMS, PEAK, SEL). L’energia totale del suono a ogni distanza dalla sorgente è ottenuta sommando l’energia in ogni banda d’ottava;
- infine sono stati calcolati le distanze di esposizione acustica per tutte le grandezze considerate in funzione delle profondità. In particolare, tra l’altro, sono state calcolate le distanze alle quali si hanno livelli di 180 dB re 1μPa RMS, valore soglia di risposta danno temporaneo all’udito per i cetacei (TTS) secondo NOAA (2006), in base alle quali è stata definita l’*Exclusion Zone*.

## 2.2 PARAMETRI DELLA MODELLIZZAZIONE

I principali parametri impiegati nel modello sono riassunti nel seguito:

- caratteristiche della sorgente: la sorgente considerata nel modello è costituita da 34 air gun opportunamente configurate tramite il software modellistico Gundalf;

- batimetria: al fine di modellizzare la propagazione del rumore nell'area di indagine sono state scelte due zone rappresentative. Per ciascuna zona, a partire da un punto d'origine, sono stati definiti 12 transetti radiali. La batimetria di ciascun transetto è stata ottenuta dalle Tavole Generali di Batimetria Oceanica (GEBCO);

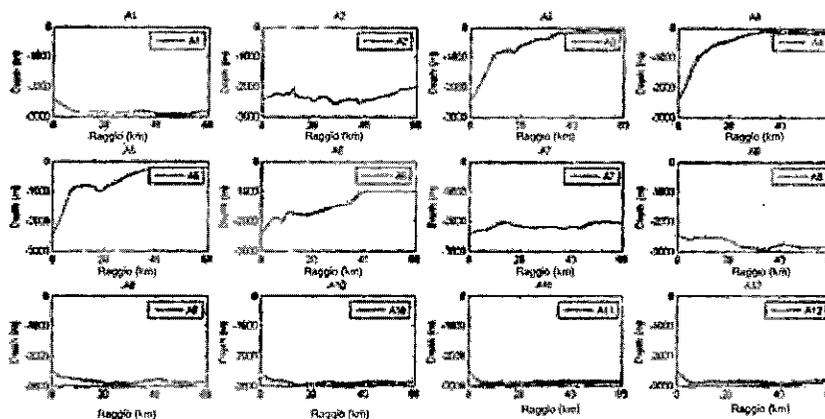


Figura 2.2: Profilo Batimetrico Zona A

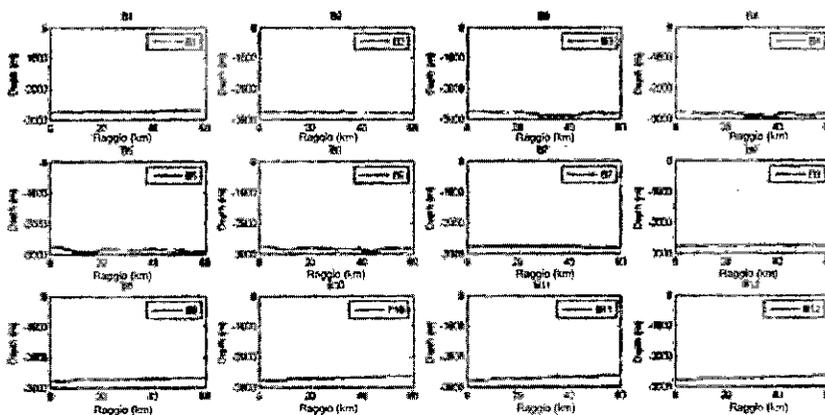
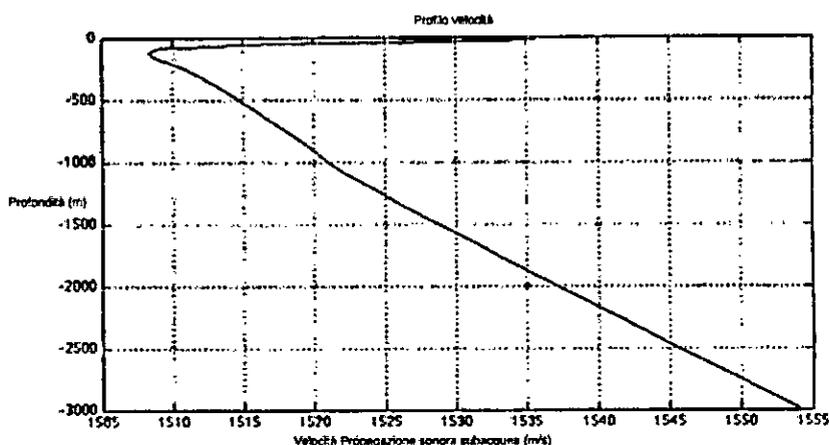


Figura 2.3: Profilo Batimetrico Zona B

- profilo di velocità: il profilo di velocità del suono è stato considerato sulla base dei dati di temperatura  $T$  ( $^{\circ}\text{C}$ ), di profili di salinità  $S$  (psu) e profondità  $D$  (m) ottenuti dal National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA);



**Figura 2.4: Profilo di Velocità**

- proprietà dell'acqua (superficie marina e assorbimento dell'acqua): la superficie marina è stata ipotizzata come uno strato piatto e liscio, pertanto non è stato considerato alcun attrito dovuto al vento. Il valore di assorbimento acustico dell'acqua è stato considerato non significativo per le basse frequenze;
- caratteristiche del fondale: il fondale considerato nel modello è costituito uno strato di sedimenti (fanghi) spesso 3 metri e da uno strato di basalto;

Mezzo	Profondità(m)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Velocità del suono compresso (m/s)	Assorbimento dell'onda compressa (dB/λ)
Fango	3	1500	1700	1
Basalto	Metà spazio	2700	5250	0.1

**Figura 2.5: Caratteristiche del Fondale Marino**

- rumore di fondo: poichè il livello di pressione sonora generato dagli impulsi dell'air gun è maggiore dei livelli di pressione sonora del rumore ambientale ottenuti dalla bibliografia, il modello non ha tenuto conto dal fondo naturale.

## 2.3 RISULTATI DEL MODELLO

I principali risultati della modellizzazione possono essere riassunti come segue:

- i valori soglia del danno uditivo (PTS e TTS) proposti da Southall et al. (2007) sono raggiunti in prossimità della sorgente e comunque a distanze non superiori a 213 m;
- il valore soglia del danno uditivo (TTS) fornito da NOAA (2006), pari a 180 dB re 1 μPa RMS, è raggiunto a distanze massime dalla sorgente di 696 m nella Zona A e 612 m nella Zona B;
- il valore soglia di risposta comportamentale fornito da NMFS (1985), pari a 160 dB re 1 μPa RMS, è raggiunto a distanze comprese tra 10 e 30 km dalla sorgente (tuttavia

l'analisi di sensitività condotta nell'ambito della modellizzazione effettuata ha dimostrato che considerando uno spessore dello strato di sedimenti del fondale più realistico, ossia superiore ai 3 m considerati nel modello, tali distanze tendono a ridursi significativamente);

- in generale, nella simulazione effettuata non sono stati osservati particolari fenomeni di propagazione di rumore a grandi distanze (*transmission cannel*) per nessuna delle bande di frequenza considerate (si evidenzia in particolare che la rifrazione delle onde acustiche nella colonna d'acqua e le interferenze causate dalla riflessione del fondale e della superficie marina possono incidere significativamente sulla riduzione della propagazione del rumore e quindi delle distanze ottenute alle varie profondità).

Sulla base dei risultati della modellizzazione è stata pertanto proposta una *Exclusion Zone* fino ad una distanza di 700 metri dalla sorgente che assicura di non raggiungere livelli sonori superiori a 180 dB re 1 $\mu$ Pa RMS, valore soglia considerato come più conservativo secondo la bibliografia di settore (NOAA, 2016) che potrebbe comportare per i cetacei una perdita temporanea o permanente dell'udito.

Per quanto riguarda i rettili marini (tartarughe), poiché i livelli di rumore da considerare/evitare sono al di sopra dei livelli considerati per i cetacei, la distanza di sicurezza ricade nella *Exclusion Zone* definita per i cetacei.

### 3 CONCLUSIONI

Al fine di consentire un'accurata valutazione dei potenziali impatti sulle specie marine (mammiferi e rettili marini) è stato condotto uno studio modellistico della propagazione del rumore sottomarino generato dalla sorgente sonora prevista per l'esecuzione delle indagini geofisiche 2D in progetto.

Nello specifico, il rumore sottomarino è stato calcolato a partire dal livello acustico della sorgente, stimato tramite il software modellistico GUNDALF, e della perdita di propagazione (*propagation loss*) del suono, in funzione della profondità, della distanza rispetto alla sorgente e delle caratteristiche del mezzo attraversato.

Lo studio ha pertanto consentito di definire le distanze dalla sorgente oltre le quali non si prevede di raggiungere livelli di rumore tali da poter arrecare danni uditivi di tipo temporaneo o permanente ai mammiferi e rettili marini sulla base dei valori soglia reperiti in letteratura.

In considerazione delle specie maggiormente presenti nell'area di interesse (cetacei sensibili alle basse e medie frequenze quali la Balenottera comune, il Tursiopo, la Stenella, il Grampo, il Delfino comune e il Capodoglio) e associando l'attività in progetto all'emissione di suoni ad impulso multiplo, sono stati considerati nel modello i seguenti valori soglia di danno all'udito (Southall, 2007):

- danno permanente (PTS):
  - Livello di Pressione Sonora (SPL): 230 dB re: 1  $\mu$ Pa,
  - Livello di Esposizione Sonora (SEL): 198 dB re: 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>-s;
- danno temporaneo (TTS):
  - Livello di Pressione Sonora (SPL): 224 dB re: 1  $\mu$ Pa,
  - Livello di Esposizione Sonora (SEL): 183 dB re: 1  $\mu$ Pa<sup>2</sup>-s.

Oltre ai valori soglia sopra riportati, il modello ha tenuto conto anche dei livelli di 160 e 180 dB re: 1  $\mu$ Pa RMS, che costituiscono rispettivamente i valori soglia di risposta comportamentale (NMFS, 1985) e di danno temporaneo all'udito (TTS), così come indicato dal National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA, 2006).

Inoltre, durante la fase operativa saranno poste in essere le misure di prevenzione e mitigazione introdotte dalle Linee Guida redatte da ISPRA, ACCOBAMS e JNCC e descritte nel Capitolo 9 del Quadro di Riferimento Progettuale dello SIA.

Nel seguito sono elencate le principali misure:

- presenza a bordo di MMO (Marine Mammals Observers);
- impiego di un sistema PAM (Passive Acoustic Monitoring);
- adozione della tecnica del *soft start*;
- definizione di una "Zona di Esclusione";
- interruzione dell'energizzazione ad ogni fine linea di acquisizione;
- azioni specifiche in caso di avvistamento e/o presenza di cetacei all'interno della zona di ricerca;

- minimizzazione della propagazione delle onde acustiche attraverso l'ottimizzazione della configurazione della sorgente di energizzazione;
- esecuzione delle operazioni di prospezione al di fuori dei periodi di riproduzione dei cetacei, nonché di altre specie marine (rettili marini e specie demersali e pelagiche).

Sulla base dei risultati del modello è stata definita una *Exclusion Zone*, ossia un'area di sicurezza di 700 m intorno alla sorgente, all'interno della quale non si prevede di raggiungere valori soglia per danno temporaneo all'udito.

Tale zona sarà sottoposta a continuo monitoraggio ad opera dei MMO e in caso di avvistamento di mammiferi marini all'interno di tale zona sarà prevista l'immediata riduzione dell'intensità della sorgente o la cessazione delle attività.

In virtù di quanto sopra, del periodo di svolgimento delle attività (autunno-inverno), della distanza dal Santuario dei Cetacei (15 miglia) e delle misure di mitigazione che saranno adottate nel corso delle attività in progetto (presenza a bordo di un MMO, impiego di PAM, adozione della tecnica del soft start) è possibile confermare quanto riportato nello SIA ovvero che l'impatto possa essere considerato di **media entità, temporaneo e reversibile**.

Anche a livello di impatto sulle popolazioni, in considerazione:

- del periodo previsto di scarsa frequentazione dell'area;
- della durata delle attività (80 giorni complessivi con interruzioni tra una linea e l'altra e comunque almeno ogni 35 giorni per rifornimento alla base logistica);
- delle misure di mitigazione tra le quali l'interruzione delle attività in caso di presenza riscontrata all'interno dell'*Exclusion Zone*;
- della configurazione di esercizio dell'attività stessa (unica linea sismica che lascia aperti spazi per passaggi in sicurezza delle specie ad adeguata distanza dalle sorgenti sonore);

è possibile ipotizzare come gli effetti che potranno aversi su individui/gruppi siano al più di tipo comportamentale ma che non influenzino le normali attività degli stessi e che pertanto l'impatto potenziale sulla popolazione possa essere considerato **basso, temporaneo e reversibile**.

Infine, con riferimento ai rettili marini (tartarughe) le distanze di sicurezza stimate dal modello ricadono all'interno della *Exclusion Zone* definita per i cetacei e quindi, in considerazione dell'ubicazione in mare aperto delle attività in progetto che facilita un eventuale allontanamento dell'esemplare in caso di disturbo, della distanza dalle coste (almeno 45 km) e dell'assenza di siti abituali di deposizione delle uova, del periodo di svolgimento delle attività (autunno-inverno), e delle misure di mitigazione previste (ad es. misura anti intrappolamento della boa di coda o *turtle guards*), si conferma quanto riportato nello SIA ovvero che l'impatto sulla componente possa essere ritenuto di **lieve entità, temporaneo e reversibile**.

AC/FDR/AGV/FMO/LV/PAR:cht

## RIFERIMENTI

D'Appolonia S.p.A., 2016, "Prospezione Geofisica al Largo della Costa Nord-Occidentale della Sardegna, Zona Marina E - Studio di Impatto Ambientale, Aggiornamento a Seguito di Modifiche Progettuali" predisposto per TGS-NOPEC, Doc. No. 16-745-H1 Rev. 0.

SUBMON S.L.L., 2016, "Underwater Acoustic Modelling for a 2D Seismic Survey in West Sardinia", predisposto per TGS-NOPEC (la traduzione in italiano del documento è riportata in Allegato A).

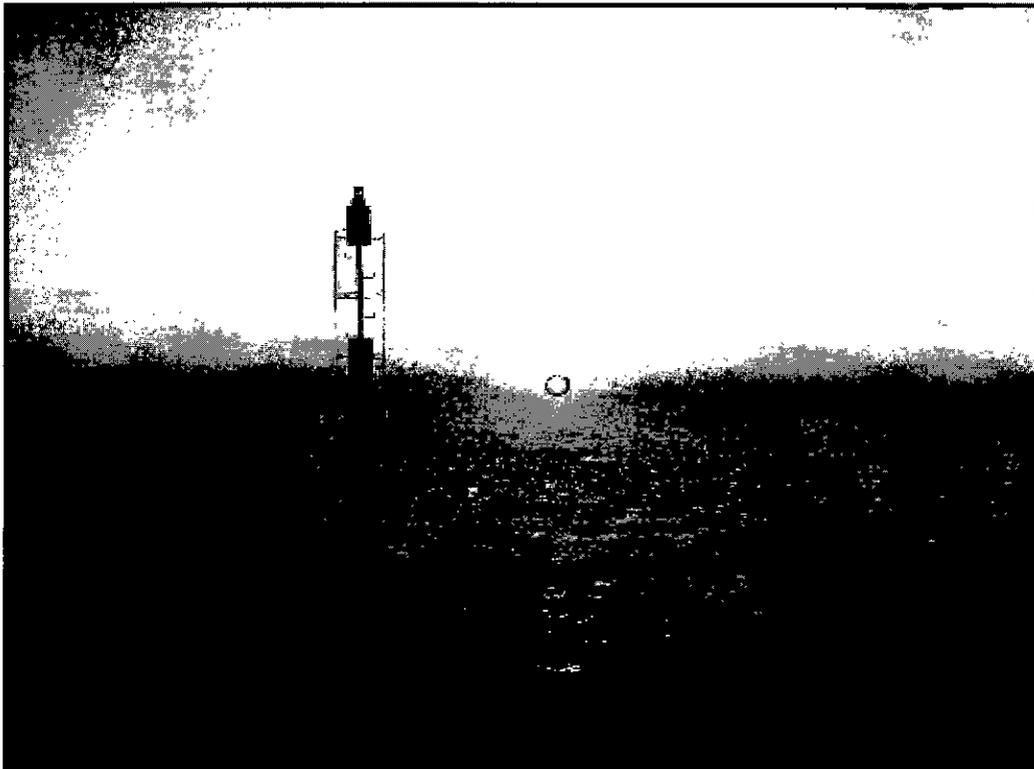
**ALLEGATO A**  
**INDAGINE GEOFISICA 2D AL LARGO DELLA COSTA NORD-OCCIDENTALE DELLA**  
**SARDEGNA – MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO**

# INDAGINE GEOFISICA 2D AL LARGO DELLA COSTA NORD-OCCIDENTALE DELLA SARDEGNA

## MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO

---

TGS-NOPEC  
Asker, Norvegia





Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellazione del rumore sottomarino

---

INDAGINE GEOFISICA 2D AL LARGO DELLA COSTA NORD-OCCIDENTALE DELLA SARDEGNA  
MODELLIZZAZIONE DEL RUMORE SOTTOMARINO

---

Preparato da: Pere Artís, Marcel Janer, Jordi Sánchez and Carla A. Chicote

Approvato da: Carla A. Chicote

**submen**

DS Marine Environmental Consultancy, S.L.L.

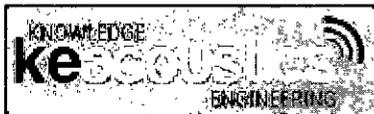
Rabassa, 49-51 08024 Barcelona

Tel: 932135849

info@submon.org - www.submon.org

 @submon

 www.facebook.com/submon





<b>1. SOMMARIO</b> .....	<b>5</b>
3.1 Impatto sui mammiferi marini .....	9
3.1.1 Mascheramento uditivo .....	9
3.1.2 Risposte comportamentali .....	10
3.1.3 Perdita dell'udito .....	11
3.1.4 Danni ai tessuti e mortalità .....	13
3.1.5 Effetti sui rettili marini.....	14
<b>4. CARATTERIZZAZIONE DELLA SORGENTE</b> .....	<b>15</b>
<b>5. MODELLO DELLA PROPAGAZIONE DEL SUONO</b> .....	<b>18</b>
5.1 Descrizione Generale.....	18
5.2 Percorsi di propagazione acustica subacquea .....	19
5.3 Modelli di propagazione acustica subacquea.....	20
5.4 Metodi di misura .....	22
5.4.1 Livello di pressione sonora (SPL) .....	22
5.4.2 Livello di picco del suono.....	22
5.4.3 Livello di pressione acustica (RMS) .....	23
5.4.4 Livello di esposizione sonora (SEL) .....	23
5.4.5 Livello di esposizione sonora cumulativo .....	23
5.4.6 Misura della frequenza dei mammiferi marini.....	23
5.5 Batimetria.....	25
5.6 Profilo di velocità del suono .....	28
5.7 Proprietà dell'acqua .....	29
7.7.1 Superficie marina.....	29
5.7.2 Assorbimento dell'acqua .....	29
5.8 Caratteristiche del fondale marino .....	30
5.9 Rumore di fondo.....	31
<b>6. METODOLOGIA</b> .....	<b>33</b>
<b>7. RISULTATI</b> .....	<b>35</b>
7.1 ZONA A – DISTANZE DI SICUREZZA .....	36
7.1.1 RMS.....	36
7.1.2 SEL.....	37
7.1.3 PEAK.....	37
7.1.4 SEL M .....	38
7.2 ZONE B – DISTANZE DI SICUREZZA.....	39
7.2.1 RMS.....	39
7.2.2 SEL.....	40
7.2.3 PEAK.....	41



Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellizzazione del rumore sottomarino

---

7.2.4 SEL M .....	42
7.3 Zona A- GRAFICI 2D.....	43
7.4 Zona B-GRAFICI 2D.....	45
<b>8. SOMMARIO E CONCLUSIONI.....</b>	<b>49</b>
<b>9. ANNESSO A.....</b>	<b>51</b>
9.1 Analisi della sensitività.....	51
<b>10. ANNESSO B - GRAFICI .....</b>	<b>54</b>
10.1 ZONA A .....	55
10.1.1 A1.....	55
10.1.2 A5.....	56
10.2 ZONA B.....	57
10.2.1 BT1.....	57
10.2.2 BT2.....	60
10.2.3 BT3.....	62
<b>11. BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>63</b>



## 1. Sommario

### Oggetto dello studio

Il presente documento è stato preparato dalla Società SUBMON® - Environmental Marine Services allo scopo di presentare i risultati della modellizzazione del rumore sottomarino generato durante l'esecuzione di un'indagine geofisica 2D da effettuarsi al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna tramite l'impiego di una nave sismica del tipo "BGP Explorer". Il modello acustico è stato sviluppato e validato dalla Società KeAcoustic, Knowledge and Engineering.

Lo scopo dello studio è quello di fornire dati e informazioni sufficienti per consentire la valutazione dell'impatto del rumore sottomarino sui mammiferi marini e di conseguenza determinare le misure di mitigazione più adeguate.

### Descrizione Generale

Nell'ambito dello studio è stata effettuata una modellazione acustica per determinare i livelli di pressione sonora derivanti dalle operazioni di rilievo sismico attraverso l'utilizzo di *air gun*. I dati ottenuti sono stati confrontati con i valori di soglia del danno e risposta comportamentale.

Inoltre, il presente documento descrive i criteri selezionati per stimare l'impatto sui cetacei e descrive la sorgente sonora (*air gun array*) utilizzata.

Nella Sezione 5 sono specificati i parametri utilizzati nel modello di propagazione sonora in ambiente sottomarino e vengono descritti i modelli di propagazione presi in considerazione. Successivamente, nella Sezione 6, viene riportata la metodologia adottata per la stima della pressione sonora in funzione della distanza. Nella Sezione 7 vengono presentati i risultati della modellizzazione.

Il documento si chiude con le conclusioni (Sezione 8) e due allegati che riportano rispettivamente l'analisi di sensitività (Allegato A) e i grafici più rappresentativi della simulazione effettuata (Allegato B).



### **Sintesi dei risultati**

Sulla base dei risultati della modellizzazione è stata stabilita una Zona di Esclusione (ZE) fino ad una distanza di 700 metri dalla sorgente che assicura di non raggiungere livelli sonori superiori a 180 dB RMS, valore soglia che, come previsto dagli studi più conservativi (NOAA 2006), potrebbe comportare per i mammiferi marini una perdita temporanea o permanente dell'udito.

Il valore soglia di 160dB RMS relativo alle risposte comportamentali dei mammiferi marini (NMFS 1985) è raggiunto a distanze che variano tra 10 e 30 km dalla sorgente. Tuttavia, le analisi di sensitività suggeriscono che, considerando un fondale marino caratterizzato da uno spessore fangoso più realistico ovvero superiore a quanto considerato nel modello, tali distanze tendono a diminuire significativamente.

Nelle simulazione effettuate non si sono osservati particolari fenomeni di propagazione di rumore a grandi distanze (*transmission cannel*) per nessuna delle bande di frequenza considerate. Si evidenzia che la rifrazione delle onde acustiche nella colonna d'acqua e le interferenze causate dalla riflessione del fondale e della superficie marina possono incidere significativamente sulla riduzione della propagazione e quindi sulle distanze ottenute per ciascuna profondità.



## 2. Area di indagine

L'area di indagine, mostrata in Figura 1, è ubicata al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna, nel bacino ligure-provenzale. Nella Figura 1 sono inoltre rappresentate le linee sismiche lungo le quali saranno condotte le indagini 2D, attraverso l'impiego di una sorgente sonora composta da combinazioni *air gun* (vedi Sezione 3).

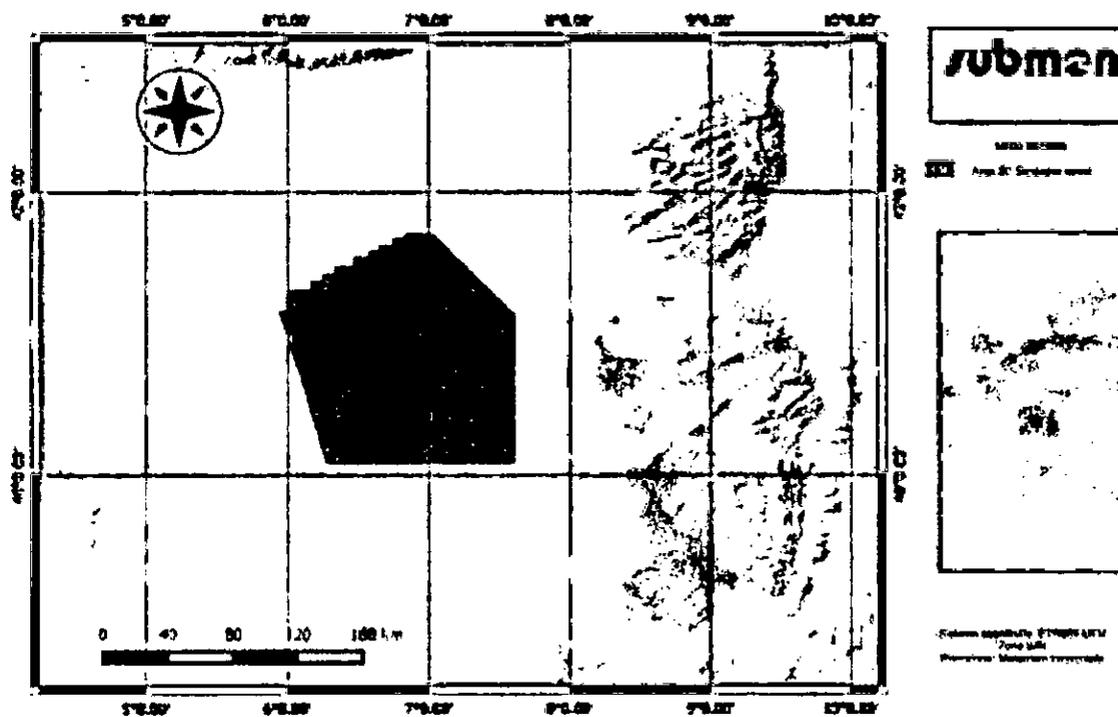


Figura 1 Area di indagine

## 3. Criteri per la valutazione dell'impatto sui cetacei

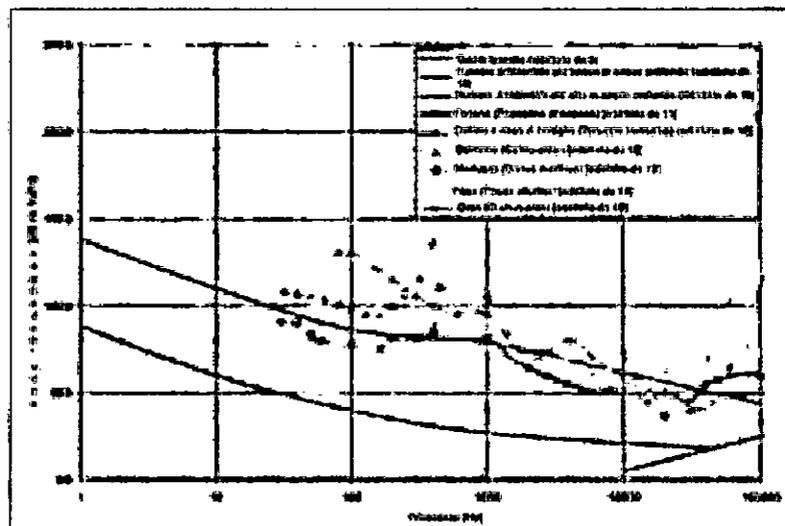
Quando si valutano gli effetti del rumore sottomarino sull'ecosistema e sugli organismi marini, bisogna tenere in considerazione diversi fattori: il livello sonoro al recettore sia nella banda larga che nella distribuzione delle frequenze, la durata e la frequenza del suono e il ciclo operativo della sorgente sonora.



I cetacei sono in generale le specie più sensibili agli effetti del rumore sottomarino (Richardson et al. 1995) in quanto possono essere soggetti a danni fisiologici diretti come risultato da studi effettuati su diverse specie e in relazione a differenti sorgenti di rumore (Nachtigall et al. 2004; Finneran et al. 2002. Schlundt et al. 2000). Inoltre, il rumore antropogenico può causare cambiamenti nella soglia di rilevamento, mascheramenti dei segnali acustici e modifiche comportamentali (Richardson et al. 1995; Finneran 2000; McCauly et al., 2003; Southall 2007; Diederichs et al. 2008).

Una variabile importante nella valutazione degli effetti del rumore sottomarino è la soglia dell'udito degli organismi marini, in quanto tali effetti possono dipendere dal livello del rumore percepito quando esso è al di sopra della soglia dell'udito della singola specie o di un gruppo specifico. La metodologia di base per la definizione di questo livello, chiamato Livello percepito o dBht (specie), tiene conto del fatto che non tutti gli organismi sono ugualmente sensibili ai diversi livelli di rumore e alle diverse frequenze, pertanto bisogna effettuare una valutazione specie per specie o gruppo per gruppo (Nedwell et al., 2007 ). Nella Figura 2 si può vedere un audiogramma di specie diverse di pesci e mammiferi marini con riferimento al rumore ambientale.

Figura 2  
Audiogrammi delle diverse specie di pesci e mammiferi marini con riferimento al rumore ambientale (Nedwell et al. 2004).



Un altro criterio comunemente impiegato è il livello di esposizione sonora (SEL), ovvero una misura dell'energia ricevuta dal recettore che rappresenta l'integrale della pressione sonora



sul tempo. In tal caso, lo stesso tipo di effetto può essere prodotto da suoni di intensità e durata di esposizione opposte, per esempio un'alta intensità e una breve durata o viceversa; lo stesso concetto è impiegato nell'igiene industriale e nella sanità.

Il valore in RMS è uno degli indici più usati, ma non considera l'esposizione ai livelli di rumore determinati da sorgenti di tipo impulsivo, come ad esempio le esplosioni o gli *air gun*.

Gli effetti che il rumore sottomarino può determinare sugli organismi marini possono essere classificati in termini di mascheramento uditivo (*masking*), risposte comportamentali (allontanamento, nutrizione, riproduzione, ecc.), cambiamenti fisiologici temporanei, perdita temporanea dell'udito e mortalità.

### 3.1 Impatto sui mammiferi marini

---

#### 3.1.1 Mascheramento uditivo

Il mascheramento uditivo, anche detto interferenza acustica, rappresenta la maggiore interferenza nell'area interessata dalla presenza della sorgente sonora. Alcune specie usano il suono per comunicare, spostarsi o localizzare, trovare e catturare prede, fuggire dai predatori ecc., pertanto un suono che ha le stesse caratteristiche in termini di potenza e/o spettro può determinare il mascheramento dei suoni emessi e percepiti con effetti secondari che possono tradursi in maggiore dispendio di energie, diminuzione del tasso riproduttivo, ecc..

Il mascheramento avviene quando il rumore interferisce con le capacità dell'animale di percepire (rilevare, interpretare e/o discriminare) un suono. Il grado di mascheramento è influenzato dal livello sonoro, dalla banda di frequenza e dalla durata del rumore rispetto al suono interessato.

La maggior parte delle vocalizzazioni dei Mysticeti vengono emesse con frequenze inferiori a 1 kHz, come per le balenottere azzurre (*Balaenoptera musculus*) e le balenottere comuni (*Balaenoptera physalus*) che comunicano prevalentemente a queste frequenze (Clark 1998).

Uno studio recente di Castellote et al. 2012 evidenzia che le caratteristiche del suono prodotto dal maschio della balenottera comune varia a seconda delle condizioni dell'ambiente acustico



e che questi durante l'esecuzione di attività sismiche può lasciare l'area indagata per lunghi periodi di tempo.

Altri studi hanno dimostrato che circa 250 maschi di balenottera comune smettono di comunicare per diverse settimane o mesi durante l'esecuzione di un rilievo sismico, ricominciando nel giro di ore o giorni una volta che il rilievo si è concluso (IWC, 2007).

---

### 3.1.2 Risposte comportamentali

Il Servizio Nazionale della Pesca Marittima Statunitense (NMFS, 1985) ha stabilito un valore soglia pari a 160 dB RMS 1 $\mu$ Pa per la definizione di zone di sicurezza, in cui i cetacei assumono un comportamento schivo e quest'ultimo viene usato per stabilire la distanza limite per effetti comportamentali.

È difficile identificare con precisione una risposta comportamentale, così come stabilire se questa possa essere positiva, negativa o perfino neutrale per l'animale. Le risposte comportamentali dipendono da una serie di fattori quali la sensibilità uditiva del singolo esemplare, il grado di tolleranza al rumore, l'esposizione allo stesso rumore nel passato, il comportamento al momento dell'esposizione, l'età e il sesso dell'animale e la composizione del gruppo.

Diversi studi hanno tuttavia provato che gli animali modificano il loro comportamento in risposta al clima acustico sottomarino.

Ridgway (1997<sub>a,b</sub>; 1999) e Schlundt et al. (2000) hanno studiato il comportamento dei Tursiopi a diverse frequenze, individuando valori soglia di risposta comportamentale compresi tra i 178 e 186 dB, a seconda della frequenza. Nowacek et al. (2004) hanno riscontrato cambiamenti nel comportamento dei Mysticeti, in particolare nella balena franca nordatlantica (*Eubalaena glacialis*) attraverso la riproduzione di impulsi artificiali a frequenze costanti e modulate, mentre non sono stati riscontrati effetti quando è stato riprodotto il rumore generato dalle navi.

Goold (1996) ha tracciato l'attività acustica in una popolazione di delfini comuni (*Delphinus delphis*) prima, durante e dopo un'indagine sismica effettuata al largo della costa gallese e ha notato che in un'area di raggio pari a circa 1 km, i delfini hanno mostrato un comportamento avverso nei confronti dei segnali emessi dalla sorgente sismica.



Carolyn et al. (2006) hanno condotto uno studio etologico su 1675 esemplari di cetacei in prossimità di una sorgente sismica. I risultati hanno mostrato un grado variabile di disturbo nei cetacei; in particolare gli odontoceti (delfini, focene, capodogli) hanno mostrato una maggiore tendenza all'allontanamento laterale, mentre i mysticeti (balene) e le orche hanno mostrato un allontanamento spaziale localizzato. Non sono stati rilevati cambiamenti nell'orientamento dei capodogli, tuttavia il numero di osservazioni non è stato considerato sufficiente per effettuare un'analisi statistica rappresentativa.

Studi più recenti di Castellote et al. 2012 hanno fornito evidenza che in condizioni di attività sismica le balenottere comuni possono lasciare l'area per un periodo esteso, usando il loro sistema di localizzazione.

Per quanto riguarda i capodogli, i risultati degli studi effettuati sono piuttosto controversi. Si pensa che questi cetacei abbiano una soglia dell'udito alle basse frequenze più alta di altri odontoceti (Gordon et al. 2003) tale da renderli più sensibili agli impulsi sismici.

In ogni caso, Mate et al. (1994) (citato in Gordon et al. 2003) hanno dimostrato la riduzione di un terzo della densità di capodogli in un'area a nord del Golfo del Messico due giorni dopo l'inizio di un'indagine sismica. Cinque giorni dopo, la presenza si era ridotta a zero esemplari. Mate et al. (1994) (cit. Gordon et al. 2003) hanno riscontrato che i capidogli smettevano di comunicare ogni volta che, ma non sempre, una nave di ricerca sismica emetteva impulsi a una distanza di 370 km. Tuttavia, a differenza di quanto sopra, altre osservazioni suggeriscono che i capodogli mostrano risposte minime e non abbandonano il loro habitat a causa alle indagini sismiche (ad esempio Rankin & Evans, 1998; Swift 1998 citato in Gordon et al. 2003).

---

### 3.1.3 Perdita dell'udito

La perdita dell'udito può essere associata a modifiche temporanee o permanenti della soglia di sensibilità uditiva. Questi cambiamenti possono essere:

- reversibili (TTS) – **Temporary Threshold Shifts;**
- permanenti e irreversibili (PTS) – **Permanent Threshold Shifts;**

La perdita temporanea dell'udito è associata all'esposizione degli organismi ad alti livelli di rumore o a livelli bassi e continui, con il conseguente ripristino dell'udito in un periodo temporale variabile. Nel caso in cui la perdita temporanea dell'udito si ripete, e se il livello del



suono che determina la TTS è costante o si manifesta ad un livello di rumore eccezionalmente elevato, la perdita d'udito da temporanea può diventare permanente (PTS) parziale o totale. La perdita dell'udito, temporanea o permanente, dipende dall'intensità e dalla durata del suono. Studi ed esperimenti sulla perdita temporanea o permanente dell'udito si sono concentrati principalmente sugli odontoceti e sui pesci, grazie alla possibilità di poterli trattenere in cattività.

Il Servizio Nazionale della Pesca Marittima Statunitense (NMFS) e l'Amministrazione Nazionale Oceanografica e Atmosferica (NOAA) per determinare le aree d'impatto associate ai rumori subacquei hanno utilizzato inizialmente i livelli di pressione del suono in RMS (NMFS, 1995). Il NMFS statunitense ha stabilito, come linea guida, che una pressione sonora al di sopra di 180 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  RMS possa causare la perdita temporanea dell'udito nei cetacei, mentre una pressione sonora al di sopra 190 dB re 1  $\mu\text{Pa}$  RMS possa causare la perdita temporanea dell'udito nei pinnipedi (NMFS, 1995).

Più recentemente, il NOAA ha sviluppato alcuni criteri per identificare i danni uditivi sulla base dell'esposizione. Un livello di esposizione sonora di 195 dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  è considerato come valore soglia per il danno uditivo temporaneo (TTS), mentre ad un'esposizione di 215 dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$  viene associato un danno uditivo permanente (PTS) (NOAA, 2006).

La definizione di questi criteri deriva da test di esposizione al rumore effettuati su mammiferi marini in cattività, esposti a brevi durate (1 secondo) e a bande di frequenza ristrette simili alle trasmissioni sonar (Schlundt et al, 2000) e dall'estrapolazione di dati ottenuti sui mammiferi terrestri.

La SEL media richiesta per determinare un inizio di TTS in questi test è stata identificata a 195 dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ . Questi risultati sono stati supportati dai dati ottenuti con suoni di breve durata di Finneran et al. (2000, 2003) e suoni di lunga durata di Nachtigall et al. (2003). Tutti questi dati sono stati considerati per dimostrare che la TTS nei cetacei è correlata con la SEL ricevuta e che l'inizio dell'esposizione alla TTS rientra nell'energia equivalente di 195 dB re  $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ . I criteri sono quindi stati considerati applicabili a segnali di varia durata.

Nel caso dei mammiferi marini, per ovvie ragioni etiche, gli animali sottoposti agli studi condotti non sono stati esposti a livelli sonori tali da poter determinare perdite dell'udito permanenti, pertanto le relative soglie di esposizione sono state estrapolate da valori rilevati negli esseri umani (Southall, 2007).



Nello studio di Southall et al. 2007 sono stati osservati diversi gruppi di mammiferi marini e livelli sonori che non hanno fornito basi scientifiche tali da far credere che l'esposizione possa causare danni all'udito. L'autore ha definito cinque gruppi di mammiferi basandosi sulle similitudini delle loro abilità uditive e ha sviluppato e generalizzato una funzione associata a un fattore di correzione (chiamato "M-Weighting") per i pinnipedi e cetacei a bassa, media e alta frequenza.

Per la TTS Southall 2007 definisce un livello di peak di 224dB re 1 $\mu$ Pa per i cetacei e di 212 dB re 1 $\mu$ Pa per i pinnipedi, con il corrispondente livello di esposizione sonora (SEL) di 183 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s M-Weighted per i cetacei e di 171 dB re 1 $\mu$ Pa<sup>2</sup>s M-Weighted per i pinnipedi.

### 3.1.4 Danni ai tessuti e mortalità

I danni ai tessuti e la possibile mortalità della specie sono correlati alle onde d'urto generate da sorgenti impulsive (non continue) come esplosioni o sonar ad alta potenza e sono stati osservati in particolare nei pesci e nei mammiferi marini.

Una serie di incidenti avvenuti in Grecia, Bahamas, Madeira e nelle Isole delle Canarie hanno mostrato che c'è una relazione tra l'uso di sonar militari e episodi di spiaggiamento di massa per alcuni cetacei, che hanno interessato per la maggior parte zifidi.

Nella seguente Tabella 1 si riportano i valori soglia stabiliti da autori diversi per diversi impatti e specie.

EFFETTO	LIMITE DI ESPOSIZIONE			STUDIO	SPECIE
	RMS	SEL	Livello di peak		
TTS	180dB re 1 $\mu$ Pa			NMFS 1985	CETACEI
PTS		215 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s		NOAA 2006	CETACEI
PTS		198 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s M-Weighted	230 dB re 1 $\mu$ Pa	Southall 2007	CETACEI
TTS		183 dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s M-Weighted	224dB re 1 $\mu$ Pa	Southall 2007	CETACEI



TTS	175- 179 dB re 1 $\mu$ Pa	McCauley <i>et al.</i> (2002)	TARTARUGHE
Risposte comportamentali	160 dB re 1 $\mu$ Pa	NMFS (1985)	CETACEI
Risposte comportamentali	166- 175 dB re 1 $\mu$ Pa	McCauley <i>et al.</i> (2002)	CETACEI

Tabella 1 Valori soglia

### 3.1.5 Effetti sui rettili marini

Sebbene la maggior parte degli studi sull'inquinamento acustico nell'ambiente marino siano concentrati sui cetacei, è stato dimostrato che il rumore sottomarino può determinare effetti anche sui rettili marini (tartarughe), anche se in maniera diversa a causa delle loro caratteristiche anatomiche e fisiologiche. McCauley et al. (2002) hanno studiato la risposta agli impulsi sismici su tartarughe verdi (*Chelonia mydas*) e tartarughe comuni (*Caretta caretta*) tenute in cattività.

Le sperimentazioni hanno rilevato cambiamenti significativi nei movimenti delle tartarughe e fenomeni di allontanamento a livelli compresi tra 166 e 175 dB re 1  $\mu$ Pa RMS. Inoltre, dall'analisi neurofisiologia condotta sulle tartarughe comuni, è stato individuato un danno fisiologico temporaneo (TTS) due settimane dopo gli esperimenti durante i quali gli animali sono stati sottoposti a impulsi sismici compresi tra 175 e 179 dB re 1 $\mu$ Pa RMS.

Anche altri studi condotti durante lo svolgimento di indagini sismiche (Weir, 2007; DeRuiter and Doukara, 2010) hanno osservato una reazione delle tartarughe al rumore sottomarino, ma non è stato possibile determinare se tale reazione comportamentale fosse dovuta alla presenza delle navi, della strumentazione (Weir, 2007) o degli air gun, in quanto non è stato possibile associare la reazione (immersione rapida dell'animale) alla origine dello stimolo essendo gli air gun spenti (DeRuiter and Doukara, 2010).



## 4. Caratterizzazione della sorgente

La sorgente sonora considerata nel presente studio è costituita da un insieme di dispositivi pneumatici ad aria compressa (air gun) che una volta azionati determinano la formazione nell'acqua di una bolla e quindi la generazione di un impulso. La bolla d'aria una volta generata collassa su se stessa e oscilla diverse volte. Il segnale acustico prodotto è una sequenza di impulsi positivi e negativi, proporzionale alla variazione del volume della bolla d'aria.

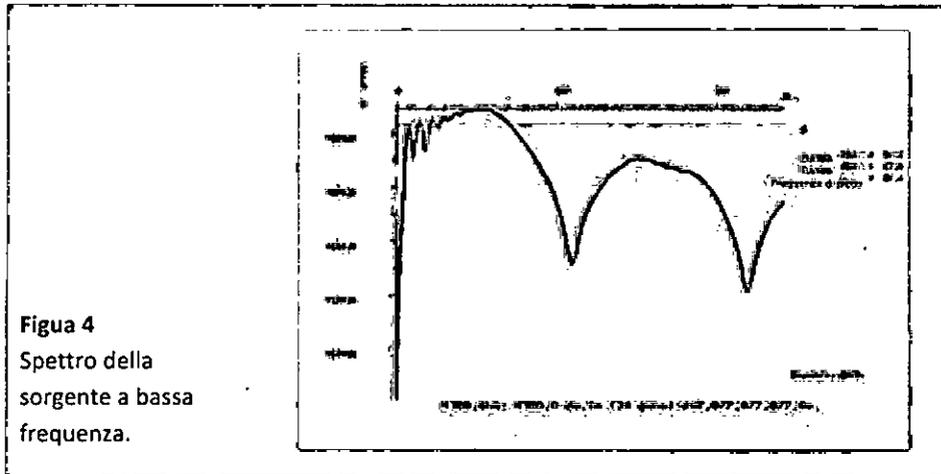
In questo studio è stata considerata una sorgente costituita da 34 unità ad aria compressa (air gun). Le caratteristiche della sorgente sono riportate nella seguente Tabella 2. La modellizzazione del segnale acustico generato dalla sorgente è stata effettuata tramite il modello Gundalf (Laws, Hatton, & Haarsten, 1990).

Nel presente studio è stato considerato che la sorgente venga posizionata ad una profondità di 7 metri dalla superficie del mare.

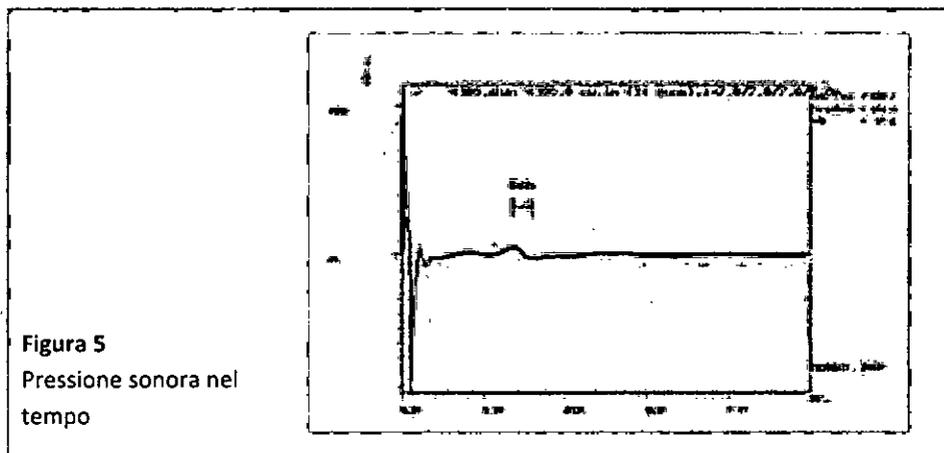
### Caratteristiche della Sorgente

Numero di air guns	34
Volume totale (cu.in).	4300.0 (70.5 litri)
Peak to peak in bar-m.	189 +/- 1.62 (18.9 +/- 0.162MPa, ~ 266dB re muPa. at 1m.)
Zero to peak in bar-m.	104 (10.4MPa, 260dB re 1muPa. at 1m.)
RMS pressure in bar-m	8.35 ( 0.835MPa, 238dB re 1 muPa. at 1m.)
Primary to bubble (peak to peak)	25.1 +/- 7.88
Bubble period to first peak (s.)	0.135 +/- 0.0137
Maximum spectral ripple (dB): 10.0-50.0 Hz	7.85
Maximum spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	215
Average spectral value (dB): 10.0 - 50.0 Hz.	212
Total acoustic energy (Joules)	526368.6
Total acoustic efficiency (%)	54.1





In Figura 5 si traccia la variazione temporale della pressione sonora generata dalla sorgente.



Lo spettro delle frequenze è stato suddiviso in bande d'ottava.

La successiva Tabella 3 riporta i livelli di ampiezza spettrale in bande d'ottava.

Frequenza centrale della banda d'ottava(Hz)	Livello di ampiezza spettrale (dB)
16	228
31.5	233



63	235
125	228
250	227
500	225
1000	213

Tavola 3 Livelli di ampiezza spettrale corrispondenti alle bande d'ottava

## 5. Modello della propagazione del suono

### 5.1 Descrizione Generale

Il modello di propagazione del rumore sottomarino è impiegato per stimare il campo sonoro generato dalla sorgente descritta nella precedente Sezione.

L'obiettivo del modello è quello di determinare le distanze dalla sorgente alle quali si possono determinare potenziali impatti sulle specie marine, calcolando la perdita di trasmissione del suono in mare a partire dalla sorgente configurata tramite il modello Gundalf. Si evidenzia che la perdita di trasmissione acustica in mare è funzione di fattori quali la profondità, l'estensione, l'ubicazione e le caratteristiche ambientali.

La diffusione geometrica ideale del suono può avvenire solo se la velocità della propagazione rimane costante, il che non avviene nell'ambiente marino a causa della variazione della temperatura con la profondità. A parte gli effetti della velocità del suono, il mare è un mezzo assorbente e attenua il suono all'aumentare della frequenza acustica. In più, i confini del mezzo (fondale e superficie) influenzano l'intensità del suono a causa della parziale riflessione delle onde acustiche.

Poiché la perdita di trasmissione acustica dipende dalle caratteristiche ambientali del mezzo, l'accuratezza del modello dipende dall'esattezza dei dati di input che includono le caratteristiche della superficie marina, della colonna d'acqua e del fondale marino. Tuttavia, le esatte informazioni non possono essere ottenute per tutti i possibili scenari e in particolare a lunghe distanze. In questo caso, basarsi sul modello di propagazione geometrica potrebbe essere inappropriato e pertanto sono state formulate delle ipotesi riguardo il profilo sonoro, le condizioni del fondale, ecc.

Tutti i metodi e le ipotesi considerati in questo studio di modellizzazione sono descritti nella presente sezione. Nel seguito viene fornita una descrizione della propagazione sonora in ambiente marino, seguita da una breve spiegazione delle metriche sonore e



della ponderazione dei risultati. Infine, sono descritte le caratteristiche ambientali considerate nello studio insieme alle ipotesi e alle considerazioni adottate.

In questo studio, le funzioni AcTUP (Acoustic Toolbox User Interface) sono state usate per la computazione del metodo di propagazione. A tal proposito è stata impiegata un'interfaccia grafica KeAcoustic per calcolare le funzioni di propagazione per tutte le batimetrie, al fine di ottenere i range e visualizzare i risultati. Ciò ha permesso di impiegare funzioni AcTUP e studiare tutti i transetti.

## 5.2 Percorsi di propagazione acustica subacquea

Secondo Dunn (2015), la propagazione acustica in mare può essere suddivisa in tre classi: a brevi distanze, in acque profonde e in acque basse.

Come descritto nella sezione precedente, la propagazione a breve distanza è conseguenza della distribuzione geometrica del suono. In assenza di ostacoli, il livello di pressione sonora generata da una sorgente precipita secondo la funzione  $1/r^2$  (dove  $r$  è il raggio dalla sorgente). Nel caso specifico, la sorgente sonora è ubicata in prossimità della superficie, pertanto in tale scenario si presentano i seguenti percorsi di propagazione principali: il percorso diretto e quello dovuto alla riflessione della superficie. L'interferenza tra questi due percorsi di propagazione determina le caratteristiche di distribuzione spaziale del suono. Questa distribuzione è conosciuta come modello "Lloyd's mirror" ed è riportata nella successiva Figura 6 (Dunn, 2015).

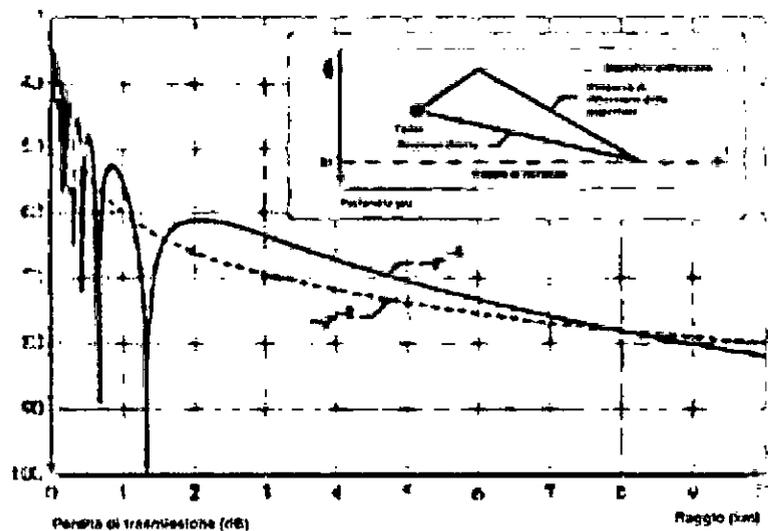


Figura 6  
Effetto "Lloyd's  
mirror"



Nel campo delle lunghe distanze, la velocità è un fattore chiave nella definizione del percorso di propagazione. La riflessione causata dalla stratificazione del suono nel mare segue la legge di Snell:

$$\frac{\cos \theta(z)}{c(z)} = \text{costante} \quad (1)$$

Dove  $c(z)$  rappresenta la velocità del suono a profondità  $z$  e  $\theta(z)$  è l'angolo di propagazione della sorgente sonora rispetto all'orizzontale.

La legge di Snell implica che il percorso di propagazione sonora si incurva verso strati di acqua caratterizzati da basse velocità sonore. Questa caratteristica è particolarmente importante laddove si ha una velocità sonora minima localizzata. Nel caso in cui si ha uno strato in profondità caratterizzato da basse velocità sonore, il suono si può propagare per migliaia di chilometri. Questo fenomeno di propagazione prende il nome di canale sonoro profondo ("deep sound channel").

Se consideriamo il fondale marino come una superficie piatta ideale, è possibile pensare che la massa d'acqua sia una guida d'onda acustica. Questo è maggiormente evidente nelle acque basse, dove vi sono poche centinaia di metri tra la superficie e il fondale. In questo caso, i percorsi radiali nel cono d'angolo critico di  $2\theta_c$  si propagano secondo una perdita di tipo cilindrico e il livello di pressione sonora diminuisce in base al rapporto  $1/\sqrt{r}$ .

### 5.3 Modelli di propagazione acustica subacquea

Vi sono diversi metodi numerici che possono rappresentare propagazione acustica subacquea. Questi metodi sono basati sui modelli fisici e matematici come, tra gli altri, la "ray theory", l'equazione parabolica e la "normal modes". Tuttavia, i vari modelli fisici e matematici hanno delle limitazioni nella loro applicabilità, che si manifestano come restrizioni del range di frequenza o nelle caratteristiche geometriche. Queste restrizioni limitano l'applicabilità di ciascun metodo.

Nell'ambito del presente studio è stata impiegata una metodologia che dipende dal range di frequenza. La dipendenza dal range di frequenza indica che alcune proprietà del mezzo possano variare in funzione della sezione e della profondità (2D) e in alcuni casi anche in funzione dell'azimut (3D).

Nello specifico sono stati impiegati due modelli differenti in base al range di frequenza. Per le basse frequenze è stato impiegato un modello di equazione parabolica, mentre per le alte frequenze è stato impiegato un modello gaussiano.



*Metodo di equazione parabolica (RAM)*

Per il range a bassa frequenza è stato impiegato il modello acustico *Range-dependent Acoustic Model* (RAM). Questo metodo si basa sulla soluzione Split-Step Padé che consente di modellizzare propagazioni di lungo raggio ed è uno degli algoritmi sviluppati più efficaci.

Lontano dalla sorgente, la pressione sonora soddisfa la seguente equazione parabolica:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial r^2} + \frac{\partial}{\partial z} \left( \frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k^2 p = 0. \quad (2)$$

Il metodo si basa sull'assunzione che l'energia in uscita domina l'energia riflessa (*backscattered*). Con questa assunzione si ottiene l'equazione dell'onda in uscita:

$$\frac{\partial p}{\partial r} = ik_0(1 + X)^{1/2} p, \quad (3)$$

dove

$$X = k_0^{-2} \left( \rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 - k_0^2 \right). \quad (4)$$

Il metodo RAM si basa sull'approssimazione della soluzione di questa equazione. In Collins (1995) è possibile trovare una descrizione accurata di questo metodo.

*Modello di tracciamento Gaussiano (BELLHOP)*

BELLHOP è un modello che permette di prevedere il campo di pressione acustica nell'ambiente marino. Tale modello si basa sull'applicazione della "ray theory" che applica la soluzione dell'onda piana all'equazione di Helmholtz e viene separata in termini reali e immaginari:

$$\nabla^2 \phi + k^2 \phi = 0 \quad (5)$$

Questa approssimazione può essere fatta solo se l'ampiezza varia più lentamente con la posizione rispetto alla fase (approssimazione acustica geometrica). In questo studio, l'approssimazione acustica geometrica stabilisce che la frequenza più bassa applicabile è:



$$f > 10 \frac{c}{H} \quad (6)$$

dove  $c$  è la velocità del suono e  $H$  è la profondità.

Con questa approssimazione, l'equazione di Helmholtz si riduce a:

$$[\nabla P]^2 = k^2 \quad (7)$$

che viene chiamata equazione *eikonale*.

Il metodo Bellhop è un modello gaussiano che associa a ciascun raggio un profilo di intensità gaussiana. Questa tecnica evita di tracciare i raggi di propagazione in modo artificioso. Ulteriori informazioni riguardo tale metodo e le relative applicazioni si possono trovare in Porter (2011).

Nel presente studio il punto più basso è stato considerato a circa 100 m. Ciò significa che la minima banda d'ottava di frequenza permessa per il modello di tracciamento gaussiano del raggio è di 125 Hz. Per semplificare, l'intero studio è stato effettuato usando il metodo Bellhop solo per le bande di frequenza a partire da 125 Hz.

## 5.4 Metodi di misura

---

### 5.4.1 Livello di pressione sonorav (SPL)

Il livello di pressione sonora o *sound pressure level* (SPL) è una misura algoritmica della pressione sonora relativa ad un valore di riferimento  $P_{ref}$ .

$$L_p = 20 \log_{10} \left( \frac{P}{P_{ref}} \right) \quad (8)$$

dove  $P$  è la pressione sonora in Pascal e  $P_{ref}$  è la pressione di riferimento.

Nell'acustica sottomarina,  $P_{ref} = 1 \mu Pa$ .

---

### 5.4.2 Livello di picco del suono

Il livello di picco del suono o *zero to peak sound level* è il valore massimo assoluto della pressione acustica istantanea di un impulso in un determinato periodo di tempo.

Quando l'impulso è caratterizzato da ampiezze d'onda positive e negative approssimativamente uguali, si parla di valore *peak to peak* che corrisponde al doppio del livello di picco oppure a un valore maggiore di 6dB.

$$L_{zero-peak} = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{peak}}{P_{ref}} \right) \quad (9)$$



#### 5.4.3 Livello di pressione acustica (RMS)

La radice quadratica media o root means squared (RMS) del livello di pressione acustica viene usata per caratterizzare un rumore generato da una sorgente continua. Il livello di pressione acustica in RMS corrisponde al livello di pressione quadratica media in un intervallo di tempo  $T$  e rappresenta la misura media del livello di pressione acustica in un intervallo di tempo.

Quando si è in presenza di un rumore transitorio, è necessario stabilire il periodo nel quale le misurazioni sono state rilevate, in quanto il valore RMS varia in considerazione della media temporale. Al contrario, quando il rumore è continuo, il periodo di tempo nel quale la misurazione viene effettuata non è più rilevante in quanto il valore in RMS fornirà lo stesso risultato.

$$L_{RMS} = 20 \log_{10} \left( \frac{P_{RMS}}{P_{ref}} \right). \quad (10)$$

Il range temporale considerato in base alla lunghezza d'onda e all'energia generata dagli air gun di progetto è:  $T = 0.5 \text{ s}$ .

#### 5.4.4 Livello di esposizione sonora (SEL)

Il livello di esposizione sonora o *sound exposure level* (SEL) viene usato per superare eventuali errori associati al periodo di tempo in cui il livello SPL è mediato. Il livello SEL è funzione dell'integrale nel tempo della pressione al quadrato rispetto alla pressione di riferimento al quadrato.

$$SEL = 10 \log_{10} \int_0^T \frac{p^2(t) dt}{P_{ref}^2}. \quad (11)$$

#### 5.4.5 Livello di esposizione sonora cumulativo

Il livello di esposizione sonora cumulativo derivante da eventi multipli può essere calcolato sommando i livelli di esposizione sonora associati ai singoli eventi.

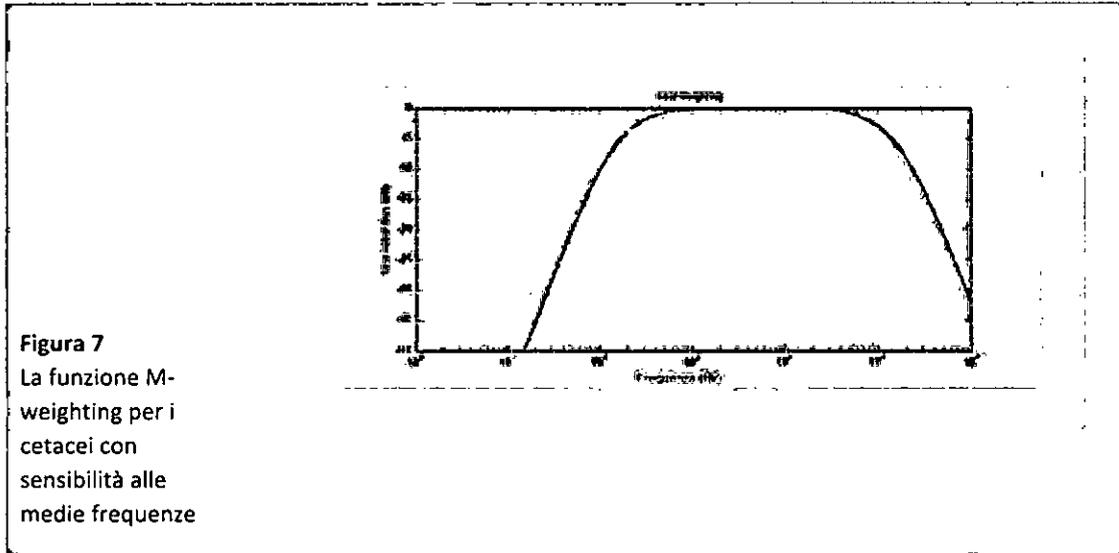
Il presente studio non considera il livello di esposizione sonora cumulativo.

#### 5.4.6 Analisi delle Frequenze per i mammiferi marini

È ben noto che i vari gruppi di mammiferi marini sono caratterizzati da differenti capacità uditive (Nedwell et al. 2007). Tra i cinque gruppi comunemente considerati, nell'area di indagine sono presenti gruppi di cetacei sensibili alle medie frequenze.



Miller e Southall (Southall & al.) hanno descritto i filtri M-weighting per considerare il diverso grado di sensibilità dei cinque gruppi. Con riferimento al caso specifico (cetacei sensibili alle medie frequenze) si considera la curva Mmf-wighted rappresentata nella Figura 7.



Applicando la funzione Mmf-weighting alla sorgente si ottiene la misura della distribuzione spettrale. Poichè il segnale della sorgente è principalmente concentrata in un range di frequenza molto basso, la misurazione ha un effetto significativo sulla distribuzione spettrale (Figura 8).

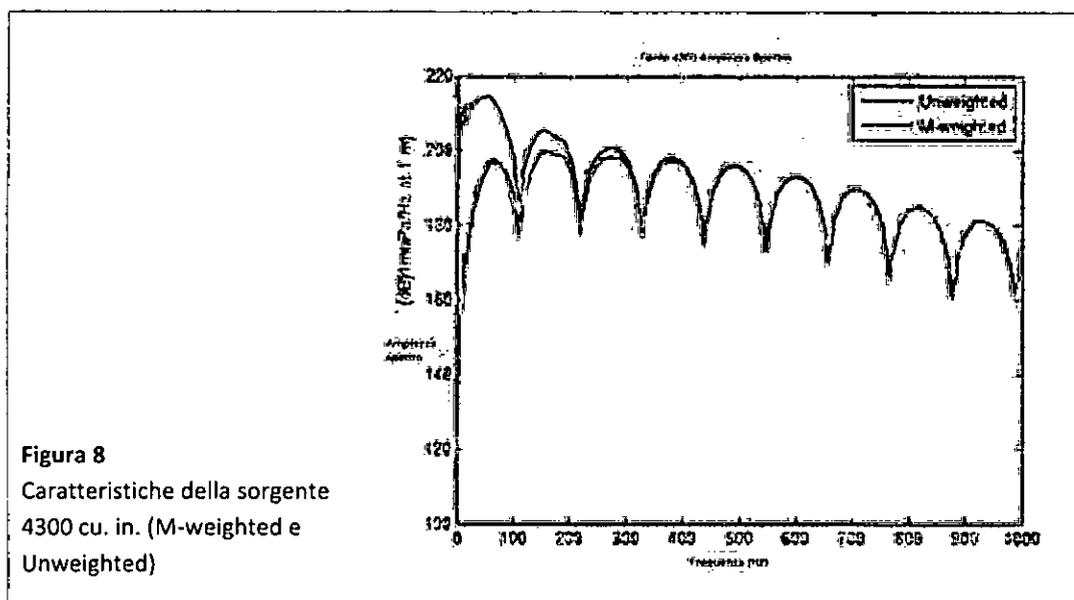
La Tabella 4 mostra i valori RMS in bande d'ottava rispetto alla sorgente sonora usata.

Sorgente Mmf-weighted 4300cu. in	
Frequenza centrale di 1-ottavo (Hz)	Livello di ampiezza spettrale (dB Mfm weighted)
16	191
31.5	207
63	219
125	222



250	224
500	224
1000	213

Tabella 4 Livelli della sorgente sonora RMS in bande di un ottavo con frequenza Mmf-weighting



### 5.5 Batimetria

In generale, gli studi della propagazione acustica sottomarina su lunghe distanze devono prendere in considerazione le variazioni dei profili batimetrici. In tal caso è necessario avere informazioni affidabili per ottenere risultati accurati.

Nel presente studio sono stati presi in considerazione i transetti ("tracciati") illustrati nella successiva Figura 9. La batimetria di ciascun transetto è stata ottenuta dalle Tavole Generali di Batimetria Oceanica (GEBCO). Questa Organizzazione internazionale è costituita da un gruppo di esperti che lavora sullo sviluppo di un set di dati batimetrici. Ciascun profilo batimetrico viene poi mappato (*geocontext*) a partire dai dati importati dal GPS.

L'area analizzata nel presente studio include una serie di transetti di diversi chilometri ognuno. Al fine di modellizzare la propagazione del rumore nell'area di indagine sono state scelte due diverse zone rappresentative. Una Zona B rappresentativa delle batimetrie caratterizzate da profili di profondità compresi tra 2000 e 3000 metri in cui ci si aspetta



che la propagazione del suono sia simile per tutta l'area. Una Zona A nella parte a sud-est dell'area di indagine, in prossimità della scarpata, caratterizzata da profili con profondità d'acqua decrescenti in direzione della costa. Pertanto, nell'ambito del presente studio sono state considerate due aree rappresentative, caratterizzate da diversi profili batimetrici. I profili delle due aree considerate sono illustrati graficamente nella Figura 9.

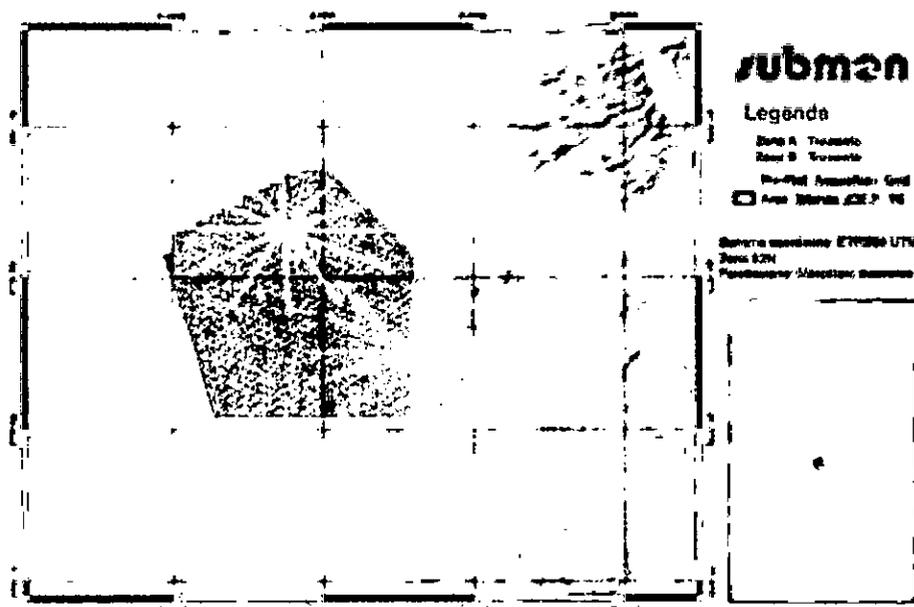


Figura 9  
Mappa dei  
profili (Zona A,  
profili A1-12;  
Zona B, profili  
B1-12).

I punti centrali delle Zone A e B sono ubicati in corrispondenza di rotte (linee sismiche) percorse dalla nave sismica durante le indagini. Le coordinate dei punti centrali delle zone A e B e il numero identificativo della linea sismica interessata sono riportati nella successiva Tabella 5.

Punto	Latitudine	Longitudine	Linea Sismica
A	40,49 N	7,6 O	1017
B	41,30 N	6,75 O	1026

Tabella 5 Coordinate dei punti centrali delle Zone A a B

A partire dal punto centrale (origine) sono stati definiti 12 transetti spazati di circa 30° e lunghi 60 km ognuno. In Figura 10 è illustrata la distribuzione dei transetti della Zona A. Le Figure 11 e 12 mostrano i profili batimetrici corrispondenti ai tracciati delle Zone A e B.

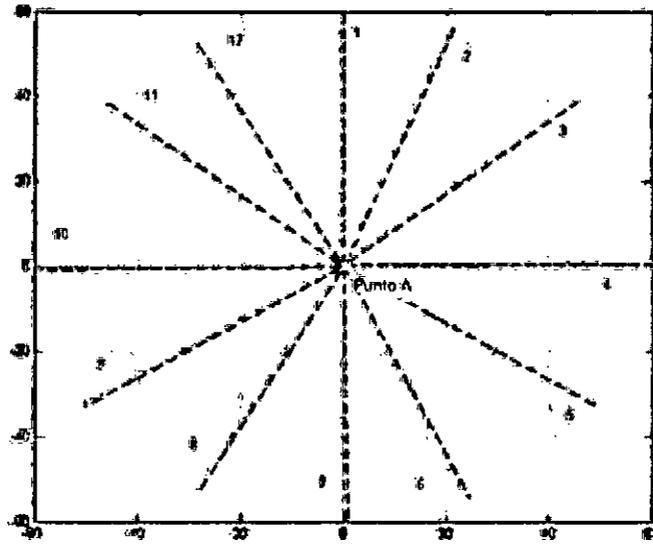


Figura 10  
Distribuzione  
dei transetti  
(Zona A)

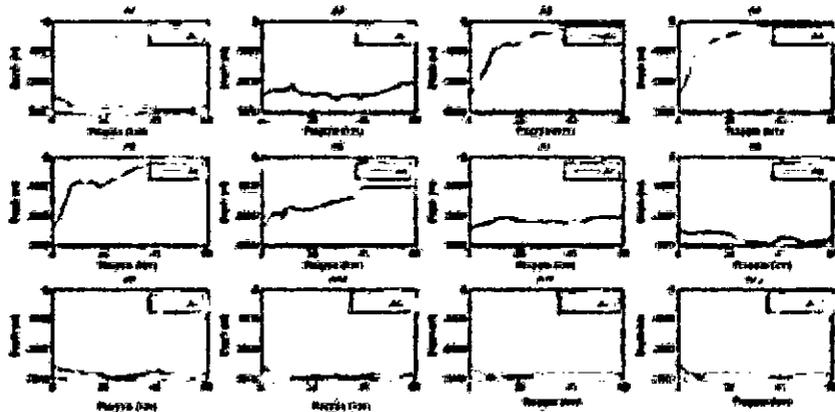


Figura 11 Profili  
batimetrici dei  
transetti della Zona  
A

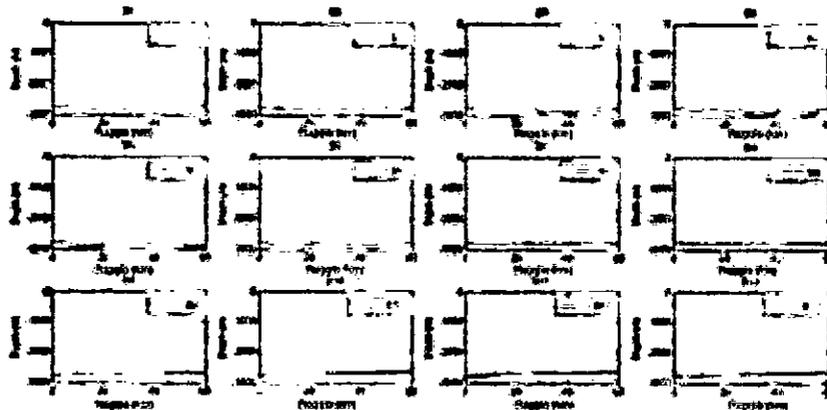


Figura 12 Profili batimetrici dei transetti della Zona B

### 5.6 Profilo di velocità del suono

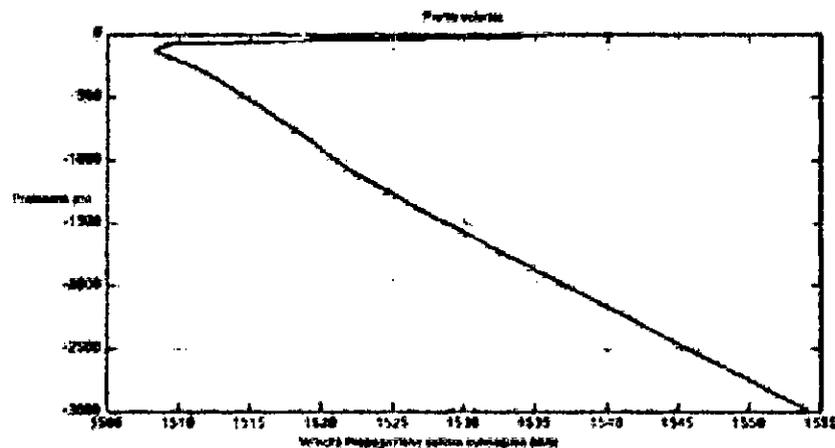
Il profilo di velocità del suono è stato considerato sulla base dei dati di temperatura  $T$  ( $^{\circ}C$ ), di profili di salinità  $S$  ( $psu$ ) e profondità  $D$  ( $m$ ) ottenuti dal National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) ([www.nodc.noaa.gov/OCS/SELECT/dbsearch/dbsearch.html](http://www.nodc.noaa.gov/OCS/SELECT/dbsearch/dbsearch.html)).

Per il caso in esame il profilo di velocità ottenuto dal punto A è stato usato per tutti i transetti, basandosi sulle note equazioni di Mackenzies (1981) riportate in Figura 9.

$$c = 1448,96 + 4,591 T - 5,304 \cdot 10^{-2} T^2 + 2,374 \cdot 10^{-4} T^3 + 1,340(S - 35) + 1,630 \cdot 10^{-2} \cdot D + 1,675 \cdot 10^{-7} D^2 - 1,025 \cdot 10^{-2} T(S - 35) - 7,139 \cdot 10^{-13} TD^2 \quad (12)$$



Figura 12  
Profilo di  
velocità del  
suono



Si evidenzia che i dati di salinità  $S$  e temperatura  $T$  forniti dal database sono disponibili fino alla profondità di 2,790 m. Per creare il profilo di velocità sonora alle profondità maggiori (fino a 3000m), si è proceduto ad un'interpolazione basata sulla pertinente bibliografia disponibile (Etter, 2013), (Urlick, 1967).

## 5.7 Proprietà dell'acqua

Com'è stato spiegato in precedenza, la propagazione acustica nell'acqua non può essere considerata come una diffusione geometrica ideale a causa di diversi fattori come il profilo di velocità, la riflessione sugli strati limite e la conversione dell'energia acustica in calore nel processo di assorbimento.

### 7.7.1 Superficie marina

In questo studio la superficie marina è stata considerata come uno strato piatto e liscio. Ciò significa che non si considera alcun attrito dovuto all'influenza del vento.

Equazioni che permettono una stima dell'altezza del livello del mare dovuta alla velocità del vento si trovano in Etter (2013). Nonostante ciò, poiché la condizione maggiormente conservativa è riferibile ad una superficie del mare piatta, nel presente modello non è stata considerata la condizione di superficie del mare mosso.

### 5.7.2 Assorbimento dell'acqua

L'assorbimento del suono nell'acqua di mare è causato dalla sua viscosità e all'assorbimento ionico dei sali disciolti in essa. Entrambi i processi contribuiscono alla perdita d'energia del segnale acustico. Si evidenzia che l'assorbimento è significativo solo ad alte frequenze e che per le frequenze interessate nel presente studio il valore è minore o uguale a 0.06 dB/km.

Pertanto, dopo aver condotto alcune simulazioni, nel presente studio è stato considerato un valore di assorbimento acustico dell'acqua non significativo per le basse frequenze.



Mezzo	Profondità (m)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Velocità del suono (m/s)
Acqua	Dipende dalla batimetria	1024	Profilo di velocità media

### 5.8 Caratteristiche del fondale marino

Il modello acustico subacqueo deve tenere in considerazione la natura geo-acustica del sito d'interesse. Nel presente studio è stato considerato un modello acustico a tre strati.

Acqua

Sedimento fluido (Fango)

Fondo fluido (Basalto)

Le proprietà fisiche di ciascuno strato sono descritte nella Tabella 6.

Mezzo	Profondità(m)	Densità (kg/m <sup>3</sup> )	Velocità di Propagazione dell'onda (m/s)	Coefficiente di Assorbimento dell'onda (dB/λ)
Fango	3	1500	1700	1
Basalto	Metà spazio	2700	5250	0.1

Tavola 6 Caratteristiche dei sedimenti

Lo strato del fondale considerato nel modello è costituito da basalto.

Entrambi i modelli applicati considerano il fondale come uno strato misto (senza rifrazione acustica).

Il sedimento è stato modellato come uno strato di fango spesso 3 metri in accordo con le istruzioni fornite dal cliente. Per stimare l'errore possibile associato a tale ipotesi, è stata creata una configurazione differente del fondale marino con uno strato di fango spesso 0m



e uno strato spesso 10m. I dettagli di questa analisi di sensitività sono riportati nell'ANNESSO A.

### 5.9 Rumore di fondo

Qualsiasi disturbo o rumore è un'alterazione dell'ambiente dove è già presente un rumore prima dell'attività. Il rumore sottomarino è multidimensionale e non è caratterizzato da aspetti misurabili singolarmente.

Il rumore di fondo o rumore ambientale è la somma del rumore derivato da fonti naturali più il rumore generato dall'attività umana. La sua origine deriva da fonti diverse come il vento (altezza dell'onda), pioggia, ghiaccio, vita marina, attività sismica, profondità dell'area, periodo dell'anno, trasporto, attività di dragaggio, trivellazioni e lavori civili, ecc.

Per poter effettuare una previsione acustica devono essere considerati diverse condizioni degli spettri di rumore ambientale. Queste curve possono essere riferite alle cosiddette curve di Wenz. In Figura 13, vengono riportate le curve di Wenz per diversi tipi di imbarcazione e velocità del vento (ottenute da Etter (2013)). Tipicamente, al di sotto dei 10 Hz domina il rumore naturale (terremoti, esplosioni ecc.); mentre al di sopra di poche centinaia di Hz lo stato del mare è la fonte dominante di rumore ambientale. Infine, nelle frequenze intermedie, è predominante il rumore delle imbarcazioni.

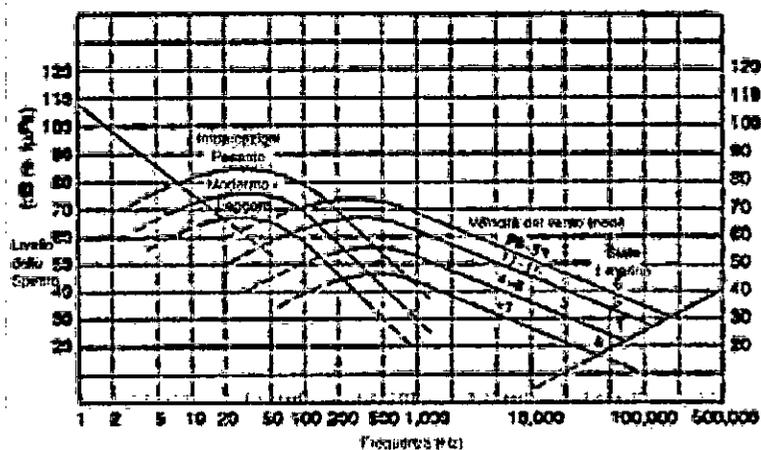
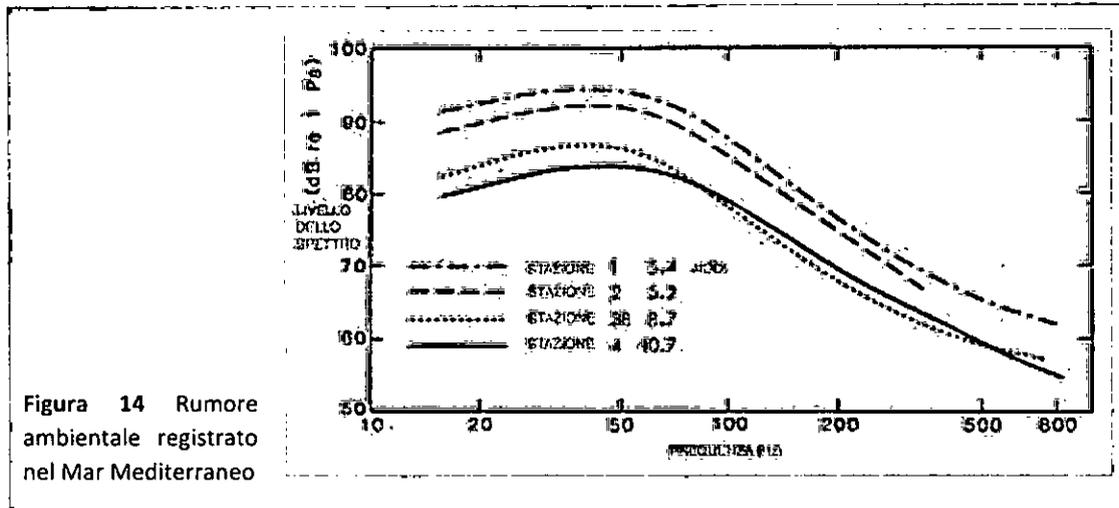


Figura 13  
Curva di Wenz  
nelle acque  
profonde

Riguardo la zona di interesse analizzata, il Mar Mediterraneo, in Urlick R. J. (1984) sono riportati i dati dei livelli di rumore ambientale registrati in quattro stazioni e fatta la media in un periodo di tre giorni. Le curve ottenute sono riportate in Figura 14: si può osservare che i dati si adattano abbastanza bene a quelli della figura precedente.



Il rumore prodotto dalle imbarcazioni e immesso nell'ambiente marino è definito come la "signature" della sorgente sonora ed è tipico di ciascuna imbarcazione e modalità di operazione. Si evidenzia tuttavia che, imbarcazioni con dimensioni, potenza, tipo di propulsore, velocità e modalità operativa simili hanno generalmente caratteristiche comparabili. Il mezzo navale "BGP Explorer" ha una lunghezza totale di 64 m e un peso lordo di circa 1,408 ton (Tm). Ha una potenza installata di 2 x 1294.5kW (circa 1,800 Hp) e una velocità di crociera di circa 11 nodi.

Il campo dell'acustica sottomarina, relativamente alla generazione di rumore dovuto alle imbarcazioni, è molto complesso e funzione del variare della sorgente, dei livelli di pressione acustica totale e delle frequenze. Sono da considerare infatti le armoniche generate dai motori e trasmesse allo scafo, i riduttori, le risonanze generate dai propulsori, il "lato" dove questi sono ubicati, gli effetti di cavitazione.

In pratica, la ricerca condotta sul livello del rumore proveniente da navi diverse è riconducibile ad un set di regole generali. Per quanto riguarda le imbarcazioni in transito, il rumore irraggiato nell'acqua dipende dalle dimensioni del mezzo navale, dalla sua velocità, dalla configurazione dei propulsori, dall'età, il tipo di motore, ecc.

Ross (2005) fornisce una formula per calcolare il livello di rumore da un mezzo navale approssimando la sorgente ad una distanza in m dallo scafo:

$$L_s = 134 + 60 \log (U_a/10 \text{ knots}) + 9 \log T_d$$

dove

- $L_s$  = livello totale del rumore della sorgente con banda d'onda misurata in dB re 1 $\mu$ Pa (da qui in poi dB)
- $U_a$  = velocità in nodi
- $T_d$  = tonnellate lorde o in Tm



Applicando questa formula alla nave "BGP Explorer" per una velocità di 4.5 nodi, il livello di rumore in banda d'onda è di 144 dB, valore congruente con la letteratura esistente riguardo a mezzi navali di queste dimensioni (Richardson et al., 1995; Bahtiarian M). Di seguito è riportato uno spettro comunemente applicato a navi in transito (Figura 15), in cui la distribuzione spettrale dell'impulso sonoro che si propaga nelle acque marine è messo in relazione ai range di frequenza (ottave o un terzi d'ottava).

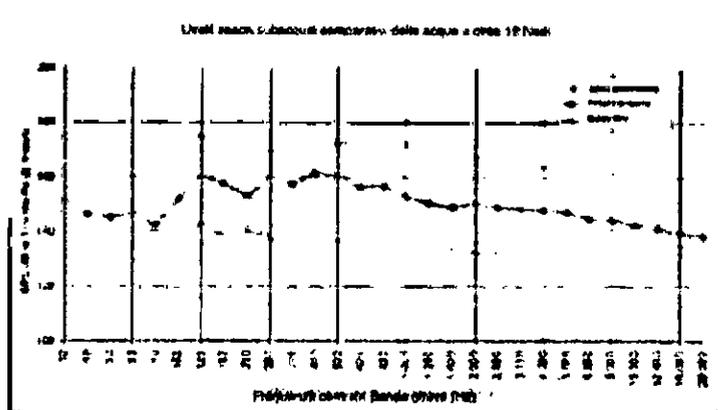


Figura 15  
Livelli sonori subacquei  
misurati sulle navi (Fonti:  
Bahtiarian M., NOAA  
Symposium).

Nel presente studio il livello di pressione sonora generato dagli impulsi dell'air gun è maggiore dei livelli di pressione sonora del rumore ambientale ottenuti dalla bibliografia, e di conseguenza, il risultato del modello non è influenzato dal fondo naturale.

Se si considera che il livello complessivo di pressione sonora dell'air gun per l'attività considerata è di 238dB RMS, e che il livello di pressione sonora delle imbarcazioni è stimato in 140dB, è chiaro che quest'ultimo non avrà un impatto sulle distanze individuate con il presente modello acustico.

## 6. Metodologia

La metodologia utilizzata nello studio per ottenere le potenziali distanze d'impatto per le specie marine a partire dalle sorgenti di rumore è schematizzata nel seguito:

- **La configurazione della sorgente è ottenuta dal software modellistico Gundalf.** Nel presente studio è stata considerata una sorgente che include 34 air gun. Lo spettro è stato calcolato in bande d'ottava in un range tra 10Hz a 1kHz (si veda la Tabella 3). Si assume che la direzione dell'air gun array sia omnidirezionale, e la sorgente di rumore è considerata puntiforme.
- **Sono state studiate due zone differenti.** Come descritto nella Sezione 4.5, data l'estensione dell'area di studio, non è possibile sviluppare un modello per l'intera



geometria. Considerando che la maggior parte dell'area è caratterizzata da batimetrie simili, sono state studiate solamente due zone. La Zona A è una zona ritenuta particolare in quanto rappresentativa dei rilievi sismici effettuati in prossimità della costa della Sardegna, dove le batimetrie sono differenti. La Zona B è caratterizzata dalle batimetrie tipiche dell'intera area.

- **E' stata calcolata la perdita di trasmissione per ciascuna batimetria.** Sono stati applicati due modelli di acustica sottomarina (RAM e BELLHOP) range-dipendenti al fine di ottenere la perdita di trasmissione in bande d'ottava lungo l'intero spettro di frequenza. L'esigenza di applicare entrambi i metodi deriva dal fatto che ognuno di essi è specifico per differenti range di frequenze. Il metodo RAM, basato su un'equazione parabolica, viene usato con riferimento a range di bassa frequenza, mentre il metodo BELLHOP, basato sul *ray tracking*, viene utilizzato per frequenze più elevate. La frequenza a partire dalla quale si applica il metodo BELLHOP viene calcolata tramite l'equazione 6 e varia in funzione della profondità della batimetria considerata.
- **Il Sound Pressure Level (SPL) per ciascuna batimetria viene ottenuto sottraendo la perdita di trasmissione dalla sorgente sonora.** Una volta ottenuto il valore di Sound Pressure Level e applicato il modello a tutte le batimetrie, è calcolato il Sound Pressure Level per diverse profondità del mare in funzione della distanza dalla sorgente. Nello studio le profondità considerate sono: 10, 50, 100 e 1500 metri. Al fine di stabilizzare i risultati e di ridurre l'eccessiva sensibilità del valore di SPL rispetto alle minime variazioni della batimetria, è stata applicata a ciascun grafico una funzione di *smoothing*.
- **Le grandezze acustiche complessive sono ottenute a partire dai contributi dalle bande centrali di frequenza.** Tre differenti grandezze (RMS, PEAK, SEL) sono calcolate per ciascuna profondità considerata. La spiegazione per ogni grandezza è presentata nella Sezione 4.4. Il valore RMS è stato calcolato utilizzando il modello di propagazione a bande d'ottava. Una volta ottenuti i valori della sorgente di rumore, questi vengono sottratti dalla perdita di trasmissione in ciascuna banda d'ottava di frequenza da 16 Hz a 1000 Hz. In conformità agli studi precedenti che validano l'accuratezza del seguente metodo con dati sperimentali, viene calcolata l'energia totale del suono a ogni range dalla sorgente, sommando l'energia in ogni banda d'ottava.
- **Viene calcolato il raggio di sicurezza per ogni valore di Sound Pressure Level.** Infine, viene calcolato il raggio di esposizione acustica per tutte le grandezze acustiche considerate e le profondità in ciascuna zona di interesse. In base a quanto definito nella Sezione 2, sono calcolati diversi raggi per: livelli RMS di 160 e 180 dB, livelli SEL di 215 e livelli Mmf-SEL di 183 e 198 dB, livelli di PEAK di 224 e 230 dB. I raggi ottenuti sono elencati nella Sezione 6. A partire da tutti i raggi ottenuti viene presentato il caso peggiorativo.



## 7. Risultati

È stato effettuato un insieme esaustivo di studi al fine di poter quantificare la sensitività del modello in relazione a specifici dati di input (si veda l'Allegato A). La sensitività del modello acustico sottomarino è sicuramente nota in termini di dati oceanografici, sia per quanto concerne il fondale marino ed il profilo batimetrico, sia per quanto concerne la velocità del suono nella colonna d'acqua. In questo caso, non è stata considerata la presenza della superficie marina in quanto potrebbe alterare le riflessioni prodotte nel cambio d'impedenza.

I dettagli dello studio di sensitività sono riportati nell'Allegato A.

Le distanze di sicurezza per le diverse distanze calcolate sono riportate di seguito (sezioni 6.1 e 6.2). Ci sono casi in cui non è stato ottenuto un valore in quanto il primo dato ottenuto nella simulazione (corrispondente al range di 10 metri) è inferiore al valore limite misurato.

D'altra parte, i valori ottenuti dai diversi livelli di PEAK, SEL e SEL M, sono relativi a limiti molto alti e sono ottenuti nella distanza dalla fonte diretta. Ciò significa che i raggi ottenuti per le diverse zone e batimetrie sono gli stessi nella maggior parte dei casi.



## 7.1 ZONA A – DISTANZE DI SICUREZZA

### 7.1.1 RMS

#### Range (160dB RMS) (m)

Transetto Punto A	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
A1	32795	25778	24820	24477
A2	22444	20955	19688	17831
A3	11946	11079	11354	6270
A4	10625	10181	10122	4920
A5	10750	10093	10038	4856
A6	21185	19070	17074	16613
A7	23519	22317	21596	19823
A8	26460	23925	21767	22881
A9	29157	27028	24205	24481
A10	30121	26996	26646	27632
A11	31300	28606	27027	26796
A12	31580	28667	26797	25181

#### Range (180dB RMS) (m)

Transetto Punto A	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
A1	440	470	599	652
A2	352	480	625	405
A3	324	487	626	416
A4	316	473	609	403
A5	316	473	600	398
A6	321	489	614	423
A7	349	484	617	427
A8	602	471	592	696
A9	416	470	606	553
A10	359	473	638	332
A11	356	474	650	493
A12	367	473	621	254



### 7.1.2 SEL

#### Range (215dB SEL) (m)

Transetto	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
Punto A				
A1	13	-	-	-
A2	13	-	-	-
A3	13	-	-	-
A4	13	-	-	-
A5	13	-	-	-
A6	13	-	-	-
A7	13	-	-	-
A8	13	-	-	-
A9	13	-	-	-
A10	13	-	-	-
A11	13	-	-	-
A12	13	-	-	-

### 7.1.3 PEAK

#### Range (230 PEAK) (m)

Transetto	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
Punto A				
A1	111	103	56	-
A2	110	103	53	-
A3	110	103	52	-
A4	110	103	54	-
A5	110	103	54	-
A6	110	103	52	-
A7	110	103	53	-
A8	111	103	55	-
A9	110	103	53	-
A10	110	103	51	-
A11	110	103	51	-
A12	110	103	52	-



**Range (224 PEAK) (m)**

Transetto Punto A	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
A1	194	212	205	12
A2	191	212	204	-
A3	190	212	204	-
A4	190	212	204	-
A5	190	212	204	-
A6	190	212	204	-
A7	191	212	204	-
A8	194	212	205	13
A9	191	212	204	-
A10	191	212	203	-
A11	191	212	203	-
A12	191	212	204	-

**7.1.4 SEL M**

**Range (183dB SEL) (m)**

Transetto Punto A	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
A1	168	201	162	-
A2	168	201	163	-
A3	168	201	161	-
A4	168	201	162	-
A5	168	201	162	-
A6	168	201	161	-
A7	168	201	162	-
A8	168	201	162	-
A9	168	201	162	-
A10	168	201	161	-
A11	168	201	161	-
A12	168	201	161	-



**Range (198dB SEL) (m)**

Transetto Punto A	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
A1	38	-	-	-
A2	38	-	-	-
A3	38	-	-	-
A4	38	-	-	-
A5	38	-	-	-
A6	38	-	-	-
A7	38	-	-	-
A8	38	-	-	-
A9	38	-	-	-
A10	38	-	-	-
A11	38	-	-	-
A12	38	-	-	-

**7.2 ZONE B – DISTANZE DI SICUREZZA**

**7.2.1 RMS**

**Range (160dB RMS) (m)**

Transetto Punto B	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
B1	26812	22710	21486	23455
B2	26992	22145	21878	23081
B3	26732	22633	21515	23485
B4	27772	21541	21757	22898
B5	27944	22209	22540	24083
B6	27155	22503	22625	23849
B7	27400	22233	22220	23092
B8	27852	23781	21941	22854
B9	28229	21001	21642	22813
B10	25331	23228	23884	23061
B11	28094	22907	21837	23382
B12	26806	22037	21924	23919



**Range (180dB RMS) (m)**

Transetto Punto B	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
B1	373	472	611	377
B2	373	472	606	382
B3	373	472	605	382
B4	373	472	605	382
B5	374	474	606	377
B6	373	473	609	377
B7	376	475	609	374
B8	370	474	609	361
B9	366	474	612	375
B10	371	475	614	356
B11	365	475	613	392
B12	373	475	610	376

**7.2.2 SEL**

**Range (215dB SEL) (m)**

Transetto Punto B	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
B1	13	-	-	-
B2	13	-	-	-
B3	13	-	-	-
B4	13	-	-	-
B5	13	-	-	-
B6	13	-	-	-
B7	13	-	-	-
B8	13	-	-	-
B9	13	-	-	-
B10	13	-	-	-
B11	13	-	-	-
B12	13	-	-	-



### 7.2.3 PEAK

#### Range (230 PEAK) (m)

Transetto Punto B	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
B1	111	103	52	-
B2	110	103	52	-
B3	110	103	52	-
B4	110	103	52	-
B5	110	103	52	-
B6	110	103	52	-
B7	110	103	52	-
B8	111	103	52	-
B9	110	103	52	-
B10	110	103	52	-
B11	110	103	52	-
B12	110	103	52	-

#### Range (224 PEAK) (m)

Transetto Punto B	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
B1	194	212	204	12
B2	191	212	204	-
B3	190	212	204	-
B4	190	212	204	-
B5	190	212	204	-
B6	190	212	204	-
B7	191	212	204	-
B8	194	212	204	13
B9	191	212	204	-
B10	191	212	204	-
B11	191	212	204	-
B12	191	212	204	-



### 7.2.4 SEL M

#### Range (183dB SEL) (m)

Transetto Punto B	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
B1	168	201	162	-
B2	168	201	163	-
B3	168	201	161	-
B4	168	201	162	-
B5	168	201	162	-
B6	168	201	161	-
B7	168	201	162	-
B8	168	201	162	-
B9	168	201	162	-
B10	168	201	161	-
B11	168	201	161	-
B12	168	201	161	-

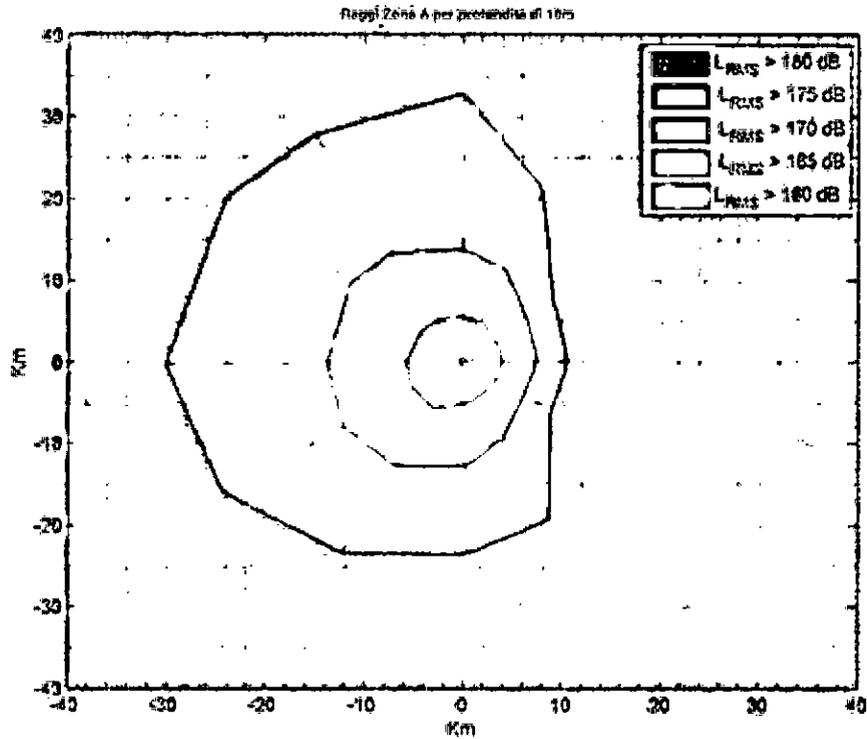
#### Range (198dB SEL) (m)

Transetto Punto B	Profondità (m)			
	10	50	100	1500
B1	38	-	-	-
B2	38	-	-	-
B3	38	-	-	-
B4	38	-	-	-
B5	38	-	-	-
B6	38	-	-	-
B7	38	-	-	-
B8	38	-	-	-
B9	38	-	-	-
B10	38	-	-	-
B11	38	-	-	-
B12	38	-	-	-



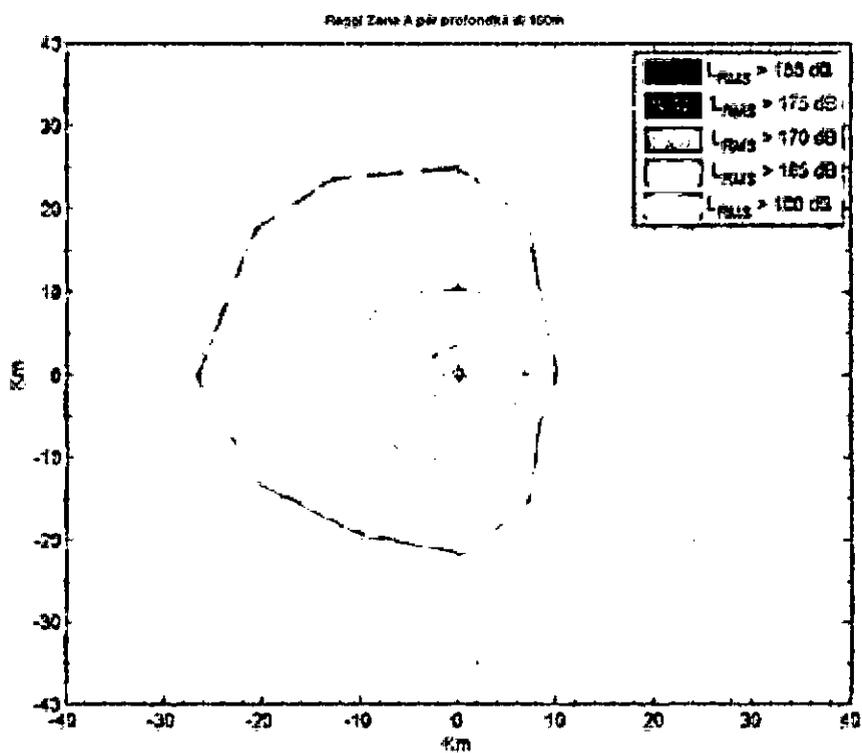
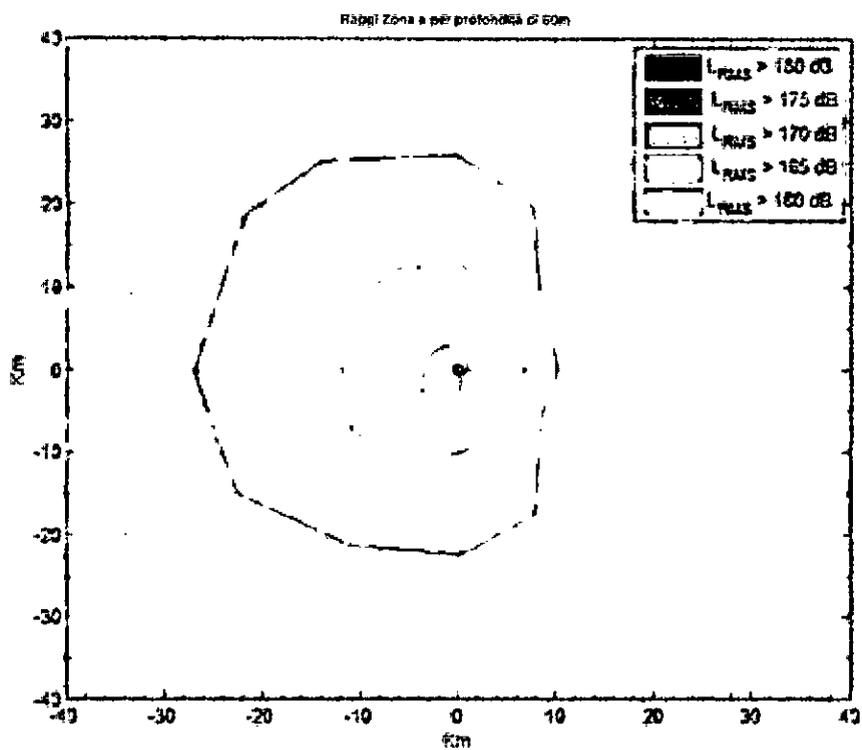
I grafici 2D dei range ottenuti per ciascuna zona per i valori limite RMS sono riportati di seguito. Inoltre nella Tabella 5 è riportata una sintesi dei range ottenuti nel modello, relativi all'Exposure Limit stabilito nella Sezione 2.

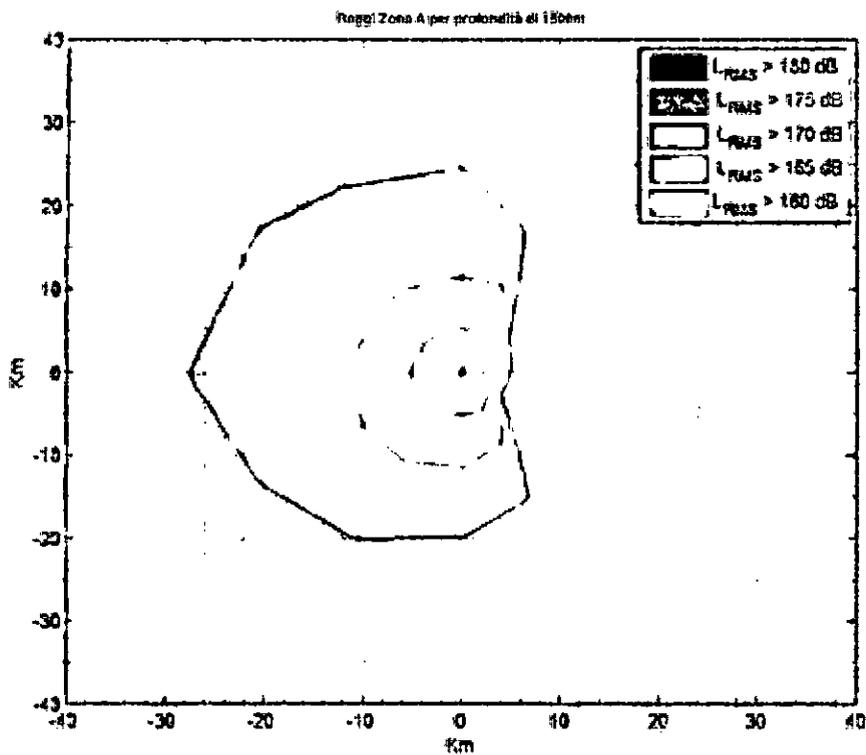
### 7.3 Zona A- GRAFICI 2D



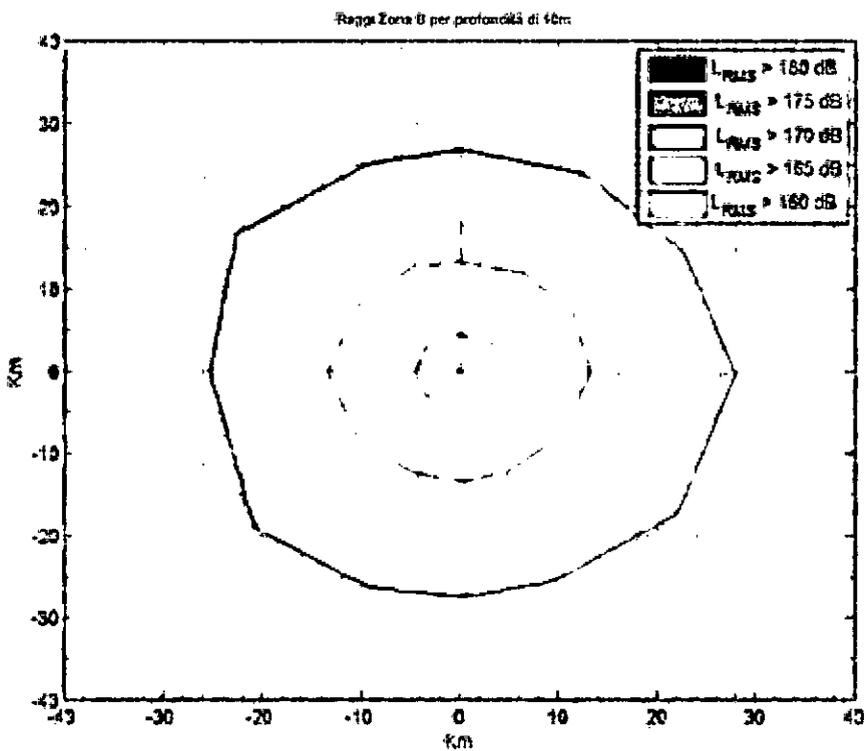


Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellazione del rumore sottomarino



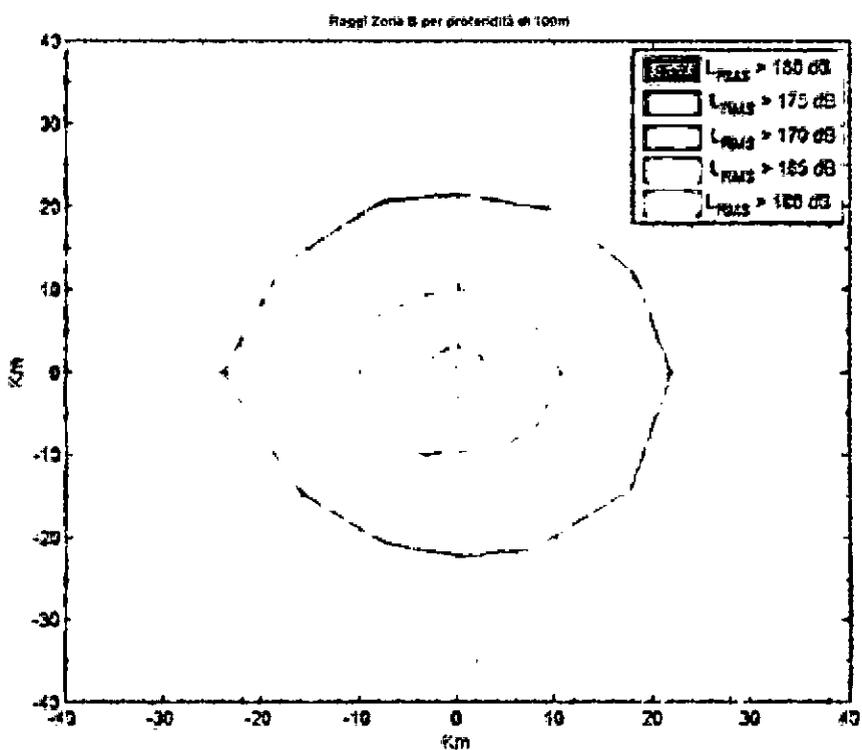
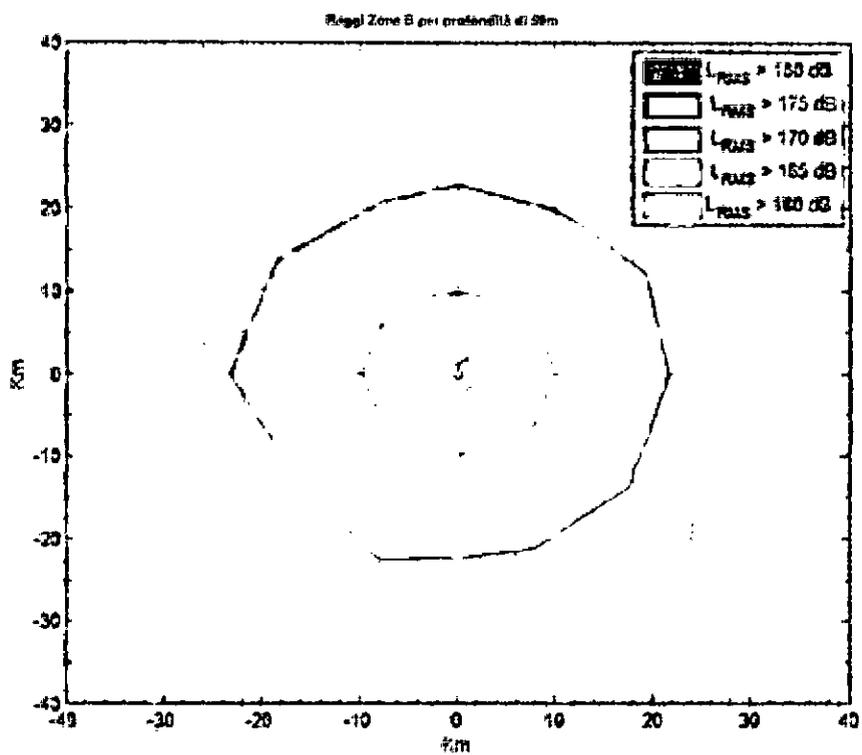


#### 7.4 Zona B-GRAFICI 2D



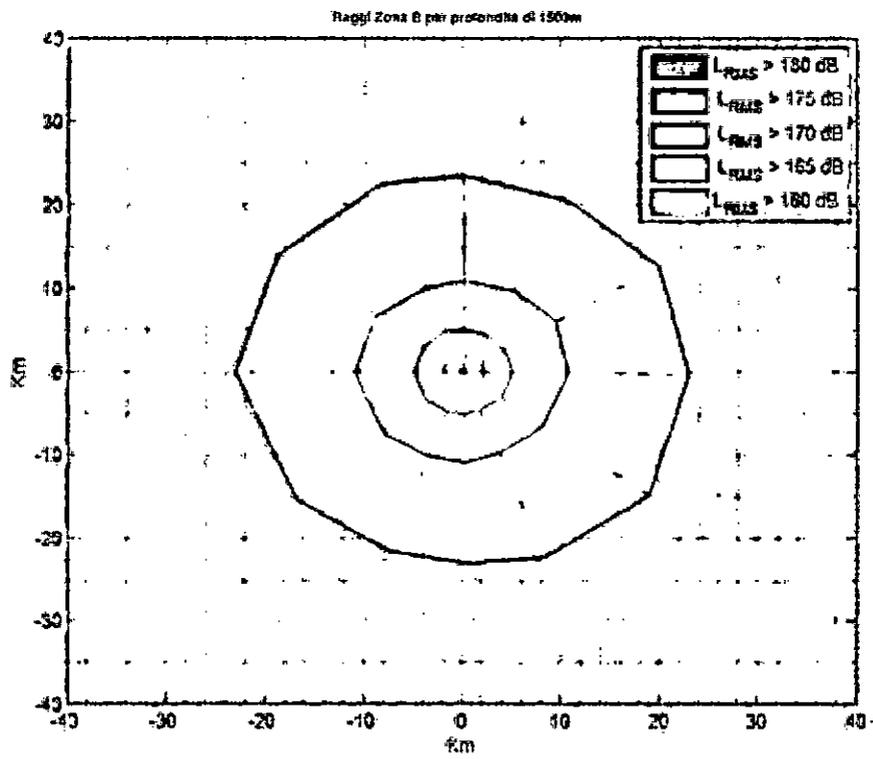


Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellizzazione del rumore sottomarino





Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellizzazione del rumore sottomarino





EXPOSURE LIMIT	PROFONDITÀ (M)	EFFETTI	ZONA	RANGE (metri)
230dB re $\mu$ 1 Pa (Peak)	10	PTS (Southall et al, 2007)	ZONA A	111
	50			103
	100			56
	1500			-
230dB re $\mu$ 1 Pa (Peak)	10	PTS (Southall et al, 2007)	ZONA B	110
	50			103
	100			52
	1500			-
224dB re 1 $\mu$ Pa (Peak)	10	TTS (Southall et al, 2007)	ZONA A	194
	50			212
	100			205
	1500			13
224dB re 1 $\mu$ Pa (Peak)	10	TTS (Southall et al, 2007)	ZONA B	191
	50			213
	100			204
	1500			-
215dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s (SEL)	10	PTS (NOAA 2006)	ZONA A	13
	50			-
	100			-
	1500			-
215dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s (SEL)	10	PTS (NOAA 2006)	ZONA B	13
	50			-
	100			-
	1500			-
180dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10	TTS (NOAA, 2006)	ZONA A	602
	50			489
	100			650
	1500			696
180dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10	TTS (NOAA, 2006)	ZONA B	376
	50			475
	100			612
	1500			382
183dB re 1 $\mu$ Pa (SEL) M-Weighted CETACEI MF (FREQUENZA MEDIA)	10	TTS (Southall et al, 2007)	ZONA A e ZONA B	168
	50			201
	100			163
	1500			-
198dB re 1 $\mu$ Pa <sup>2</sup> s (SEL) M-Weighted CETACEI MF (FREQUENZA MEDIA)	10	PTS Southall et al, 2007)	ZONA A e ZONA B	38
	50			-
	100			-
	1500			-
160dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10	CAMBIAMENTI COMPORIMENTALI (NMFS)	ZONA A	32,795
	50			28,667
	100			27,027
	1500			27,632
160dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10	CAMBIAMENTI COMPORIMENTALI (NMFS)	ZONA A*	11,946
	50			11,079
	100			11,354
	1500			6,270
160dB re 1 $\mu$ Pa (RMS)	10	CAMBIAMENTI COMPORIMENTALI (NMFS)	ZONA B	28,229
	50			23,781
	100			23,884
	1500			24,083

\* Batimetrie Basse Dalla Zona A

### Tavola 5 Sintesi dei range ottenuti



## 8. Sommario e conclusioni

Dall'analisi dei risultati è possibile concludere che:

- Con riferimento al Livello di Pressione Sonora zero to peak della sorgente (array) di 260 dB re: 1  $\mu$ Pa @ 1 m, il modello indica che il limite di danno uditivo (PTS) riportato da Southall et al. (2007) per i cetacei si raggiunge per singolo impulso (valore di picco) e per l'intera area indagata entro un raggio di 111m. Il valore riferito al valore di picco TTS si estende per 213 m dalla sorgente.
- La distanza prevista per il danno uditivo (PTS), come indicata dal criterio M-waiting proposta da Southall et al. (2007), non supera i 38 m. Tale distanza risulta prossima alla sorgente e pertanto risulta improbabile che venga raggiunto il livello sonoro effettivo.
- Basandosi sui criteri M-Weighted SEL proposti da Southall et al. (2007), i dati indicano che l'inizio dell'esposizione a livelli di rumore pari al TTS per i cetacei sensibili alle medie frequenze (Mmf) si verifica ad un raggio di 201 m dalla sorgente.
- I range per cui sono raggiunti i valori di SEL, PEAK, SEL\_M e RMS=180dB sono dovuti al campo diretto della sorgente con minima influenza delle riflessioni. Quindi, i range ottenuti sono molto piccoli e l'influenza della batimetria è minima. In questo caso, la differenza tra batimetrie alte e batimetrie basse nella Zona A non è apprezzabile.
- **Basandosi sui livelli di rumore (TTS) forniti da NOAA (2006), i dati indicano che il valore del rumore si ottiene in un'area di raggio pari a 696 m nella Zona A e 612 m nella Zona B.**
- La maggior parte dell'area di studio mostra batimetrie piatte tra 2500 e 3000 metri di profondità. In questo caso, i livelli di rumore di 160dB RMS correlati con i cambiamenti comportamentali dei mammiferi marini (NMFS 1985) sono raggiunti attorno ai 30 km. Tuttavia, le batimetrie nella Zona A vicino alla Sardegna, che mostrano una pendenza (scarpata), hanno raggi di circa 10 km (vedi Zona A\* nella Tavola 5).
- A causa della mancanza di informazioni di dettaglio sulla tipologia di fondale marino, è stato studiato il caso peggiorativo. E' stata comunque applicata un'analisi di sensitività per il valore di 160dB RMS (si veda Sezione 8 – Annesso A). Come prevedibile, la simulazione numerica senza strato di sedimenti fangosi mostra raggi molto più ampi per tutte le profondità rispetto a quelle che hanno uno strato fangoso più spesso, in quanto l'assorbimento acustico si traduce in una maggiore riduzione delle onde acustiche, e quindi livelli più bassi. **Si prevede che, considerando nel modello uno spessore reale del fondale (strato fangoso), le distanze relative ai limiti d'esposizione di 160 dB RMS si riducano rispetto al caso peggiorativo.**
- **Se si considera il raggio massimo nel quale è presente la soglia di danno permanente o temporaneo (perdita d'udito), anche considerando i limiti più conservativi (NOAA 2006), esso non eccederà i 700 metri in nessuna parte dell'area di studio (Figura 1).**
- **Si propone di stabilire una Zona di Esclusione di 700 metri, il che eviterebbe, come evidenziato dal modello, di non superare il livello di 180 dB al di fuori di quest'area.**
- Nella simulazione effettuata non sono stati osservati canali di trasmissione alle lunghe distanze (channeling) in nessuna delle bande di frequenza considerate. Invece, la rifrazione acustica del fondale marino e della superficie marina possono influenzare



significativamente la perdita di trasmissione e, quindi, i range ottenuti per ciascuna profondità.

- Nel caso delle tartarughe, poiché i livelli di rumore da considerare/evitare sono al di sopra dei livelli considerati per i cetacei, la distanza di sicurezza ricade in quella già definita (vedere Tavola 1, Sommario dei criteri d'impatto).



## 9. ANNESSO A

### 9.1 Analisi della sensitività

Lo strato di sedimento fluido considerato è stato modellizzato come uno strato di fango di spessore pari a 3 metri. Al fine di stimare la sensitività associata a questo parametro, di fondamentale importanza nella stima della propagazione del rumore sottomarino, è stato effettuato uno specifico studio di sensitività.

Sono stati considerati due transetti rappresentativi dell'area d'indagine in corrispondenza della Zona A, denominati A5 e A9. La Figura A.1 mostra il profilo batimetrico di entrambi. In particolare il transetto 9 rappresenta un'area piana con una profondità pari a circa 2500 metri.

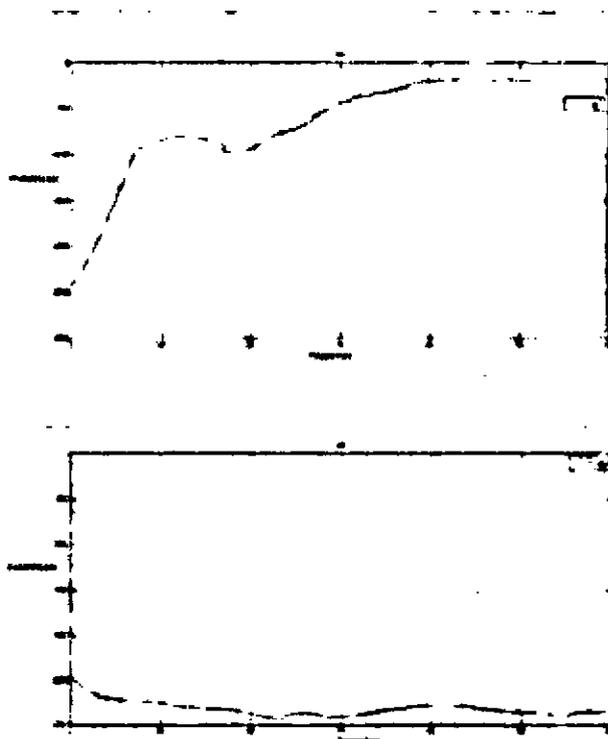


Figura A.1: Profili batimetrici dei traccati A5 e A9

Sono stati considerati tre diversi strati di fango per ciascun transetto: 0, 3 e 10 m. La Figura A.2 mostra i range relativi al transetto A9 considerando un valore limite di 160dB RMS, per le quattro profondità considerate nello studio: 1, 50, 100 e 1000 m. Come previsto, si evidenzia che le simulazioni numeriche in assenza di uno strato sedimentario fangoso mostrano range più elevati per tutte le profondità. Allo stesso modo, considerando uno strato di fango di spessore pari a 10 m, l'assorbimento acustico associato si traduce in una maggiore riduzione delle onde acustiche, e, quindi, range minori.



Quindi si può evidenziare che i range ottenuti nello studio di sensitività sono maggiori rispetto ai range finali. Questo è dovuto alla generazione di lievi fenomeni di *rebounds* attorno ai 160 dB che possono far variare il range di decine di km (si veda la Figura A.3). Poichè tali fenomeni di *rebounds* sono molto sensibili a piccole variazioni geometriche, è stata applicata una funzione di *smoothing* ai risultati finali.

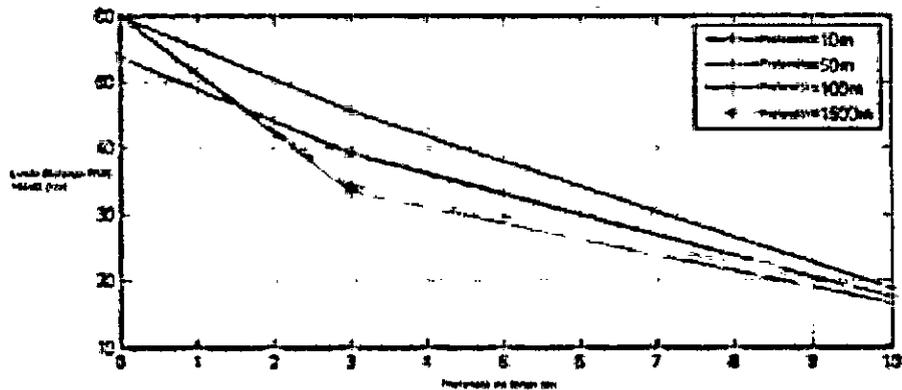


Figura A.2 Distanza dalla sorgente A, relativa al transetto A9, dove il valore RMS totale è 160 dB. Si noti che i valori di 60 km sono valori minimi (per i transetti relativi al punto A, si riscontrano a queste profondità valori di RMS=160dB a distanze maggiori di 60 km).

La Tabella A1 mostra i range per ciascun transetto e le profondità associate allo spessore dello strato di depositi fangosi. Il comportamento identificato nel transetto 9 si ripete nel transetto 5, dove si nota un cambiamento drastico nei range dovuto a questo parametro.

La Figura A.3 mostra l'andamento del valore RMS, in funzione della distanza lungo il transetto 5. L'effetto dello strato di fango è fondamentalmente prodotto da una specifica distanza (1000 m), dove le onde acustiche sono state già in grado di interagire con il fondale e di ritornare in superficie, generando le corrispondenti interferenze.

		T. A5 Range (160dB RMS) (m)			T. A9 Range (160dB RMS) (m)		
		Profondità del fango(m)			Profondità del fango (m)		
		0m	3m	10m	0m	3m	10m
Profondità (m)	10	18456	11142	8769	59974	45533	18787
	50	14646	9932	8182	59969	33472	16616
	100	14698	10304	8479	53758	39335	17469
	1500	--	--	--	59972	34269	17805

TABELLA A.1: Range relativi a 160 dB RMS per i transetti A5 e A9 in funzione della



profondità e dello spessore dello strato di fango.

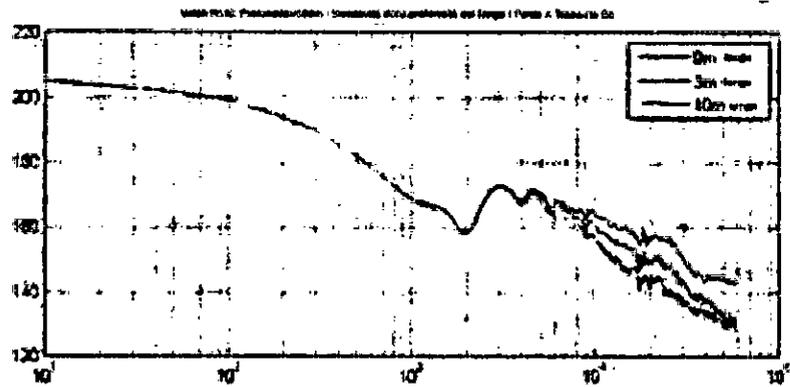


Figura A.3: Andamento del valore RMS totale per il transetto 5 in funzione della distanza (0-60km), per i tre spessori di fango considerati: 0, 3 e 10m. Si evidenzia come il range tra i 20 e i 60 km presenti dei picchi che influiscono sulla sensibilità del valore finale nel range. Questo effetto si attenua applicando la funzione di *smoothing*.



## 10. ANNESSO B - GRAFICI

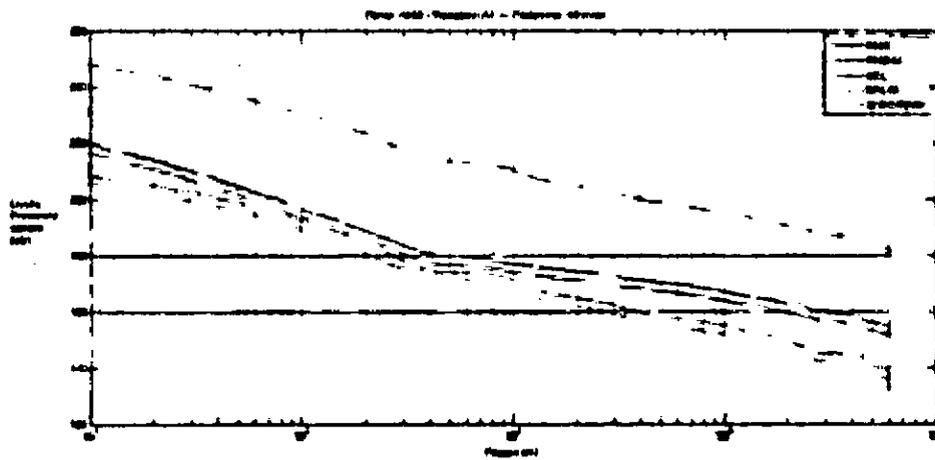
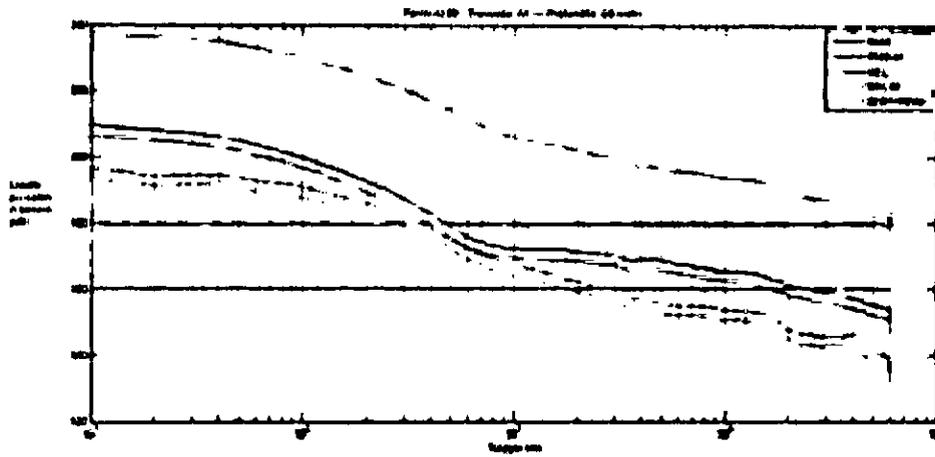
Il presente allegato descrive alcuni dei grafici ottenuti in ciascuna zona di studio come descritto nella sezione dedicata alla metodologia. Sono rappresentate in particolare due batimetrie differenti per la Zona A (una superficiale ed una profonda) ed una batimetria tipica della Zona B.

Nei grafici è riportato l'andamento in funzione della distanza dalla sorgente per tutti i diversi indici calcolati, in particolare: RMS, RMS con fattore di conversione M-weighting, SEL, SEL con fattore di conversione M-weighting e Zero Peak. Tutti gli indici sono rappresentati alle seguenti profondità: 10, 50, 100 e 1500 m. In ogni grafico sono rappresentate due linee che corrispondono ai limiti di 160 dB e 180dB.



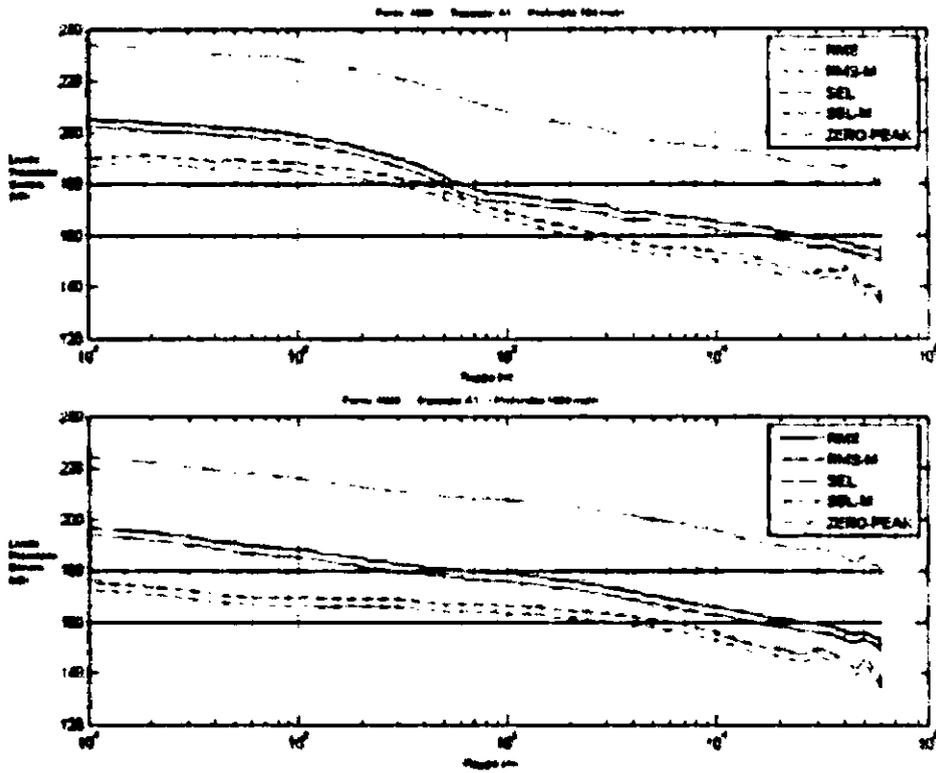
## 10.1 ZONA A

### 10.1.1 A1

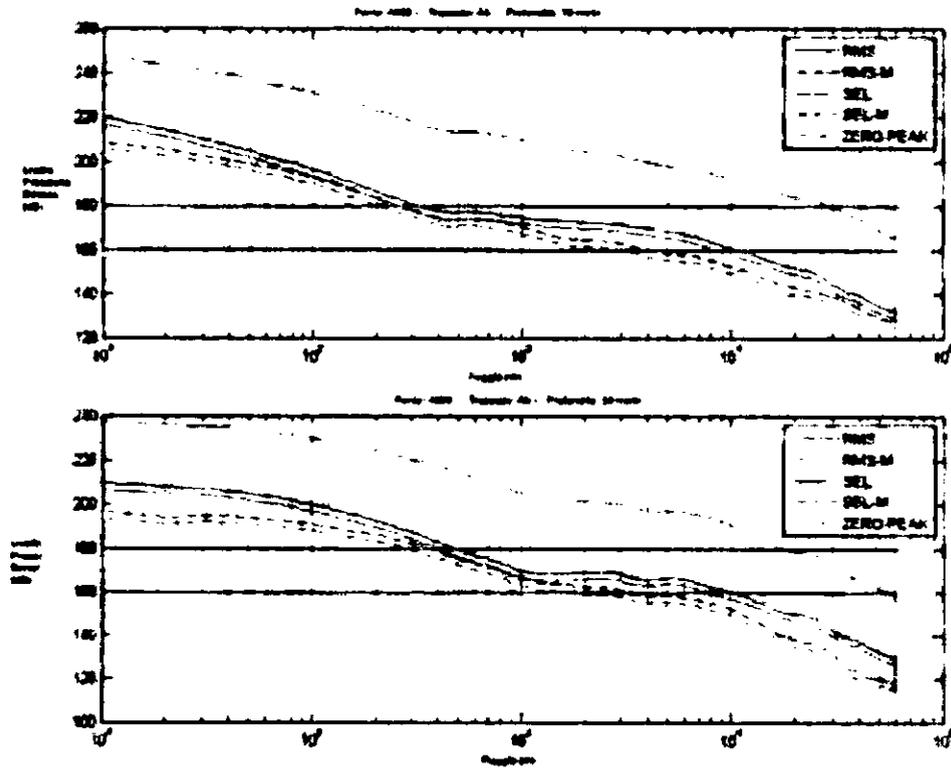


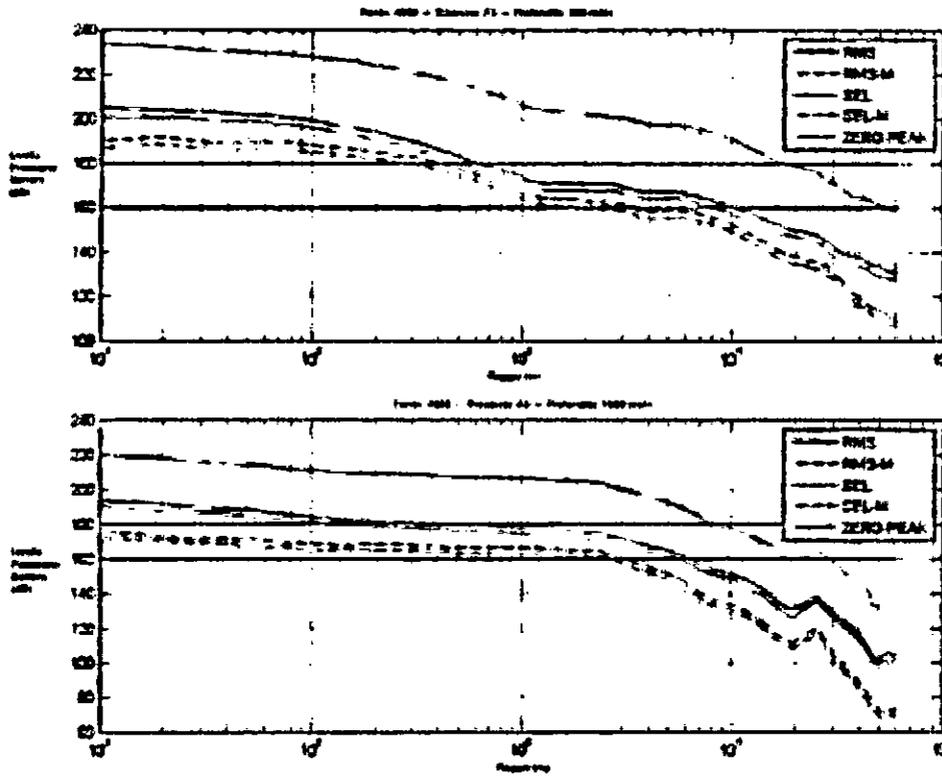


Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellazione del rumore sottomarino



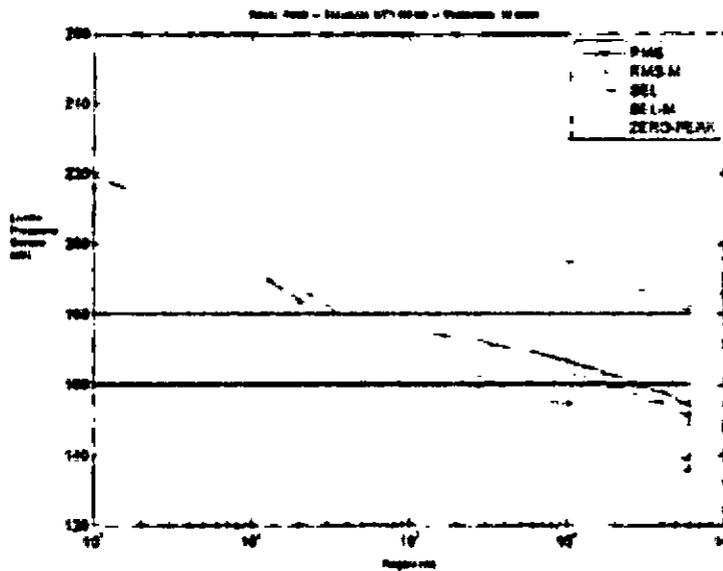
10.1.2 A5





### 10.2 ZONA B

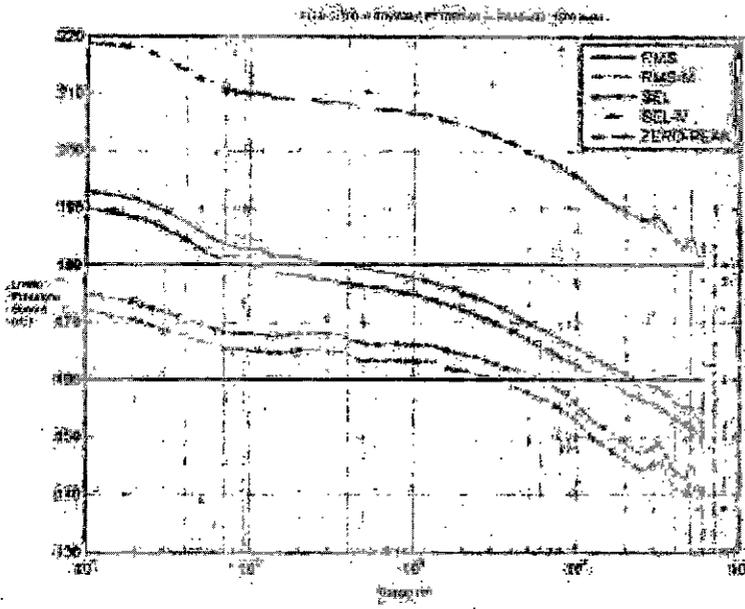
#### 10.2.1 BT1





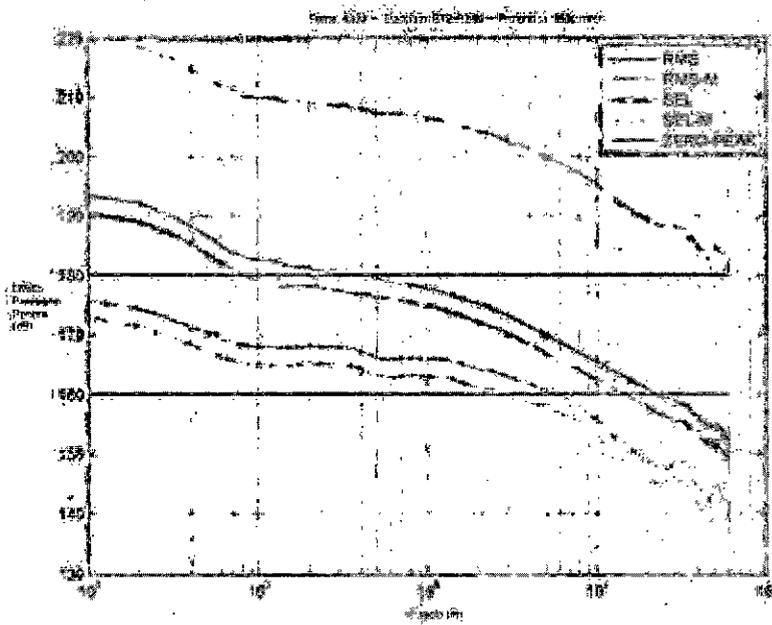
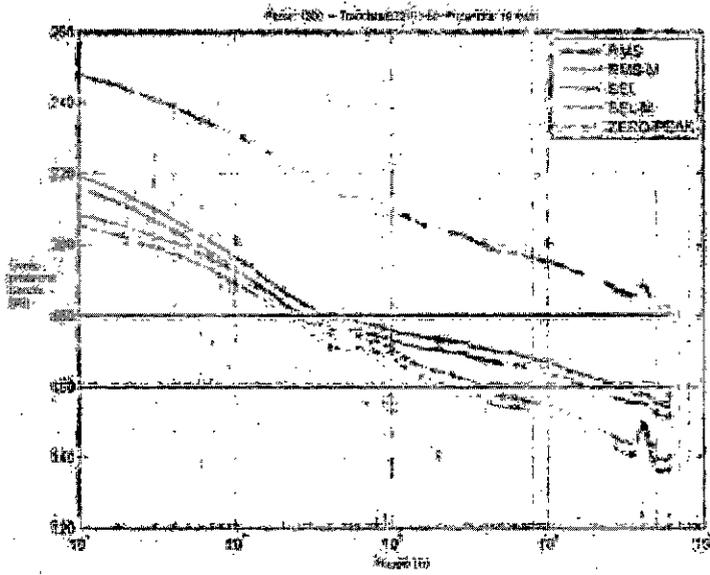


Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellazione del rumore sottomarino



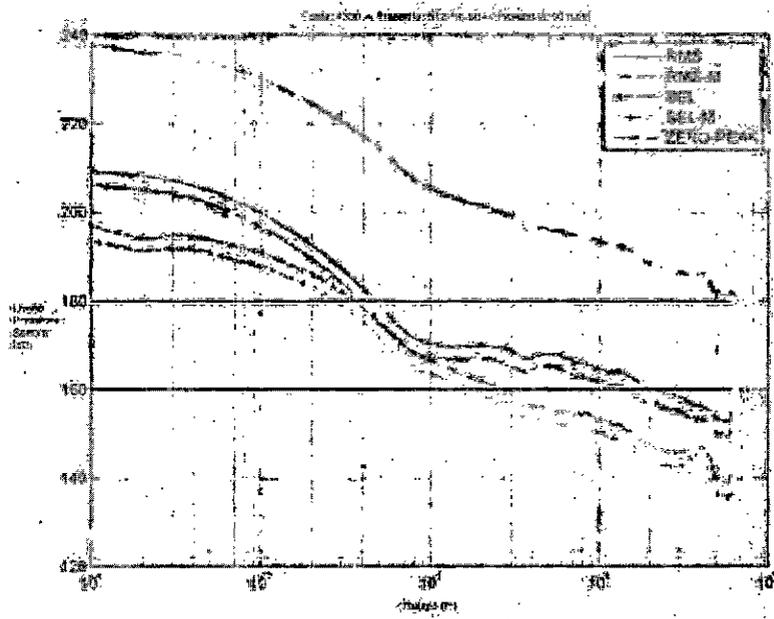
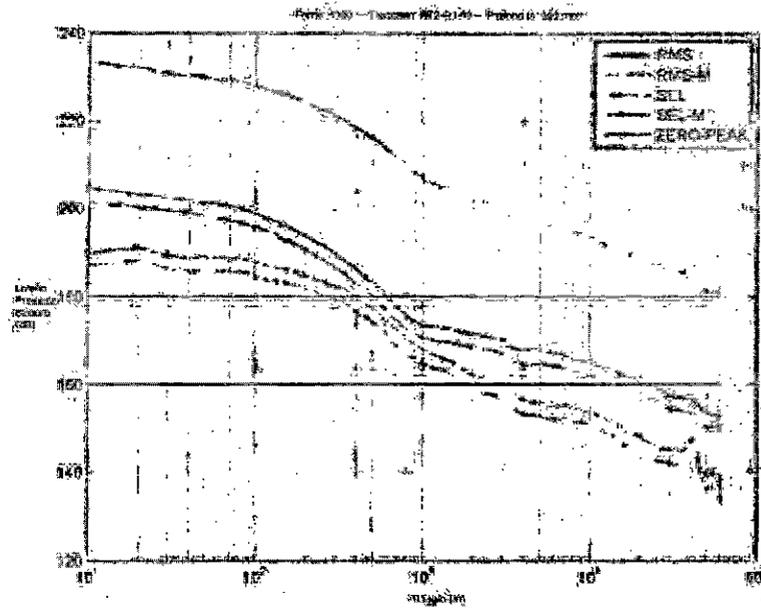


10.2.2 BT2



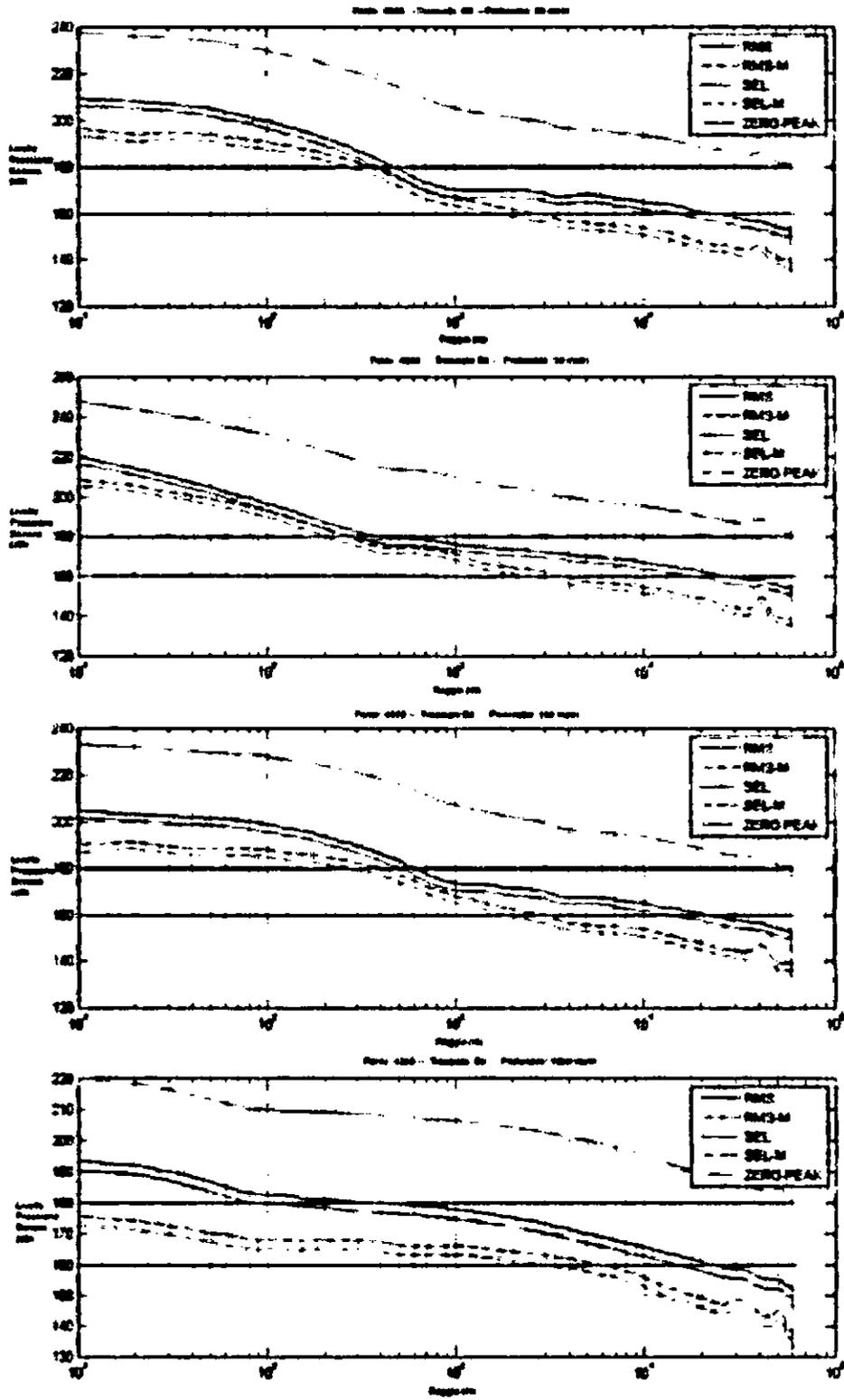


Indagine geofisica 2D al largo della costa Nord-occidentale della Sardegna  
Modellizzazione del rumore sottomarino





10.2.3 BT3





## 11. Bibliografia

- Carolyn J.S y Mark L.T. (2006). The effects of seismic airguns on cetaceans in UK waters. *J. Cetacean Res. Manage.* 8(3):255–263
- Castellote M., Christopher W. Clark , Lammers M.O (2012) Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biological Conservation* 147 (2012) 115–122
- Clark C.W., y Charif R.A. (1998). Acoustic monitoring of large whales to the west of Britain and Ireland using bottom-mounted hydrophone arrays, October 1996 September 1997. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough.
- Collins, M. D. (1995). Users guide for RAM versions 1.0 and 1.0p. Naval Research Lab, Washington DC .
- DeRuitter S.L. and K.L. Doukara. 2010. Loggerhead turtles dive in response to airgun sound exposure. *J. Acoust. Soc. Am.* 127(3):1726.
- Diederichs, A., G. Nehls, M. Dähne, S. Adler, S. Koschinski, U. Verfuß. (2008). for measuring and assessing potential changes in marine mammal behaviour, abundance or distribution arising from the construction, operation and decommissioning of offshore windfarms. BioConsult SH report to COWRIE Ltd.
- Dunn, F. e. (2015). Handbook of acoustics. Ed. Thomas Rossing. Springer.
- Etter, P. C. (2013). Underwater acoustic modeling and simulation . CRC Press.
- GEBCO. (n.d.). Retrieved June 2015, from [www.gebco.net](http://www.gebco.net)
- geocontext. (n.d.). Retrieved June 2015, from [www.geocontext.org](http://www.geocontext.org)
- Goold J.C. (1996). Acoustic assessment of populations of common dolphin (*Delphinus delphis*) in conjunction with seismic surveying. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom.* 76:811-820
- Gordon J., Gillespie D., Potter, J., Frantzis A., Simmonds M., Swift R. y Thompson D. (2003): The effects of seismic surveys on marine mammals. *Marine Technology Society Journal*, 37, 16-34.
- IWC (International Whaling Commission). 2007. Report of the scientific committee. Annex K. Report of the Standing Working Group on environmental concerns. *J. Cetacean Res. Manag.* 9 (Suppl.): 227–296. J.J,
- Finneran and Dear R. , Carder S.H, Ridgway D.A Schlundt C.E. Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun. *J. Acoust. Soc. Amer.* 111: 2929-2940, 2002.
- J.R. Nedwell, A.W.H. Turnpenny, J. Lovell, S.J. Parvin, R. Workman, J.A.L. Spinks & D. Howell (2007). A validation of the dBht as a measure of the behavioural and auditory effects of underwater noise. Subacoustech Report No. 534R1231. Department of Business, Enterprise and Regulatory Reform under Project No. RDCZ/011/0004.



- Laws, R., Hatton, L., & Haarsten, M. (1990). Computer modelling of clustered airguns. *First Break*, 8.9.
- Mackenzies, K. V. (1981). Nine - term equation for sound speed in the oceans. *The journal of the acoustical society of america*, 807-812.
- McCauly R. D., Fewtrell J., Duncan A. J., Jenner C., Jenner M. N., Penrose J. D., Prince, R. I. T., Adhitya A., Murdoch J y McCabe K. (2002). Marine seismic surveys, analysis of propagation of air-gun signals and effects of air-gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Informe para la Australian Petroleum Production Exploration Association.
- Nachtigall P.E., Supin A.Y., Pawloski J., Au W.W.L., 2003. Temporary threshold shifts after noise exposure in the bottlenose dolphin (*Tursiops truncatus*) measured using evoked auditory potentials. *Marine Mammal Science* 20(4): 673-687.
- NMFS. (1995). Small takes of marine mammals incidental to specified activities; offshore seismic activities in southern California. *Fed. Regist.* 60(200, 17 Oct.):53753-53760.
- NOAA (2006). Small Takes of Marine Mammals Incidental to Specified Activities; Rim of the Pacific (RIMPAC) Antisubmarine Warfare (ASW) Exercise Training Events Within the Hawaiian Islands Operating Area (OpArea). *Federal Register* 71 (No.78).
- Nowacek D.P., Thorne L.H., Johnston D.W., Tyack P.L., 2007. Responses of cetaceans to anthropogenic noise. *Mammal Rev.*, 37:81-115.
- Porter, M. B. (2011). *The Bellhop manual and user's guide: Preliminary Draft. Heat, Light and sound Reserch. Tech Rep.*
- Richardson W.J., Malme C.I., Green C.R.jr. y Thomson D.H. (1995): *Marine Mammals and Noise*. Academic Press, San Diego, CA 576 pp.
- Ridgway S., Carder D., Smith R., Kamolnick T., Elsberry W. 1997a. First audiogram for marine mammals in the open ocean and depth : hearing and whistling by two white whales down to 30 atmospheres. *J.Acoust. Soc.Am.* 101 (5 Pt2): 3136.
- Ridgway S., Carder D., Scholundt C., Kamolnick T., Elsberry W. 1997b. Temporary shift in delphinoid masked hearing thresholds. *J. Acoust. Soc. Am.* 102 (5 Pt 2): 3102.
- Salon, S., & al., e. (2003). Sound speed in the Mediterranean Sea: an analysis from a climatological data set. *Annales Geophysicae*, Vol 21.
- Schlundt C. E., Finneran, J. J., Carder D. A. y Ridgway, S. H. (2000). Temporary shift of masked hearing thresholds of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, and white whales, *Delphinapterus leucas*, after exposure to intense tones. *Journal of the Acoustical Society of America* 107:3496-3508.
- Southall, B. L., & al., e. (n.d.). Marine mammal noise exposure criteria: Initial scientific recommendations. *Aquatic mammals*, 411-509.
- Southall, B.L., Bowles, A.E., Ellison, W.T., Finneran, J.J., Gentry, R.L., Greene 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, 411 –521.
- Urick, R. J. (1967). *Principles of underwater sound for engineers*. Tata Mc Graw-Hill.
- Urick, R. J. (1984). *Ambient noise in the sea*. Catholic university of America, Washington DC.
- Weir C.R., 2007. Observations of marine turtles in relation to seismic airgun sound off Angola. *Marine Turtle Newsletter* 116:17-20.

