

Università degli Studi della Tuscia di Viterbo

Dipartimento di ecologia e Sviluppo Economico Sostenibile – DECOS

**Dottorato di ricerca in Ecologia e Gestione delle Risorse Biologiche.
Ciclo XXII. Bio 07**

**APPROCCIO SEMI-EMPIRICO ALLA VALUTAZIONE DEL
MASCHERAMENTO ACUSTICO DA RUMORE NAVALE PER LA
Balaenoptera physalus.**

Dottorando: *Dott. Alessandro Puppini*.

Tutor: *Prof. Marco Marcelli*.

Coordinatore: *Dott.ssa Roberta Cimmaruta*.

A Carletto che continua silenziosamente a navigare con noi.

Al prof. Eugenio Fresi che nel mare della conoscenza è stato un grande ufficiale di rotta.

Indice generale

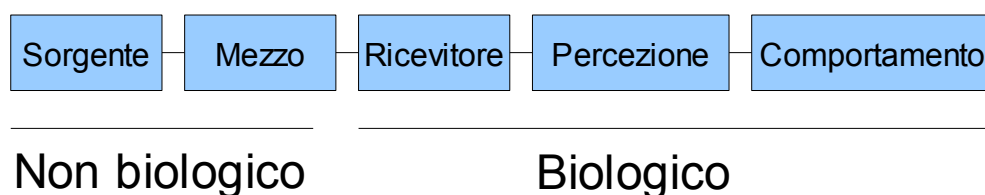
PREMESSA.....	5
INTRODUZIONE.....	8
OGGETTO e SCOPO.....	12
AREA D'INDAGINE.....	13
MATERIALI E METODI.....	18
Approccio semi-empico alla valutazione del mascheramento acustico da traffico navale.....	18
Strumenti e misure acustiche del rumore navale.....	21
Idrofono GP280 HP Colmar.....	24
Calibrazione dei dati acustici.....	25
Caratterizzazione Fisica della colonna d'acqua e del fondale marino per le simulazioni modellistiche.....	28
Risoluzione dell'equazione del sonar passivo.....	32
Il principio di reciprocità.....	32
Il Calcolo del Transmission Loss.....	33
Il Modello RAM.....	33
La tecnica basata su equazioni paraboliche.....	34
Le variabili introdotte nel modello RAMSGeo.....	40
1 Acoustic Environment.....	40
Colonna d'acqua.....	41
Il fondale marino.....	43
2. Code-Independent propagation parameter.....	47
3. Code Dependent propagation parameters.....	48
Segnali acustici della Balaenoptera physalus nel Mar Mediterraneo.....	50
RISULTATI e DISCUSSIONE.....	53
Transmission Loss.....	53
Calibrazione del modello RAMSGeo.....	62
Spettri di Rumore navale e Rumore Ambientale.....	64
Mascheramento acustico.....	67
CONCLUSIONI.....	76
RINGRAZIAMENTI.....	79
BIBLIOGRAFIA CONSULTATA.....	80
NORMATIVA.....	83

PREMESSA

Lo sviluppo dei metodi applicati e delle piattaforme di misura utilizzate in acustica subacquea, ha permesso un incredibile aumento delle conoscenze e la possibilità di rendere trasversali ambiti di ricerca che fino agli anni '70 erano di quasi esclusivo dominio militare.

Lo studio dei possibili impatti dovuti all'immissione di energia e/o sostanze da parte dell'uomo nell'ambiente resta un argomento di particolare attualità non solo in ambito scientifico, ma anche in quello amministrativo dove a monte della produzione di norme servirebbe la realizzazione di metodi e strumenti per la conservazione dei sistemi ecologici, affidabili ma anche semplificati dove possibile.

In acustica subacquea per rumore si intende l'insieme di suoni indesiderati che interferiscono con il normale funzionamento di un sistema di comunicazione (Ross, 1987). Poiché un sistema di comunicazione a due vie è costituito almeno da una sorgente, un mezzo di propagazione e un ricevitore, il rumore sarà sempre funzione del tipo di informazione che necessita il ricevitore. Se il ricevitore considerato è in realtà un apparato uditivo, allora la carenza conoscitiva sarà tanto maggiore quanto meno sono conosciute le modalità percettive e le reazioni comportamentali. Schematizzando quanto detto:



Spostandoci nello schema da sinistra verso destra le conoscenze scientifiche tendono a diminuire, viceversa spostandosi verso sinistra aumenta la prevedibilità del sistema (O.N.A.M.M., 2001). In alcuni casi è possibile comunque notare in presenza di sorgenti, variazioni comportamentali di singoli o gruppi di organismi, nonostante restino incognite

le funzioni associate alle variabili intermedie.

Parallelamente al crescente uso del mare da parte dell'uomo è cresciuto anche il contributo acustico collegato alle attività svolte e si stima che negli ultimi 40 anni si sia verificato un aumento del rumore nelle zone costiere di 10 dB per decade (Ketten, 2004). Le attività militari e costruttive facendo uso di strumenti impulsivi ed esplosivi creano scenari acustici intermittenti ma estremamente intensi, mentre altre attività come la navigazione producono un rumore di minore intensità ma praticamente costante.

Il rumore subacqueo dovuto alle attività antropiche, sta assumendo istituzionalmente il ruolo di inquinante transfrontaliero (UNCLOS3). Già dal 1992 con la fine del progetto militare SOSUS (Sound Surveillance System, 2000 U.S. Navy) è stato possibile descrivere la densità dei suoni di origine antropica che ingombravano il campo acustico subacqueo. Ne emerse che la maggior parte del rumore era, e ancora oggi è, dovuto al traffico navale. Focalizzando l'attenzione nel bacino Mediterraneo, questo è risultato essere una delle autostrade marine più affollate del mondo, interessando il 15% del traffico navale mondiale per numero di transiti e il 10% per tonnellaggio lordo (DWT) (REMPEC 2008). Circa l'80% dei porti del Mediterraneo sono distribuiti nell'area centro occidentale. La densità di traffico misurata in termini di viaggi, è dominata dal traffico passeggeri che nel 2006 si è attestata sopra i 75.000 viaggi, con una previsione di incremento del 33% per il 2016 pari a 100.000 viaggi.

In questo contesto vista la capacità di propagazione del suono in mare le aree marine protette, come il santuario per i cetacei Pelagos, sono particolarmente interessate dal rumore navale a causa dell'elevata densità di rotte che interessano in nostri mari (Marcelli, 2008).

Poiché gli spettri navali mostrano elevate intensità nelle basse frequenze inferiori a 100 Hz (Urick, 1983) queste possono interferire in particolar modo con la *Balaenoptera physalus* che emette segnali a 20 Hz (Clarck et al., 2002) generando fenomeni di mascheramento acustico. Lo studio di questi processi è in realtà prevedibile anche dalla norma: infatti i mammiferi marini sono protetti dalla legge italiana (L.157, 1992), che ne vieta la presa, la detenzione e il trasporto. La legge non si limita a proteggere i mammiferi marini dalle attività illegali di caccia, ma con l'istituzione nel 1999, in un accordo tra Italia, Francia e Monaco, del Santuario Per i Cetacei Pelagos (L. 391, 2001), questi sono protetti da ogni tipo di turbativa intenzionale e mira a conservare intatto l'ecosistema.

I mammiferi marini affidano alla comunicazione acustica una gran parte della loro percezione ambientale ('Umwelt' Von Uexkull, 1934, Ketten, 2004) e la comprensione dei possibili (potenziali) impatti acustici passa generalmente attraverso la descrizione dei meccanismi uditivi specie specifici, o estrapolando/interpolando le soglie acustiche di specie affini (Ocean Noise And Marine Mammals, 2001).

Anche se è possibile ricostruire o stimare alcune curve audiometriche per gli odontoceti , altrettanto non è fattibile per i mysticeti, di cui ad oggi non si dispone di curve audiometriche (Popper 1980, Fay 1988, Au 1993, Richardson et al., 1995).

Non potendo entrare nel dettaglio dell'apparato uditivo della *Balaenoptera physalus* è comunque possibile descrivere lo scenario acustico generato dal rumore navale che può causare fenomeni di mascheramento. Per fare ciò è necessario disporre di uno strumento di calcolo che permetta di risolvere l'equazione del sonar passivo, attraverso cui possiamo ottenere le variabili che definiscono le sorgenti acustiche e le modalità di propagazione del suono in mare per risolvere infine l'equazione che definisce il mascheramento acustico.

INTRODUZIONE

Il concetto di interferenza acustica è sicuramente familiare a chiunque abbia cercato di avere un dialogo in un locale affollato oppure provi ad ascoltare la voce di un interlocutore telefonico vicino ad un televisore acceso. In tali situazioni il rumore proveniente da una o più sorgenti può impedire all'ascoltatore di capire, riconoscere o percepire i suoni d'interesse. Questo tipo di interferenza acustica è nota come mascheramento e consiste nella riduzione delle capacità dell'ascoltatore (ricevitore) di percepire, riconoscere o decodificare un suono utile detto segnale. Nel caso di un sistema di comunicazione a 2 vie, ossia che preveda la contemporanea presenza di sorgente e ricevitore, il mascheramento implica una riduzione delle capacità di entrambi. Il termine mascheramento è stato preso in prestito in realtà dall'ottica nel caso generale in cui un individuo fallisca nel riconoscere il verificarsi di un particolare stimolo.

I primi lavori sul mascheramento acustico si basavano sulla misura sperimentale di percepire un segnale tonale in presenza di un rumore (Tanner, 1958). Negli uomini il mascheramento è quel processo attraverso cui la soglia di udibilità per un suono è raggiunta dalla presenza di un altro suono (Moore, 1982). Studi successivi mostrarono come questi principi base del mascheramento potevano essere applicati ad altri mammiferi (Fay, 1988). Queste osservazioni insieme ad altre evidenze mostrano come il sistema uditivo dei mammiferi è in grado di suddividere un determinato suono nelle frequenze costituenti, portando ad un'ottimizzazione del rapporto fra segnale e rumore e processando parallelamente le componenti armoniche dei suoni complessi (Moore, 1982; Fay, 1992).

Esistono due principali forme di **mascheramento** (Ihlefeld & Shinn-Cunningham 2008, Yost et al. 2008):

- **energetico;**
- **informativo.**

Il primo consistente in un suono mascherante (rumore) con energia nella stessa banda di frequenza del segnale d'interesse e che si verifica nello stesso intervallo di tempo, il secondo invece opera successivamente a livello di processo uditivo e si verifica quando il segnale è ancora udibile, ma non separabile da un altro con caratteristiche simili (Watson,

1987; Bruntgart, 2004)

Il mascheramento in senso generale è un elemento di studio fondamentale per quanto riguarda gli effetti dei suoni interferenti cosiddetti (non-injurious) non pregiudizievoli per la fauna selvatica.

I primi a mostrare che il rumore antropogenico possa influenzare la comunicazione dei mammiferi marini sono stati Payne & Webb (1971), proponendo come collettivamente le frequenze inferiori a 100 Hz prodotte dal rumore navale potessero ridurre il range di comunicazione anche della *B. physalus*, oltre che della *B. musculus*.

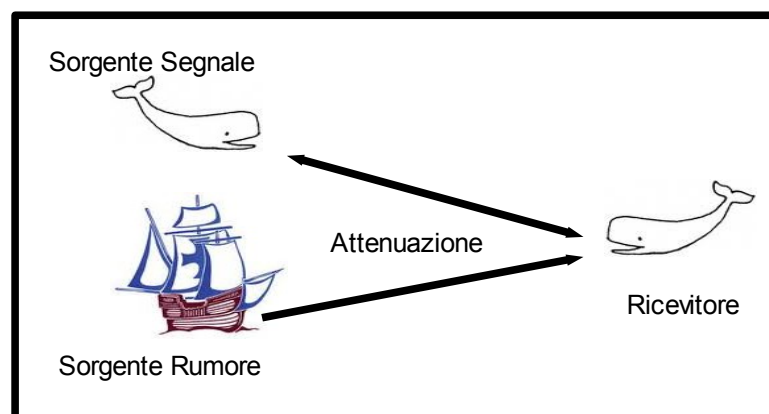
Naturalmente l'adattamento evolutivo alla vita marina di decine di milioni di anni (Renolds & Rommel, 1999) ha permesso lo strutturarsi di ingegnosi meccanismi di ricezione uso e produzione dei suoni per una variegata serie di funzioni biologiche (Clark, 1990; Au 1993; Richardson et al. 1995, Tyack 1998, Wartzock & Ketten 1999, Clark & Ellison 2004).

Sebbene non note, Richardson et al. (1995) e Clark & Ellison (2004) deducono che le soglie uditive a bassa frequenza siano molto simili al rumore ambientale che però risulta estremamente variabile.

Di conseguenza, questi specialisti a basse frequenze sono quindi particolarmente sensibili agli effetti di mascheramento del rumore sui loro segnali di comunicazione.

In questo lavoro e' stato realizzato un protocollo che applica l'equazione del sonar (Urick, 1983) agli aspetti del mascheramento acustico sulla *B. physalus*, inserendo gli effetti del rumore navale e del rumore di fondo registrato in ambiente costiero.

La procedura prevede il calcolo del mascheramento secondo una semplice geometria stazionaria, che pone le due sorgenti di segnale e rumore dalla stesso lato rispetto al ricevitore, secondo lo schema seguente.



L'impostazione geometrica è di fatto dovuta al modello matematico RAMSGeo. In questo

semplice schema emergono alcuni punti fondamentali del metodo applicato in questo lavoro:

- Definizione delle sorgenti di rumore.

Poiché questo lavoro tratta il rumore navale, vengono analizzate le classi navali predominanti ed estratte le più frequenti, basandosi su un lavoro relativo del traffico navale nel Santuario Pelagos (Marcelli, 2008) che ha rappresentato la base su cui è stato strutturato il dottorato di ricerca.

- Distribuzione spaziale delle sorgenti di rumore.

Estrate le classi navali più frequenti, vengono raccolti i dati relativi alle rispettive rotte. Poiché queste naturalmente comprendono sia ambienti costieri che pelagici, nella successiva trattazione modellistica legata all'attenuazione del rumore in mare, vengono usati due ambienti come casi di studio.

- Caratterizzazione acustica delle sorgenti.

Fase di misura acustica dei vettori navali da cui si ottengono valori da ricalcolare per via modellistica in modo da ottenere i dati alla sorgente, secondo l'equazione del sonar passivo.

- Distribuzione della *Balaenoptera physalus*.

Sebbene esistano diversi lavori in cui vengono proposte mappe della *B. physalus* (Panigada et al., 2005; Monestiez et al., 2006) dove la distribuzione è prevalente nel Bacino Corso Ligure Provenzale, viene assunto in questo caso che le balenottere possano trovarsi in qualsiasi punto dell'ambiente di simulazione, per ottenere delle mappe spazialmente omogenee di mascheramento.

- Caratterizzazione dei segnali noti emessi dalla *Balaenoptera physalus*.

Raccolta di dati acustici da bibliografica per definire bande di frequenza e intensità relative della sorgente dei segnali. Confronti e sovrapposizioni in tempo e frequenza con le navi per ricavare elementi di similitudine.

- Raccolta dati e misure per le simulazioni modellistiche.

Serie di campagne di misura per la raccolta dati necessari a caratterizzare fisicamente gli ambienti di propagazione costiero e pelagico che verranno inseriti nel modello di propagazione acustica.

- Simulazioni modellistiche e integrazione di metodi di calcolo per la rappresentazione grafica del mascheramento acustico.

Le simulazioni rappresentano l'elemento chiave insieme alle misure in mare per la soluzione dell'equazione del sonar passivo e del rapporto segnale rumore, in quanto forniscono le variabili incognite.

OGGETTO e SCOPO

In questo lavoro viene applicato, verificato ed ottimizzato un modello di propagazione acustica subacquea (RAMSGeo) accoppiato con misure empiriche, per la soluzione delle equazioni coinvolte nella valutazione del mascheramento acustico.

Il modello è applicato in due scenari di propagazione acustica usati come casi di studio: uno costiero nell'area antistante al porto di Civitavecchia e uno pelagico nel Tirreno centrale.

Queste equazioni sono applicate alla descrizione del mascheramento della *Balaenoptera physalus* in Mar Mediterraneo, dovuto al rumore delle navi.

Sulla base di uno studio dello stato dell'arte del traffico navale nel santuario per i cetacei Pelagos (Marcelli, 2008), vengono definite le rotte e classi di navi di interesse, successivamente registrate e analizzate.

Le misure eseguite sulle navi vengono confrontate con i segnali della *Balaenoptera physalus* per definire gli elementi di sovrapposizione acustici.

La soluzione delle equazioni legate al mascheramento acustico nello spazio viene applicata alla distribuzione delle principali rotte navali nel santuario Pelagos.

Lo scopo del lavoro è quello di presentare un quadro attuale del possibile mascheramento acustico tra la *Balaenoptera physalus* e rumore generato dalle navi più frequenti nel Santuario Pelagos, descrivendo le caratteristiche del mezzo di propagazione nell'area di studio. Si vuole inoltre presentare un quadro metodologico semplificato per l'ottenimento dei risultati presentati, integrando negli algoritmi del modello usato alcune funzioni che permettono di unificare gli strumenti di calcolo.

AREA D'INDAGINE

Le misure e le simulazioni acustiche eseguite in questo lavoro di dottorato sono distribuite in due aree geografiche differenti nel mar Tirreno. Nella prima zona costiera, prospiciente il Porto di Civitavecchia sono state eseguite le misure di rumore navale e le misure CTD per la caratterizzazione fisica della colonna d'acqua ai fini delle simulazioni modellistiche. Nella seconda zona pelagica estratta da un transetto della Crociera oceanografica MEDGOOS 9 del 2005 (MEDiterranean Global Ocean Observing System) sono state eseguite le misure CTD ai fini delle simulazioni modellistiche in ambiente pelagico.

Le due aree geografiche scelte come caso di studio rappresentano i due scenari di propagazione acustica:

- costiero (fino al limite della piattaforma continentale)
- pelagico (dal limite della piattaforma fino alla pianura abissale).

La scelta dell'ambiente costiero di Civitavecchia è inoltre legata alla rappresentatività del traffico navale di questo porto rispetto a quello che interessa il Santuario Pelagos per la possibilità di eseguire misure di rumore.

In questo precedente lavoro, al quale lo scrivente ha partecipato, commissionato dal Ministero dell'Ambiente e delle tutela del Territorio e del Mare dal titolo 'Traffico Navale nel Santuario Pelagos: stato dell'arte e ipotesi di impatto sui cetacei', sono state definite le principali rotte navali che attraversano il santuario Pelagos e le navi più frequenti. Di seguito riportiamo una rappresentazione grafica (ill. 1) riassuntiva dei risultati ottenuti.

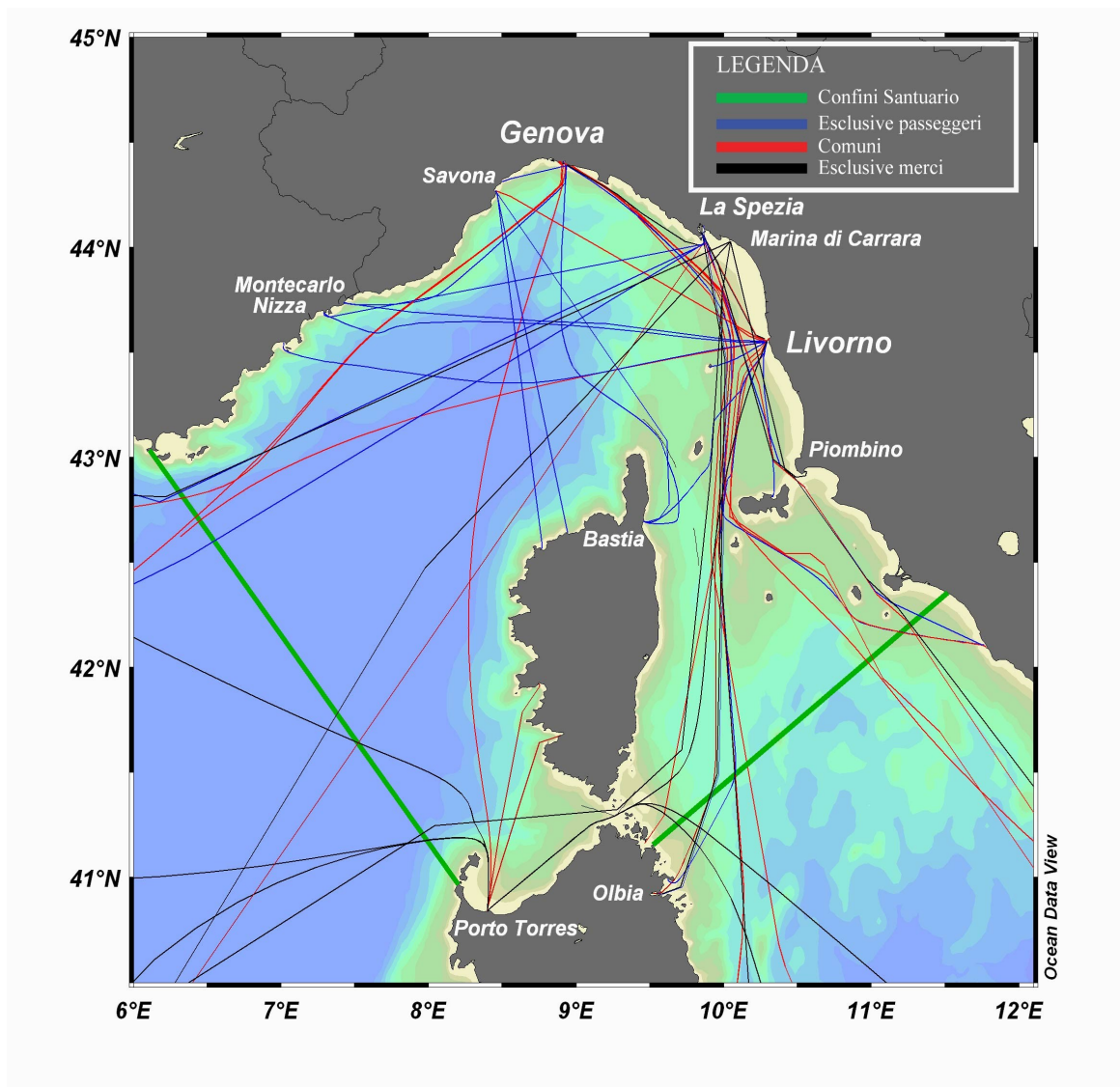


Illustrazione 1: Traffico Navale nel Santuario Pelagos; rappresentazione delle principali rotte suddivise per classe (Marcelli, 2008).

Oltre all'elevata densità effettiva di rotte è possibile notare come queste siano distribuite sia in ambiente costiero che in quello pelagico.

Nell' illustrazione 2 è raffigurata l'area geografica dove sono state eseguite le sette stazioni di misura CTD, per la misura delle variabili necessarie alle simulazioni e, sotto alla stazione n.4, il punto di misura per il rumore navale. La scelta di tale punto è dovuto al limite di velocità che vige nel cono di ingresso ed uscita delle navi dal porto pari a 15 nodi.

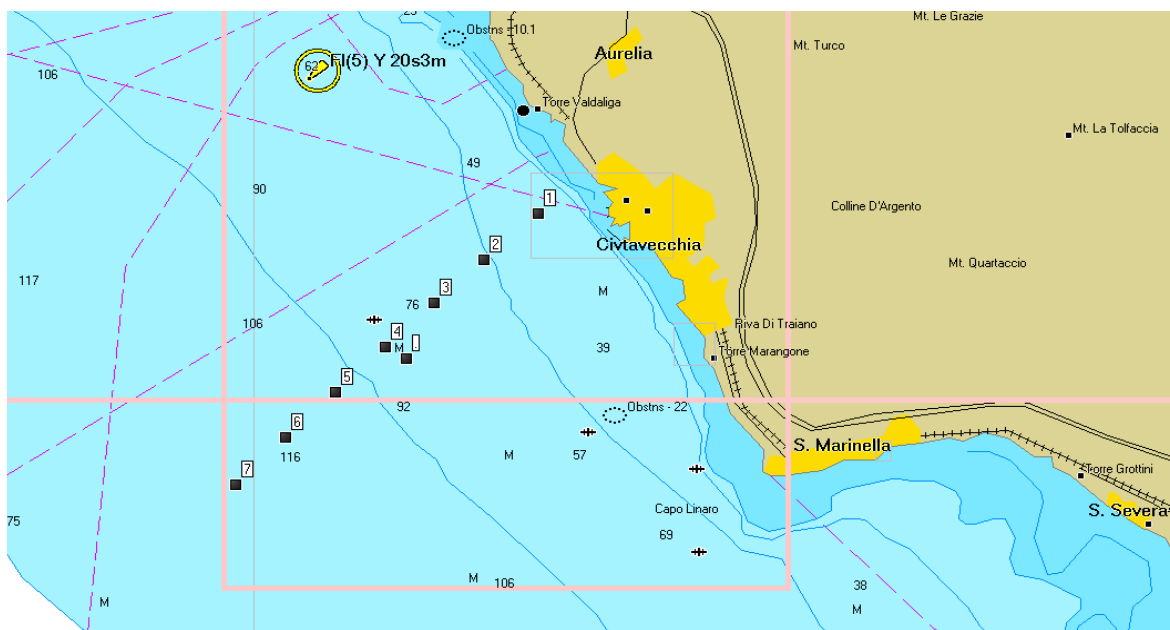


Illustrazione 2: Area di studio costiera per le misure del rumore navale e le simulazioni acustiche del modello. I punti numerati da 1 a 7 rappresentano le stazioni di misura CTD, GPS e SONAR

Poiché è zona con divieto di ancoraggio il punto di misura è situato subito fuori dai limiti del cono, ma ha comunque permesso di raccogliere dati di rumore a velocità costanti dei vari mezzi navali.

Il dominio di calcolo del modello acustico RAMSGeo si estende a profondità maggiori (illustrazione 3) rispetto alla stazione più a largo, poiché vengono fatte delle assunzioni semplificative sulla variabilità orizzontale dei parametri della colonna d'acqua. Ad ogni profilo viene associato un range orizzontale entro il quale si associano i valori misurati.

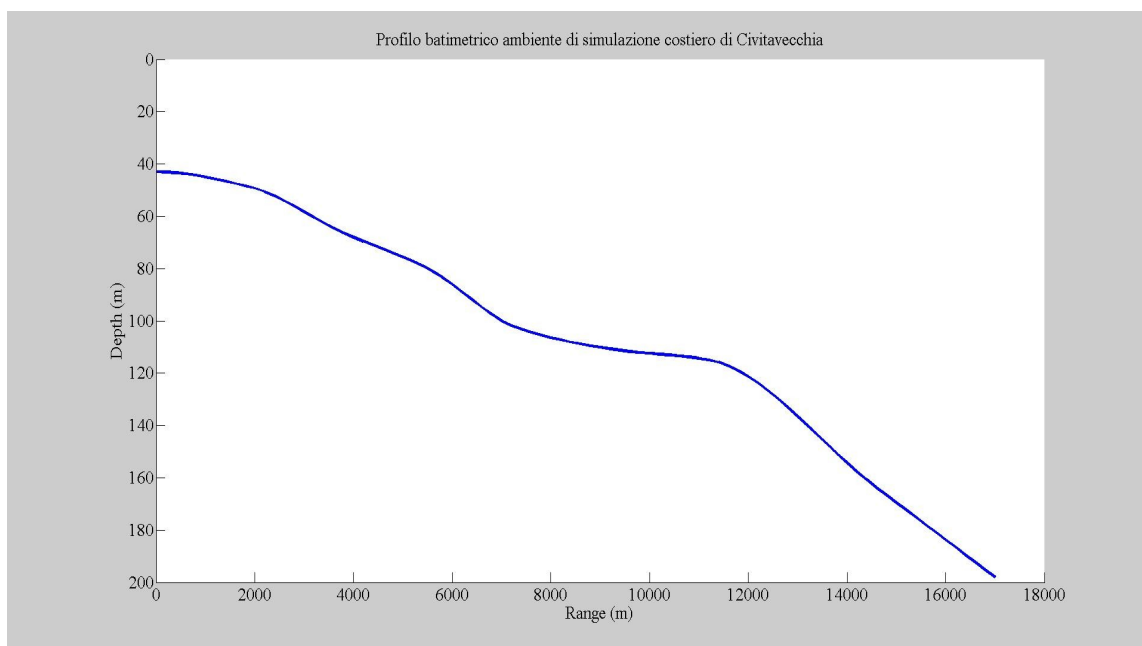


Illustrazione 3: Profilo batimetrico inserito nelle simulazioni modellistiche per l'area di Civitavecchia

Sull'asse delle ascisse dell'ill. 3 il dominio spaziale si estende di circa 2 mn rispetto al confine dell'area d'indagine, mentre le profondità superano i 200m.

Per l'area di simulazione pelagica è stata scelta quella inclusa nel transetto di misura

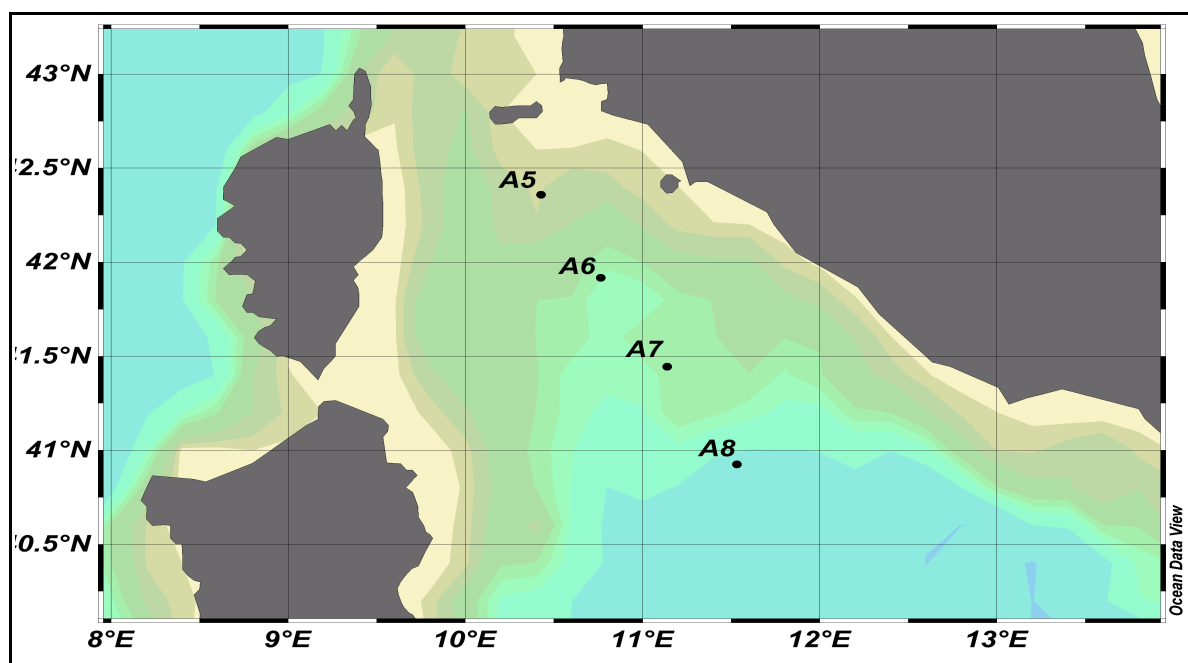


Illustrazione 4: Stazioni MedGOOS9 usate per la simulazione delle propagazione in ambiente pelagico

tirrenico della crociera oceanografica MEDGOOS9 (2005) comprendente le stazioni A5-A8 la cui distribuzione spaziale è visibile in illustrazione 4.

In quest'area le stazioni comprendono quote batimetriche che vanno dai 435m agli oltre 2000m, ripercorrendo con una geometria semplificata la complessa geomorfologia dei fondali tirrenici. Data la notevole distanza orizzontale del dominio di questo secondo ambiente di simulazione (circa 180 km) verranno descritte in seguito alcune semplificazioni geometriche per impedire l'overflow di dati nel modello, che nelle prime simulazioni ha causato continui errori.

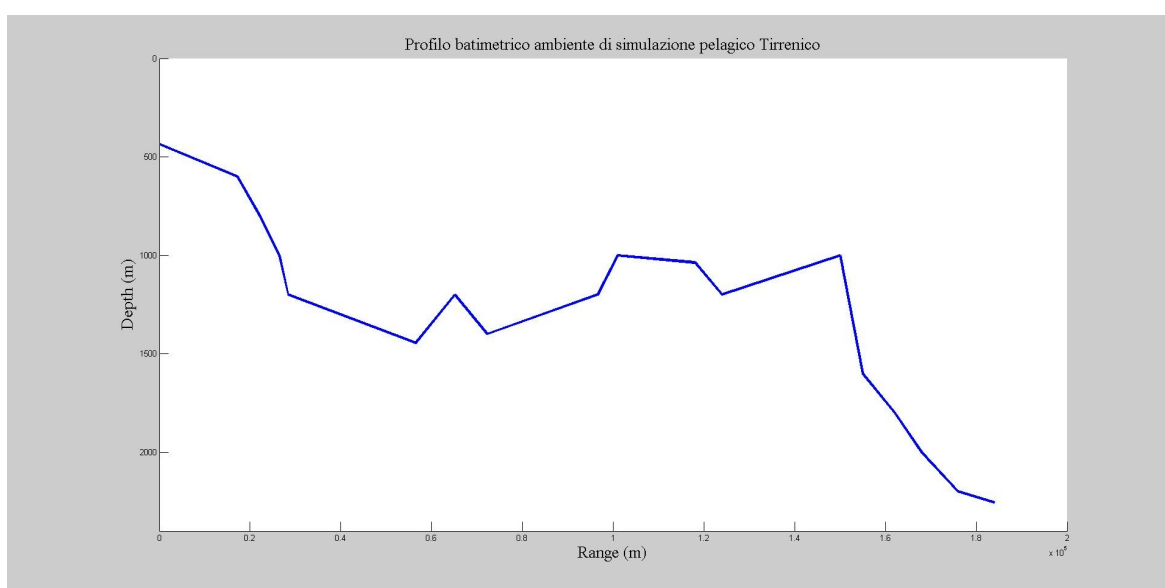


Illustrazione 5: Profilo batimetrico usato per le simulazioni pelagiche, in questo caso notare la forte compressione della dimensione orizzontale che si estende per circa 185 km, mentre la profondità massima superiore ai 2200m.

Nel complesso l'area di studio presenta due ambienti distinti e rappresentativi delle condizione costiere e pelagiche delle rotte navali. Inoltre il sito di Civitavecchia è rappresentativo del traffico navale del Santuario Pelagos e in esso sono state eseguite le misure acustiche per la successiva caratterizzazione del rumore ambientale e navale.

MATERIALI E METODI

Approccio semi-empirico alla valutazione del mascheramento acustico da traffico navale.

In questa sezione vengono fatte delle considerazioni per ottimizzare la selezione dei parametri che rappresentano il livello con cui segnale e rumore si sovrappongono in frequenza, tempo e spazio.

Ciò si traduce nel calcolo del rapporto segnale rumore (SNR) in modo da poter fornire una stima di quanto il rumore navale in una determinata scena acustica, riduca la capacità di riconoscere suoni intraspecifici.

Sono tre i fattori che condizionano la comunicazione acustica:

1. Banda di frequenza: la gamma di frequenze all'interno della quale il rumore di una sorgente specifica o di fondo può mascherare un suono biologicamente significativo. Il valore della banda è basato sulla serie di banda in 1/3 di ottava che riguardano i segnali della specie d'interesse.
2. Integrazione nel tempo: la durata del rumore potenzialmente mascherante. Questo valore si basa sul confronto fra la durata del segnale e del rumore. Nel caso del rumore navale si assume che si verifichi contemporaneamente e per tutta la durata del segnale. In realtà il mascheramento acustico può manifestarsi anche quando segnale e rumore si sovrappongono solo parzialmente o quando il rumore precede il segnale.
3. Lo spazio: spazio euclideo entro il quale il rumore è distribuito. L'assunto fatto in questo lavoro prevede che gli scenari di propagazione acustica rientrino nel range di comunicazione funzionale della *Balaenoptera physalus*.

Il calcolo del mascheramento acustico è fornito dall'equazione del sonar:

$$SNR = RL - NL \quad (A),$$

dove

- SNR: Signal to Noise Ratio (Rapporto Segnale Rumore), come differenza fra logaritmi è una grandezza adimensionale.
- RL: Received Level (in dB re 1 μ Pa) indica l'intensità acustica che arriva a un determinato ricevitore nell'ambiente. In questo lavoro si intende il segnale ricevuto da una *Balaenoptera physalus* proveniente da un esemplare della stessa specie, le cui caratteristiche in intensità frequenza e tempo verranno descritte di seguito.
- NL: Noise Level (in dB re 1 μ Pa) rappresenta l'intensità acustica del rumore. Nella trattazione seguita il rumore viene distinto in:
 - Ambientale: rumore generato dall'insieme di sorgenti non distinguibili di qualsiasi natura;
 - Navale: rumore misurato in campo di un determinato vettore navale, secondo le specifiche di tonnellaggio compreso fra 20.000 e 40.000 tonnellate e tipologia Ro-Ro pax (traghetti passeggeri in grado di trasportare anche merci su gomma).

Per risolvere l'equazione A è necessario quindi disporre di dati relativi alle 2 variabili. L'approccio usato in questo lavoro è di lasciare alla stima modellistica il calcolo del Transmission Loss (TL), e misurare il resto delle variabili.

Il TL è quindi frutto di simulazioni e rappresenta un elemento critico di calcolo poiché generalmente vengono fatte assunzioni semplicistiche nelle modalità di propagazione. Le misure sono comunque parte integrante sia del modello, per la definizione degli ambienti simulati che, delle variabili dell'equazione del sonar passivo:

$$RL = SL - TL + AG \quad (B),$$

dove vediamo che al fine di risolvere l'equazione A, è necessario risolvere prima la B. In questa equazione il Source Level (SL) è nel nostro caso di studio il livello acustico della *B. physalus*, e il livello del rumore navale.

Mentre per ottenere il valore della prima, abbiamo fatto uso di dati bibliografici, per i valori di rumore navale siamo ricorsi a campagne di misura in mare.

Il Transmission Loss (TL) è derivato dalle simulazioni; e il Guadagno di Cortina (AG Array Gain) è impostato via hardware, quindi noto.

Tornando a considerare l'equazione A, se questa assume valori minori o uguali a 0, possiamo dire che in generale un segnale non sarà percepito dal ricevitore, mentre per valori superiori allo 0, limite in cui c'è un 50% di probabilità di percepire il segnale (Clarck et. al, 2009) il segnale è percepito dal ricevitore.

E' probabile che i cetacei abbiano delle capacità di filtrare e/o ottimizzare la ricezione di segnali specie specifici rispetto ai rumori, ma ciò non è ancora noto e quindi si ricorre alla semplice equazione del sonar (eq. A)

Strumenti e misure acustiche del rumore navale.

Per la realizzazione delle misure di rumore navale, sono state identificate le tipologie di navi da misurare, basandosi su un precedente lavoro al quale lo scrivente ha collaborato (Marcelli, 2008), in cui è stata effettuata un'analisi del traffico navale nel Santuario per i cetacei Pelagos che ha portato alle seguenti conclusioni:

- le navi passeggeri (Ro-ro) sono quelle che effettuano il maggior numero di percorrenze delle stesse rotte, con variazioni stagionali dovute ai flussi turistici;
- Le rotte navali interessano vaste aree che includono senza distinzione le Aree Marine Protette come il Santuario Pelagos.
- Le analisi dei dati forniti dall'ISTAT (2005) e dalle Autorità Portuali hanno portato a classificare le navi Ro ro comprese fra 20000 e 40000 TSL (tonnellate di stazza lorda) quelle più frequenti nelle aree dove sono censiti i cetacei.

Con la collaborazione della Capitaneria di Porto di Civitavecchia, che ha fornito il supporto informativo sul traffico navale in transito e quello strumentale con i dati del sistema A.I.S (Automatic Identification System), è stato messo a punto un metodo operativo di misura del rumore navale.

Il metodo prevede la possibilità di definire in tempo reale, velocità delle navi e la loro distanza dall'idrofono. Un'imbarcazione con il personale per eseguire le misure è stata posizionata sul limite del cono di ingresso e uscita delle navi dal porto, in cui sussistono dei limiti di velocità:

- Velocità massima in ingresso 15 nodi;
- Velocità massima in uscita 20 nodi.

Tramite il sistema A.I.S. Le navi trasmettono posizione e velocità ogni 20 secondi e sono visualizzabili in tempo reale dalla sala di controllo della Capitaneria di Porto; l'imbarcazione posta al limite del cono, dotata di riflettore è visibile dai radar presenti in sala di controllo, che ne restituiscono l'esatta posizione.

Definito un canale di comunicazione radio, l'operatore imbarcato comunica all'operatore in sala di controllo una serie di sengali orari in cui segnare ora e posizioni relative di nave e idrofono.

Contemporaneamente al segnale orario viene iniettato un segnale di calibrazione nel sistema di misura pari a 2100 Hz. Riportando i punti su carta nautica e mediante software Garmin MAPSource® è stato possibile ricavarne le distanze in metri.

La conoscenza delle distanze tra oggetto e strumento di misura permette successivamente di risalire al valore del rumore a 1 m dalla sorgente, poiché per definizione le sorgenti vengono misurate o stimate a 1m di distanza (Ross, 1987).

Attraverso la caratterizzazione del mezzo di propagazione e lo strumento modellistico è stata stimata la dissipazione acustica, per lo spettro di frequenze misurato, rispetto alla profondità e alla distanza.

Sono state misurate e analizzate 5 navi Ro-Ro pax (navi in grado di trasportare passeggeri e merci su gomma) differenti con caratteristiche di stazza lorda incluse nei risultati del “Traffico navale nel Santuario Pelagos: stato dell'arte e ipotesi di impatto sui cetacei” (Marcelli, 2008), visualizzate sotto (ill.6).

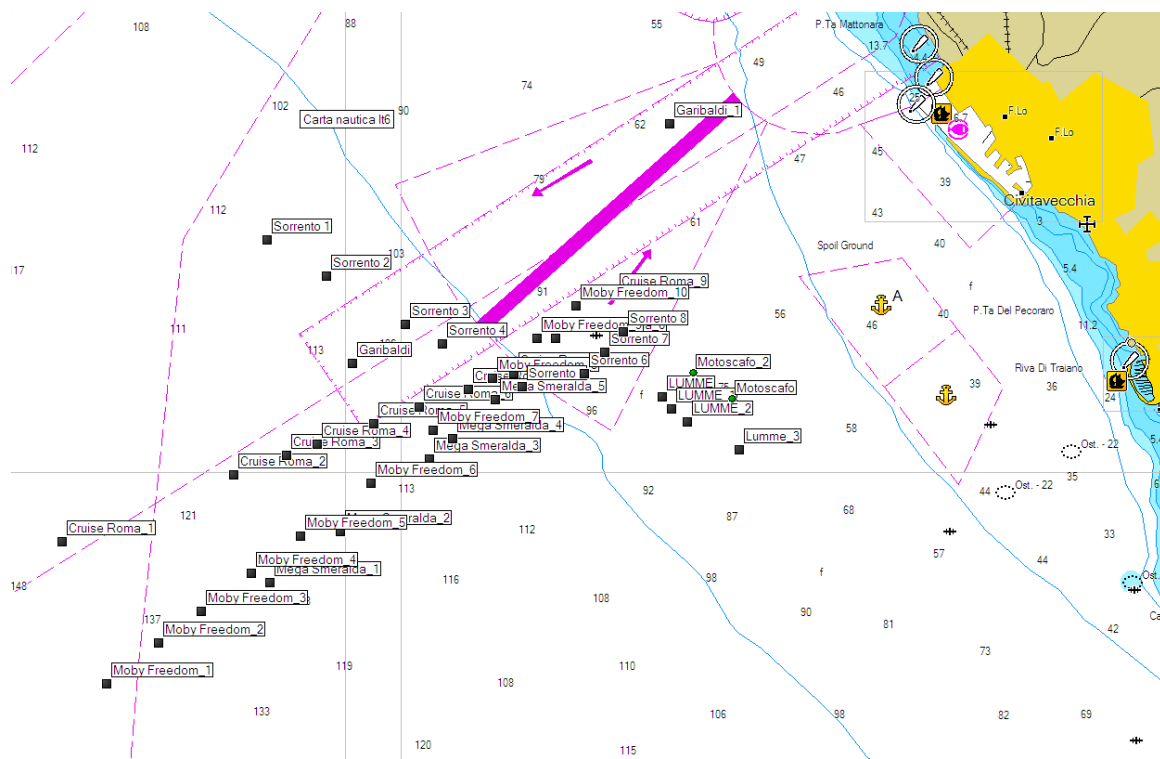


Illustrazione 6: Quadro complessivo delle posizioni delle navi nei punti di misura acustici.

L'assetto strumentale per le misure in mare consiste di un personal computer portatile che tramite software gestisce e memorizza i dati di posizione, mediante gps cablato, e i dati di acustici provenienti dalla scheda audi dell'idrofono calato a una quota di 10m.

Le misure sono state eseguite a bordo di un motorsailer di 8m “Lumme”, del Laboratorio di Oceanologica Sperimentale ed Ecologia Marina, dell'Università degli Studi della Toscana.



Illustrazione 7: Boa di posizionamento dell'idrofono

Nell'immagine 7 è visibile la boa di posizione dell'idrofono rispetto al motorsailer Lumme. In tutte le misure acustiche le distanze verticali e orizzontali tra idrofono e imbarcazione sono rimaste costanti (20 m distanza orizzontale, 10 m profondità) così come il Lumme è sempre rimasto fermo rispetto alle navi in transito.

La serie di misure eseguite per ogni vettore navale prevede una prima fase di acquisizioni acustiche, quando la distanza è ancora elevata (circa 30-40 miglia) per definire il rumore ambientale e una seconda fase di avvicinamento per le misure effettive di rumore.

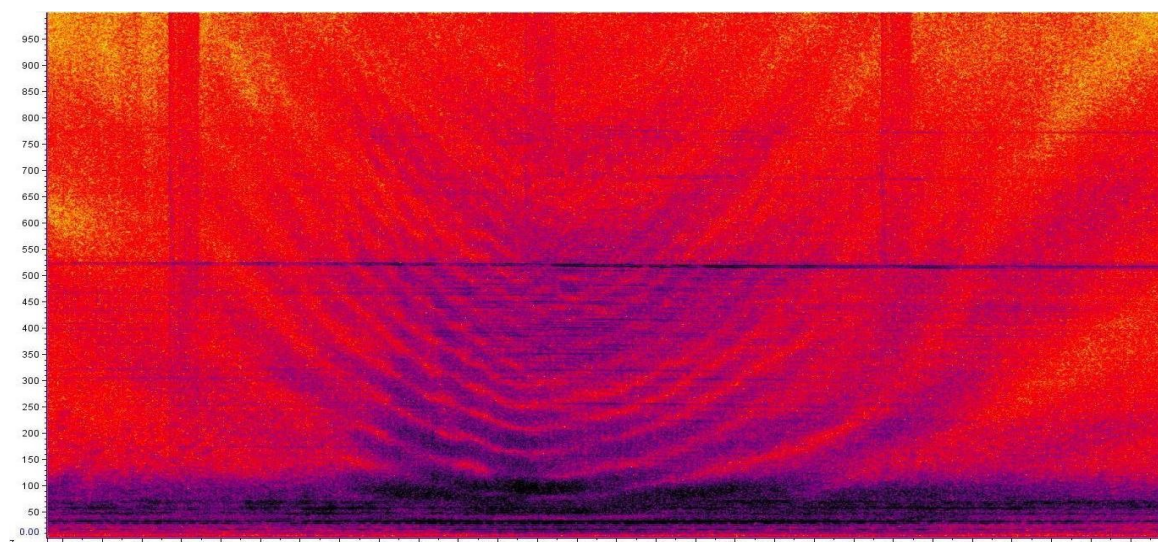


Illustrazione 8: Spettrogramma di una nave Ro-Ro passeggeri, in movimento rispetto all'idrofono, visibile il Lloyd Mirror Effect.

A scopo esemplificato viene riportato nell'immagine 8 una misura di una nave Ro-Ro pax passeggeri in movimento rispetto all'idrofono, secondo lo schema di avvicinamento in immagine 6. Le linee concave, dette bathtubs perché ricordano una vasca da bagno, rappresentano il Lloyd mirror effect dovuto alle interferenze costruttive e distruttive tipiche delle sorgenti poste a poca profondità dalla superficie. La caratterizzazione intensità-frequenza è ricavata nel CPA (Closest Point of Arrival), che rappresenta il punto più vicino tra sorgente e ricevitore, individuato nel punto di quasi tangenza delle linee d'interferenza con l'asse delle ascisse (tempo).

Idrofono GP280 HP Colmar

Le misure acustiche del rumore navale sono state eseguite con un idrofono calibrato mod. GP280HP Co.l.mar., di cui si riportano le specifiche tecniche:

- Banda di utilizzo 5-90.000 Hz
- Attenuazione alle basse frequenze a 6dB/ottava con -3dB a 740 Hz
- Sensibilità -170dB re 1V/ μ Pa
- Direzionalità: sferico Omnidirezionale
- Max profondità operativa: 1500m;
- Guadagno in banda @ 5kHz: 30dB
- Rumore equivalente in ingresso @1kHz: -158 dB re 1V/sqrtHz



- Rumore equivalente in ingresso @10kHz: -165 dB re 1V/sqrtHz
- Impedenza in ingresso: 10 Mohm
- Alimentazione: 11.5, 30 Volt
- Massimo segnale in uscita: 7 Vpp
- Assorbimento 9mA @12V
- Peso a secco: 400 gr
- materiale contenitore: acciaio inox 316

L'idrofono è alloggiato in una gabbia in acciaio AISI e fissato ad essa tramite supporti elastici che ne riducono il self noise. E' presente una deck unit che ne regola il guadagno e permette di generare un segnale di calibrazione a 2100 Hz.



Una caratteristica di pregio dell'idrofono è nella sua banda di utilizzo, che ci ha permesso di misurare rumori e segnali a basse frequenze.

Calibrazione dei dati acustici

A seguito della registrazione su files delle misure acustiche navale, per ottenere i valori della pressione acustica assoluta, espressi in dB re 1 μ Pa, partendo dai valori elettrici all'uscita della scheda audio Hammerfall RME (DSP Multiface a 96 kHz), è stato impiegato il seguente metodo che prevede:

- Uso degli elementi noti del sistema:

Valore assoluto del segnale di calibrazione iniettato da un circuito elettronico tra l'elemento

ceramico e il preamplificatore dell'idrofono @ 2100 Hz è di 133 dB re 1 µPa.

Valore di sensibilità della catena di misura sopra i 5 kHz, pari a -165 dB re 1V/1 µPa.

- Calcolo della sensibilità della catena di misura al di sotto dei 5 kHz. Questo calcolo usa diversi valori di sensibilità a varie bande di frequenza, come indicato in tabella.

Frequenza (Hz)	Sensibilità GP280+ Ricevitore (dB re 1V/uPa)
5000-1500	162
760	165
380	168
190	174
100	183
50	192
25	204
12,5	216
6,25	228

Tabella 1: tabella di sensibilità in funzione dell'intervento filtro low-pass al di sotto dei 1500Hz.

Nelle nostre misure il valore del guadagno impostato sul ricevitore dell'idrofono è di 30 dB. Il guadagno complessivo della catena di misura @2100 è stato ottenuto facendo suonare il segnale di calibrazione e misurando all'uscita del ricevitore il voltaggio picco picco con un oscilloscopio (Tektronix TDS 2012 B) ed eseguendo la semplice formula data da:

$$-165 + 20\log \frac{Volt\ pp}{30}$$

- Calcolo dei valori di pressione acustica in dB re 1 µPa

Rappresentando tramite software (RAVEN PRO 1.4) una slice view di un file dati (usando una finestra di Hamming a 4096 campioni e una sovrapposizione del 50%), si legge il valore rappresentato in dBu alla frequenza di 2100 Hz e lo si sottrae al risultato dell'equazione precedente. Il valore ricavato potrà essere quindi sommato a tutti i valori letti in quel file a 2100 Hz.

Lo stesso tipo di calcolo si applica per tutte le altre bande di frequenza espresse in terze d'ottava.

Caratterizzazione Fisica della colonna d'acqua e del fondale marino per le simulazioni modellistiche

La serie di misure in situ per caratterizzare la colonna d'acqua e il fondale marino, sono un requisito fondamentale per le simulazioni modellistiche, in modo tale da minimizzare le differenze tra ambiente reale e quello simulato.

Le misure della colonna d'acqua nelle stazioni costiere di Civitavecchia sono state ottenute usando la sonda IDRONAUT Ocean Seven 316 Multiparameter Probe (di proprietà del Laboratorio di Oceanologia Sperimentale ed Ecologia Marina dell'Università degli studi della Tuscia), in configurazione standard, equipaggiata con sette sensori: pressione, temperatura, conducibilità, ossigeno disciolto, pH, potenziale di ossidoriduzione (REDOX) e un elettrodo di riferimento. Dalla misura di tali variabili è possibile calcolare la concentrazione di ossigeno, la salinità, la densità e la velocità del suono.

I sensori hanno le seguenti caratteristiche tecniche:

Parametri	Range	Accuratezza	Risoluzione
Pressione	0-1000 dbar	0.1 %	0.03 %
Temperatura	-3/+50 °C	0.003 °C	0.0005 °C
Conducibilità	0-64 mS/cm	0.003 mS/cm	0.001 mS/cm
Ossigeno	0-50 ppm 0-500 % sat.	0.1 ppm 1 % sat.	0.01 ppm 0.1 % sat.
Ph	0-14 ph	0.01 ph	0.001 ph
Redox	-1000/+1000 mV	1 mV	0.1 mV

A partire dalle misure delle variabili quali temperatura, pressione e salinità, sono stati derivati attraverso delle funzioni di ottimizzazione del modello, descritte in seguito, velocità del suono (ill. 9) , richiesti dal modello RAMSGeo.

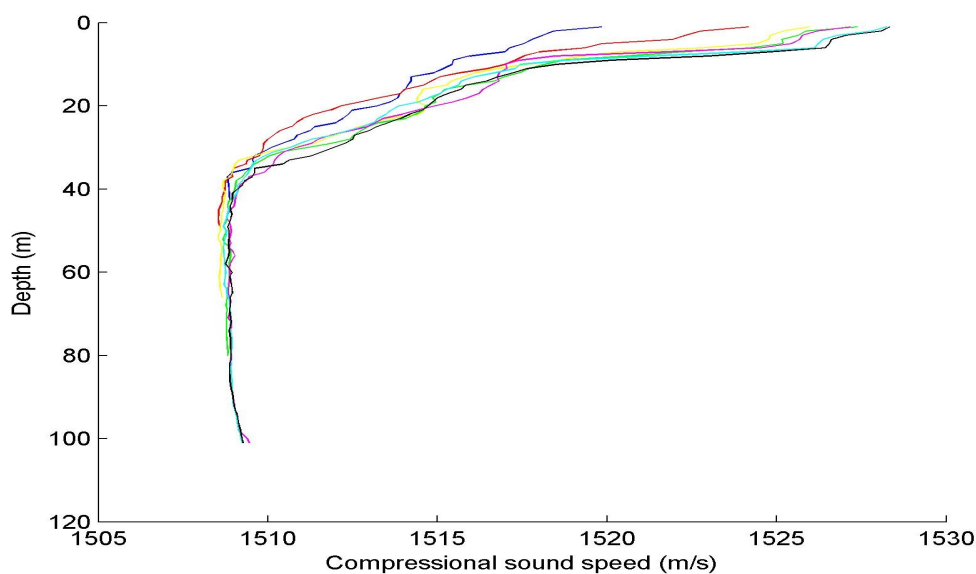


Illustrazione 9: Profili delle 7 stazioni di misura della velocità del suono nel sito di Civitavecchia. Maggio 2009.

Nei profili di compressional sound speed, eseguiti nel mese di maggio del 2009 è visibile la regolarità dei diversi profili di velocità del suono, tipici della stagione; dove nei primi metri si nota la presenza di un leggero rimescolamento della colonna d'acqua e poi la velocità decresce convergendo verso un minimo di 1508 m/s dai 40 m fino a circa i 100m. Alle profondità maggiori è possibile notare inoltre una leggera tendenza all'aumento della velocità del suono, dovuta al contributo della pressione.

Le profondità massime di ogni stazione sono state prese dal valore di massima profondità misurata dalla sonda Idronaut, che è stata calata fino alla superficie del fondale marino.

Le stazioni pelagiche del Tirreno sono state estratte dall'insieme di stazioni di misura svolte nella crociera oceanografica MEDGOOS9. I dati sono presi dalla strumentazione di bordo, costituita da una Seabird SBE 911 plus equipaggiata con scafandro in titanio, in grado di scendere fino a 10500m. Le caratteristiche tecniche sono riportate di seguito:

Parameters	Measurement Range	Initial Accuracy	Typical Stability	Resolution at 24 Hz	Time Response
Conductivity	0 - 7 S/m (0 - 70 mmho/cm)	0.0003 S/m (0.003 mmho/cm)	0.0003 S/m (0.003 mmho/cm) per month	0.00004 S/m (0.0004 mmho/cm)	0.065 sec
Temperature	-5 to +35 °C	0.001 °C	0.0002 °C per month	0.0002 °C	0.065 sec
Pressure	0 to full scale -- 1400/2000/4200 /6800/10,500 m (2000/3000/6000/10,000/15,000 psia)	0.015% of full scale	0.018% of full scale per year	0.001% of full scale	0.015 sec
A/D Inputs	0 to +5 volts	0.005 volts	0.001 volts per month	0.0012 volts	5.5 Hz 2-pole

Anche in questo caso è stata usata una funzione di ottimizzazione del Modello RAMSGeo per la derivazione di velocità del suono e densità, a partire dalle variabili misurate.

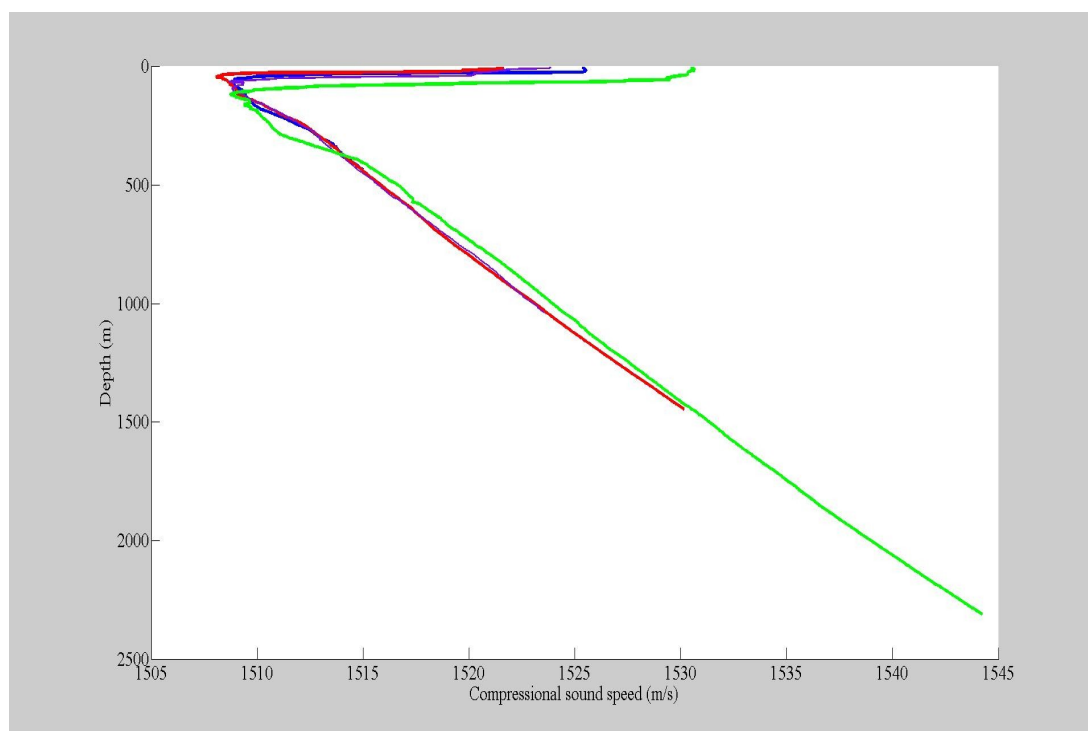


Illustrazione 10: Profili delle stazioni pelagiche di velocità del suono. Crociera Oceanografica MEDGOOS9 2007

A differenza dei profili costieri quelli pelagici mostrano andamenti della velocità del suono molto diversi in profondità. IL deep sound channel è distribuito fra i 60 e i 120 m. per le

stazioni a maggiore profondità (profilo rosso e verde) è possibile notare un andamento tipico del Tirreno centrale in cui la velocità del suono a livello del fondo supera quella in superficie, portando alla formazione di zone di convergenza acustiche. Queste zone sono in grado di incanalare i suoni permettendo una bassa attenuazione e quindi una maggiore propagazione nello spazio, seguendo un andamento quasi sinusoidale tra la superficie e il fondale (Jensen, 1994)

Risoluzione dell'equazione del sonar passivo

Per poter definire i valori delle sorgenti di rumore navale alle varie frequenze, le modalità con cui ognuna di esse si propaga e, a seguito del confronto con i suoni dei cetacei, le distanze minime a rischio di mascheramento, è necessario risolvere l'equazione del sonar passivo (Urlick, 1983, Jensen, 1994), che può essere applicata a qualsiasi ricevitore sia strumentale che animale:

$$RL = SL - TL + AG \quad , \text{ eq. 0}$$

dove i valori in dB al ricevitore Received Level, (RL) dipendono dall'intensità della sorgente a 1m (Source Level; SL), dall'attenuazione del mezzo di propagazione (Transmission Loss, TL) e dal guadagno associato che è ricevitore dipendente (Array Gain, AG).

Il principio di reciprocità

Partendo dalle misure eseguite con gli idrofoni, che rappresentano il RL dell'equazione 0, è possibile ottenere i valori di una data sorgente di rumore (SL), attraverso il calcolo del Transmission Loss, passando anche per la conoscenza del guadagno AG.

L'equazione 0 può essere quindi risolta rispetto a SL in base al Principio di Reciprocità, valido per le equazioni paraboliche (Nghiem-Phu, 1977), il quale prevede l'intercambiabilità di ricevitore e sorgente, in modo da evitare la necessità di ricalcolare il campo in ogni posizione.

In base a questo principio è stata risolta l'eq. 0 rispetto al Source Level (SL).

L'incognita fondamentale nella propagazione acustica è il transmission loss.

Il Calcolo del Transmission Loss

L'attenuazione nella propagazione del suono in mare è chiamata Transmission Loss e poiché è una funzione di molte variabili complesse da calcolare, viene stimata attraverso un modello numerico basato su equazioni paraboliche.

Poiché esistono differenti modelli matematici in grado di risolvere l'equazione d'onda per ottenere il valore del Transmission Loss, si è applicato il modello ad oggi fisicamente più accurato, in quanto oltre ad essere range-dipendente, considera anche le onde di taglio (shear wave) nel fondale marino, dando una descrizione dell'attenuazione del fondale sicuramente attendibile.

Il modello usato è incluso nell'Acoustic Toolbox User-Interface & Post-processor v.2.2 1^a distribuito dal Centre for Marine Science & Technology della Curtin University of Technology. (<http://cmst.curtin.edu.au/products/actoolbox.cfm>), è scritto per piattaforma Matlab[®] ed è gratuito. La versione del codice di propagazione usato è RAMSGeo (v.0.5C01.01.01).

Grazie a questo modello bidimensionale siamo in grado di descrivere il Transmission Loss di una data frequenza rispetto alla profondità e alla distanza orizzontale.

Il Modello RAM

Introduzione

Sebbene la trattazione matematica del modello Range Acoustic sia stata già ampiamente descritta (Jensen, 1994), vengono riportati di seguito gli elementi matematici più significativi per inquadrare tale strumento di calcolo.

I Range Acoustic Models possono essere efficacemente risolti con il metodo delle equazioni paraboliche (P.E. Leontovich, 1946; Fock, 1965; Tappert, 1977; Jensen, 1994), basandosi su soluzioni Slip Step Padé (Collins, 1993).che permettono l'utilizzo di ampi range nel dominio di calcolo, risultando l'algoritmo di equazioni paraboliche più efficiente ad oggi sviluppato (Collins, 1995). La range-dipendenza è trattata applicando una

correzione di risparmio energetico (Porter, 1991; Collins, 1992) sulla variazione dei parametri acustici con lo spazio. Una condizione iniziale (o di partenza del campo) è definita da un self starter (Collins, 1990, Cerderberg, 1995) che rappresenta l'approccio più accurato ed efficiente basato sul metodo delle equazioni paraboliche.

La soluzione numerica dell'equazione d'onda parabolica prevede la reiterazione delle soluzioni di un sistema tridiagonale di equazioni. Questo componente chiave dei R.A.M. riduce al minimo il numero di operazioni, mediante un sistema speciale di eliminazione che è particolarmente valido per i problemi che coinvolgono profondità variabili (Collins, 1990, Strang, 1993). L' algoritmo slip step Padé si basa sull'approssimazione di funzioni razionali, mentre il sistema tridiagonale delle equazioni che corrispondono a condizioni diverse delle approssimazioni razionali può essere risolto in parallelo per ottenere guadagno significativo in termini di efficienza.

La tecnica basata su equazioni paraboliche

Il metodo di calcolo si basa su equazioni paraboliche ipotizzando che l'energia in uscita domina l'energia retrodiffusa e fattorizzando l'operatore, nel dominio in frequenza, dell'equazione d'onda si ottiene un'equazione d'onda in uscita.

La funzione di un operatore viene quindi calcolata approssimativamente con una funzione razionale per ottenere delle equazioni che possono essere risolte numericamente. Con la riduzione di un problema ellittico da un valore limite a un valore iniziale in termini di range, i tempi di calcolo possono essere ridotti di diversi ordini di grandezza. La maggiore efficienza non va comunque a scapito della precisione, perché la dipendenza dal range è graduale (in modo che l'energia in uscita sia dominante) in molti ambienti oceanici.

Il sistema di riferimento è in coordinate cilindriche, dove il raggio r è la distanza orizzontale da una sorgente puntiforme, z è la profondità sotto la superficie dell'oceano, e θ è l'azimut. La propagazione cilindrica è ottenuta rimuovendo il fattore $r^{-1/2}$ dalla pressione p complessa. Il problema è ridotto a due dimensioni usando un'approssimazione di disaccoppiamento azimutale, che è valida quando la variazione orizzontale nel mezzo è sufficientemente graduale. La dipendenza dal range è ottenuta approssimando il mezzo di propagazione a una sequenza di regioni range-indipendenti. Il numero di regioni in cui si suddivide il dominio spaziale influenza la precisione spaziale o finale ottenuta.

Lontano dalla sorgente, p soddisfa le seguenti equazioni far-field in ciascuna delle regioni range-indipendenti:

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

Dove ρ è la densità, $k = (1 + i\eta\beta)\omega/c$ è il numero d'onda, ω è la frequenza circolare, c la velocità del suono, β è l'attenuazione in dB λ , e $\eta = (40\pi \log_{10} e)^{-1}$. Fattorizzando l'operatore dell'equazione 1 precedente si ottiene:

$$\left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_0(1+X)^{\frac{1}{2}} \right) \left(\frac{\partial}{\partial r} + ik_0(1+X)^{\frac{1}{2}} \right) p = 0 \quad .2$$

$$X = K_0^{-2} \left(\rho \frac{\partial}{\partial z} \frac{1}{\partial \rho} \frac{\partial}{\partial z} + k^2 - K_0^{-2} \right) \quad .3$$

Dove $k_0 = \omega/c_0$ e c_0 è la velocità di fase rappresentativa. Assumendo che l'energia uscente domina l'energia retrodiffusa, possiamo ottenere l'equazione d'onda uscente.

$$\frac{\partial p}{\partial r} = ik_0(1+X)^{1/2} p \quad .4$$

La cui soluzione formale è

$$p(r + \Delta r, z) = \exp(ik_0 \Delta r (1+X)^{1/2}) p(r, z) \quad .5$$

Dove Δr è lo step del range. Applicando un n-termine della funzione razionale per approssimare la funzione esponenziale, otteniamo:

$$p(r + \Delta r, z) = \exp(ik_0 \Delta r) \prod_{j=1}^n \left(\frac{1 + \alpha_{j,n} X}{1 + \beta_{j,n} X} \right) p(r, z) \quad .6$$

Questa equazione è studiata per un singolo processore.

Espandendo la funzione razionale nell'equazione precedente, attraverso frazioni parziali otteniamo:

$$p(r + \Delta r, z) = \exp(ik_0 \Delta r) \left(1 + \sum_{j=1}^n \frac{\gamma_{j,n} X}{1 + \beta_{j,n} X} \right) p(r, z) \quad .7$$

I coefficienti complessi $\alpha_{j,n}$ e $\beta_{j,n}$, sono definiti ponendo dei vincoli di precisione e stabilità nella funzione razionale. I vincoli di precisione garantiscono che lo spettro di propagazione $X \approx 0$ sia trattato con accuratezza. Lo scopo dei vincoli di stabilità, che sono essenziali per il self-starter e la correzione della conservazione di energia, è quello di annullare lo spettro evanescente $\text{Re}(X) < -1$. RAM calcola i coefficienti nella Eq. 6 inizialmente risolvendo un problema lineare per i coefficienti di un rapporto di due polinomiali di grado n , quindi utilizzando subroutine per trovare le radici dei polinomiali. I vincoli utilizzati in RAM sono che $2n - n_s$ derivati della funzione razionale sono corretti a $X = 0$ e che la funzione razionale si annulla in punti n_s nella regione evanescente. E' stato dimostrato che valori di $n_s = 1$ o 2 sono efficaci per la maggior parte dei problemi.

I vincoli di stabilità introducono una piccola quantità di attenuazione artificiale, che è insignificante per la maggior parte dei problemi, ma può essere significativo per la propagazione in acque profonde a intervalli molto lunghi. Tuttavia, in questo lavoro tali condizioni non sono verificate. Per gestire questa problema di precisione, RAM ha l'opzione di eliminare i vincoli di stabilità in una zona specifica.

Il self starter è un approccio preciso ed efficiente per l'ottenimento di una condizione iniziale dell'equazione 4. Per il caso di una sorgente lineare a $z = z_0$ in una geometria piana, la pressione complessa soddisfa:

$$\frac{\partial^2 p}{\partial x^2} + \rho \frac{\partial}{\partial z} \left(\frac{1}{\rho} \frac{\partial p}{\partial z} \right) + k^2 p = 2i \delta(x) \delta(z - z_0) \quad .8$$

integrando l'equazione precedente in un intervallo arbitrariamente piccolo x , rispetto all'origine, si ottiene:

$$\lim_{x \rightarrow 0} \frac{\partial p}{\partial x} = i \delta(z - z_0) \quad .9$$

Sostituendo ora l'equazione d'onda uscente nell'equazione precedente otteniamo:

$$k_0(1+X)^{\frac{1}{2}} p = \delta(z - z_0) \quad .10$$

Poiché la condizione iniziale non può essere valutata in $x=0$ a causa di una singolarità nel punto esatto della sorgente, si aggira tale ostacolo valutando il campo in un punto $x=x_0$ dove x_0 è nell'ordine della lunghezza d'onda. Sostituendo l'eq. 5 nell'eq. 9 con x_0 al posto di Δr , si arriva a:

$$p(x_0, r) = \frac{\exp(iK_0 x_0 (1+X)^{1/2})}{k_0(1+X)^{1/2}} \delta(z - z_0) \quad .11$$

Il self-starter richiede una modifica nel caso in cui la sorgente puntiforme si trovi in condizioni di geometria cilindrica.

La rappresentazione normal-mode del campo acustico usato nell'equazione. 10 è stata utilizzata per mostrare che il self-starter al punti di origine è nella forma:

$$p(r_0, r) = \frac{\exp(iK_0 r_0 (1+X)^{1/2})}{k_0(1+X)^{1/4}} \delta(z - z_0) \quad .12$$

Per evitare punti singolari nelle soluzioni intermedie, il RAM risolve l'eq. 12 con il seguente approccio (Leontovich, 1946):

$$(1+X)^2 q(z) = k_0^{-1/2} \delta(z - z_0) \quad .13$$

$$p(r_0, z) = (1+X)^{7/4} \exp(ik_0 r_0 (1+X)^{1/2}) q(z) \quad .14.$$

La funzione intermedia q ha due derivate continue. Per approssimare l'operatore nell'equazione 14 è usata una funzione razionale lineare. La soluzione avanza attraverso

ciascuna delle regioni in cui è suddiviso il dominio spaziale usando l'eq. 6 o 7. Comunque è necessario specificare le condizioni al contorno tra le diverse regioni. Le soluzioni più accurate possono essere ottenute attraverso la conservazione del flusso dell'energia

$$E = \Im \int \rho^{-1} p \frac{\partial p}{\partial r} \delta z \quad .15$$

La rappresentazione mediante normal-mode (Collins*,1995) mostra che il flusso di energia può essere conservato attraverso la conservazione della quantità lineare,

$$A = \rho^{-1/2} k_0^{1/2} (1 + X)^{1/4} p \quad .16$$

Al limite di una propagazione quasi orizzontale abbiamo che

$$A \sim p/a \quad .17$$

con $\alpha = (\rho k)^{1/2}$.

Ciò permette accurate soluzioni per la maggior parte dei problemi in oceanografia acustica. In questo lavoro è stato fatto anche un'analisi tra i risultati prodotti dal modello a determinate distanze e profondità con le misure eseguite con idrofono calibrato.

Per la conservazione dell'energia, R.A.M è implementato usando la variabile dipendente modificata $\tilde{p} = p/a$ e l'operatore di profondità modificato

$$\tilde{X} = k_0^{-2} \left(\frac{\partial}{\alpha} \frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\rho} \frac{\partial}{\partial z} \alpha + k^2 - k_0^{-2} \right) \quad .18$$

Dal momento che diverse quantità sono conservate nelle interfacce orizzontali (p) e verticali (p / α) , le oscillazioni di Gibbs possono verificarsi per i problemi che coinvolgono le interfacce in pendenza.

L'operatore di profondità è discretizzato con il metodo di Galerkin come descritto da Collins M.D. (1991). Questo approccio per la sostituzione dell'operatore di profondità attraverso una matrice tridiagonale permette di manipolare le variazioni di profondità. Dopo la discretizzazione in profondità, le soluzioni numeriche coinvolgono ripetutamente il sistema di soluzione delle equazioni tridiagonali. L'eliminazione di Gauss verso le voci al di sotto della diagonale principale è seguita da una retro sostituzione verso l'esterno. Le voci in prossimità dell'interfaccia sul fondo quando la batimetrie varia, causano la ripetizione dell'eliminazione.

Le variabili introdotte nel modello RAMSGeo.

Il sistema di coordinate usate dal RAMSGeo considera la profondità (m) sull'asse delle ordinate positive verso il basso, e la distanza(m) sull'asse della scisse crescenti.

Le simulazioni del modello prevedono tre categorie di variabili da introdurre:

1. Acoustic Environment;
2. Code-Independent propagation parameter;
3. Code-Dependent propagation parameter.

1 Acoustic Environment

I due ambienti acustici considerati, per il calcolo del Transmission Loss sono suddivisi così come previsto dal modello in layer definiti dalle stazioni di misura.

Tabella riassuntiva ambiente costiero di Civitavecchia:

Distanza orizzontale	Nome layer	Posizione (Lat.,Long.)
0-1900m	Stz 1	N42°05' 50.3";E11°45' 37.1"
1900-3800m	Stz2	N42°05' 08.2";E11°44' 33.9"
3800-5600m	Stz 3	N42°04' 28.2";E11°43' 35.3"
5600-7400m	Stz 4	N42°03' 46.9";E11°42' 37.2"
7400-9400m	Stz 5	N42°03' 05.6";E11°41' 38.3"
9400-11200m	Stz 6	N42°02' 23.6";E11°40' 40.2"
11200-17000m	Stz 7	N42° 01'40.5";E11°39' 41.4"

Il range di interpolazione acustica orizzontale è di 100m, ed è applicato all'intero dominio di calcolo (17km).

Tabella riassuntiva ambiente pelagico del Tirreno Centrale:

Distanza orizzontale	Nome layer	Posizione (Lat., Long.)
0-56.5km	A5	N42°21'34.8",E10°25'31.8"
56.5-118km	A6	N41°55'01.8",E10°45'48.0"
118-184km	A7	N41°26'42.0",E11°08'21.0"
184-220km	A8	N40°55'33.6",E11°31'55.8"

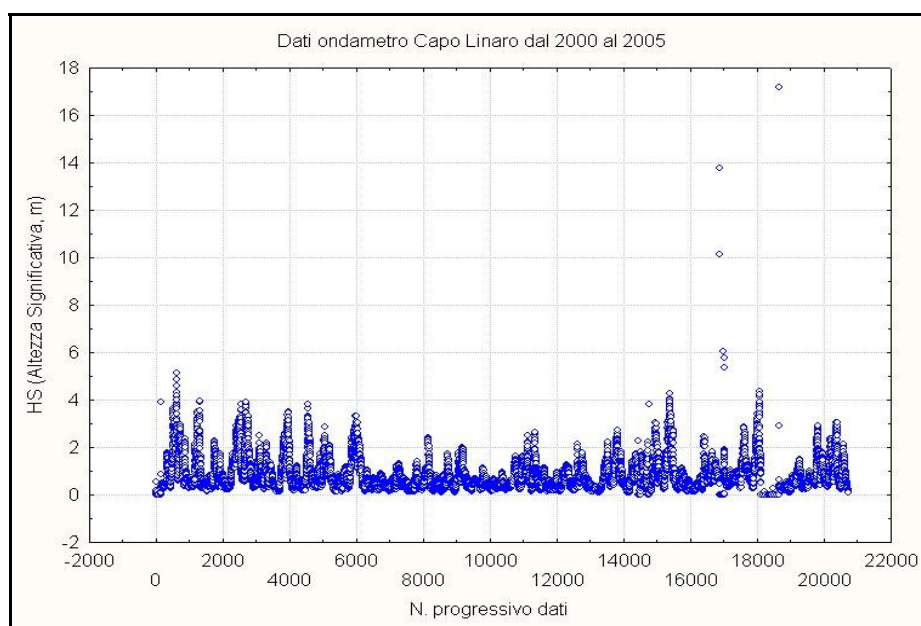
L'interpolazione acustica in questo secondo ambiente è di 1000m.

L'assunto fatto a priori per ogni ambiente è di considerare come costanti le grandezze inserite in ogni layer per tutto l'intervallo orizzontale dello stesso.

Per ogni layer si inseriscono i valori specifici suddivisi in colonna d'acqua e fondale:

Colonna d'acqua

Il primo parametro valutato è il valore RMS dell'altezza d'onda significativa (HS), che è stato considerato uguale per ogni layer in funzione dei dati in serie disponibili dalla boa ondometrica di capo linaro (42° 00' 0.0" lat. N., 11° 46' 36.1" long E.), disponibile su www.idromare.it). Il valore RMS usato è di 0,76m, come è emerso dai risultati statistici nell'illustrazione 11



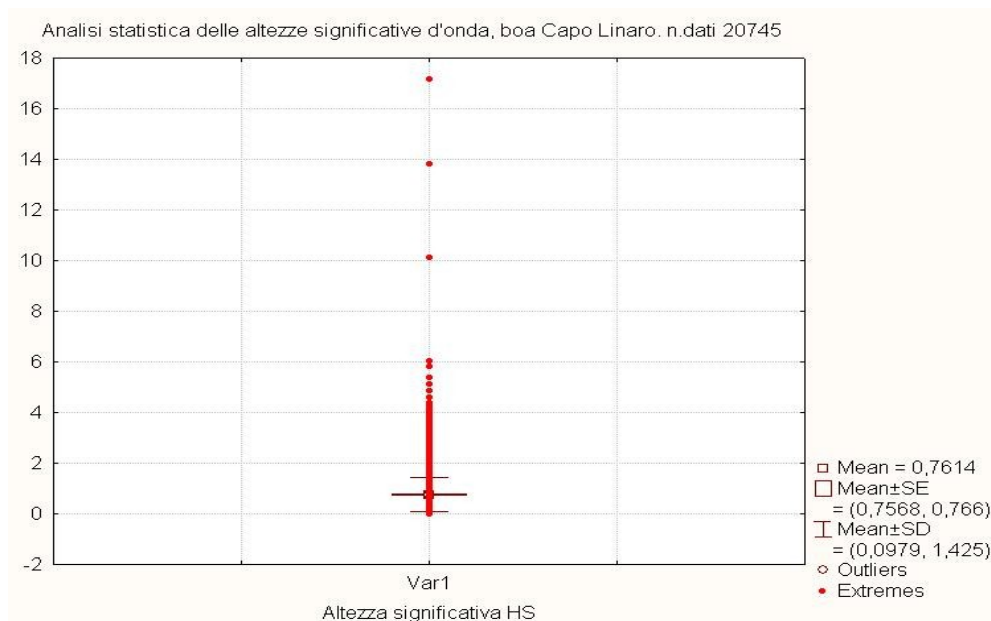


Illustrazione 11: analisi statistica dei dati ondametrici

Per ogni stazione di misura sono stati acquisite le seguenti variabili:

- Profondità;
- Temperatura;
- Salinità.

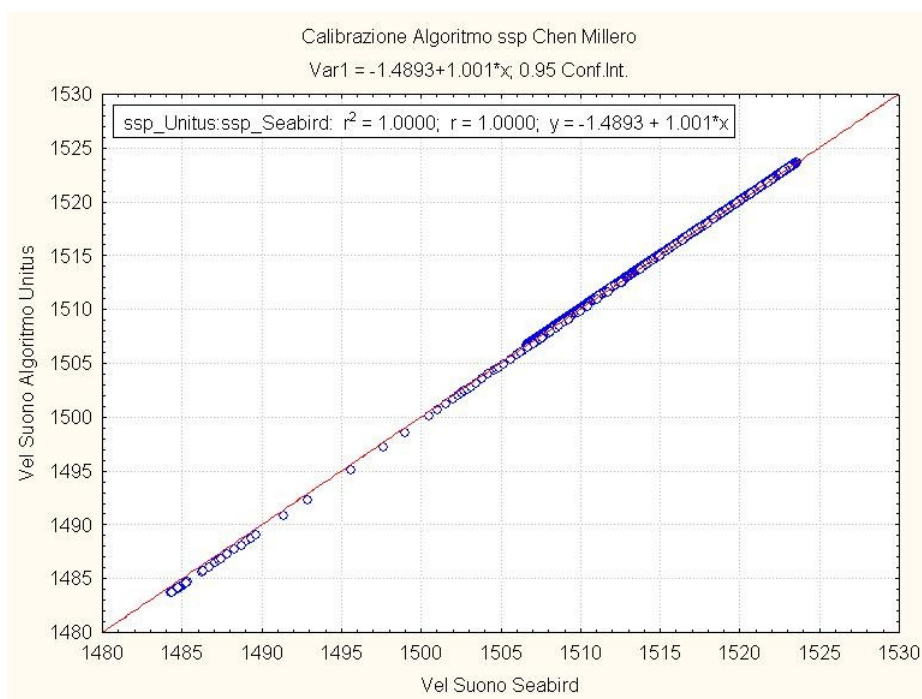
Poiché il modello necessita di profili di velocità del suono e densità, è stata appositamente scritta una funzione Matlab[®] che li deriva dai profili grezzi della IDRONAUT 316 e della SBE911. La funzione è stata integrata nell'ACTUP come ottimizzazione. L'algoritmo di calcolo della densità è preso da Millero (1980), mentre le versioni disponibili per il calcolo della velocità del suono sono ricavate da Mackenzie (1981), Del Grosso (1974), Chen and Millero (1977) e l'equazione di stato dell'acqua di mare (EOS80).

Nella funzione è inserito un sistema di analisi della qualità dei dati, che prevede il taglio degli spikes strumentali e l'eliminazione dei dati in risalita, basandosi sullo schema del protocollo NRT.QC (Manzella et al.,2002).

Infine vengono prodotte tre colonne relative a: Shear sound speed (m/s); Compressional wave absorption (dB/lambda)e Compressional wave attenuation costanti per tutta la

colonna e pari a 0.

Per la verifica degli algoritmi è stato eseguito un confronto fra quello utilizzato e il software di elaborazione della Seabird che ha portato al seguente risultato:



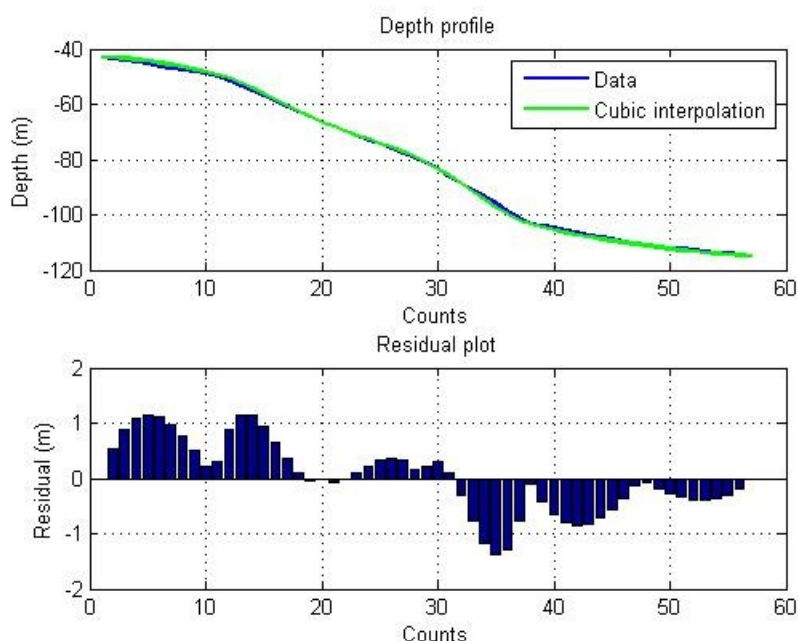
Confronto tra algoritmo di ottimizzazione del modello RAMSGeo per l'introduzione della velocità del suono e il software di elaborazione della Seabird.

Il fondale marino

Anche per il fondale marino è stato inserito come primo parametro l'altezza RMS dei ripple marks, che è stata stimata di **0,08 m**. Il metodo di stima usato in questo caso è empirico e basato su osservazioni nei bassi fondali inferiori a 20m e stimando una riduzione del 50% alla distanza limite delle interazioni delle onde superficiali con il fondale, ricavato con $\lambda/2$. Sono state eseguite alcune simulazioni per verificare la differenza tra un valore 0,08m e 0,01m, stima di minima in mancanza di dati. Le differenze nelle simulazioni sono inferiori al 2% di scarto.

Il profilo batimetrico nella campagna di misure costiere è inserito a partire dai valori acquisiti dell'ecoscandaglio LOWRANCE LMS-525C DF e per impedire la formazione di singolarità nei calcoli del modello, è stata inserita una routine di interpolazione cubica a

uno step di 200 m e confrontata successivamente con i dati originali. Questo approccio è stato comunicato personalmente da Alec Duncan della Curtin University, sviluppatore del ACTUP.



Confronto fra i dati batimetrici originali e quelli inseriti nel modello a seguito di interpolazione cubica.

La routine è stata aggiunta al ACTUP come ottimizzazione. Dalla proiezione dei residuali notiamo come la funzione di interpolazione abbia uno scarto massimo di circa 1,5m in difetto e 1,1m in eccesso. Questo tipo di interpolazione è stato scelto a seguito dell'analisi di sensibilità del modello che verrà illustrata in seguito, finalizzata alla valutazione di tutti i parametri che influenzano la produzione di errori nel calcolo.

Per quanto riguarda il profilo batimetrico nella campagna di misure pelagiche MEDGOOS9, i dati acquisiti dall'ecoscandaglio di bordo della N/O Urania del CNR, non sono stati interpolati come nel caso precedente a causa della notevole estensione del dominio orizzontale di calcolo. L'analisi di convergenza del modello ha imposto di mantenere una suddivisione massima in 19 punti di profondità. Suddivisioni ulteriori hanno portato al superamento dei punti massimi di calcolo previsti, azzerando così le matrici in uscita e rendendo nulle le simulazioni.

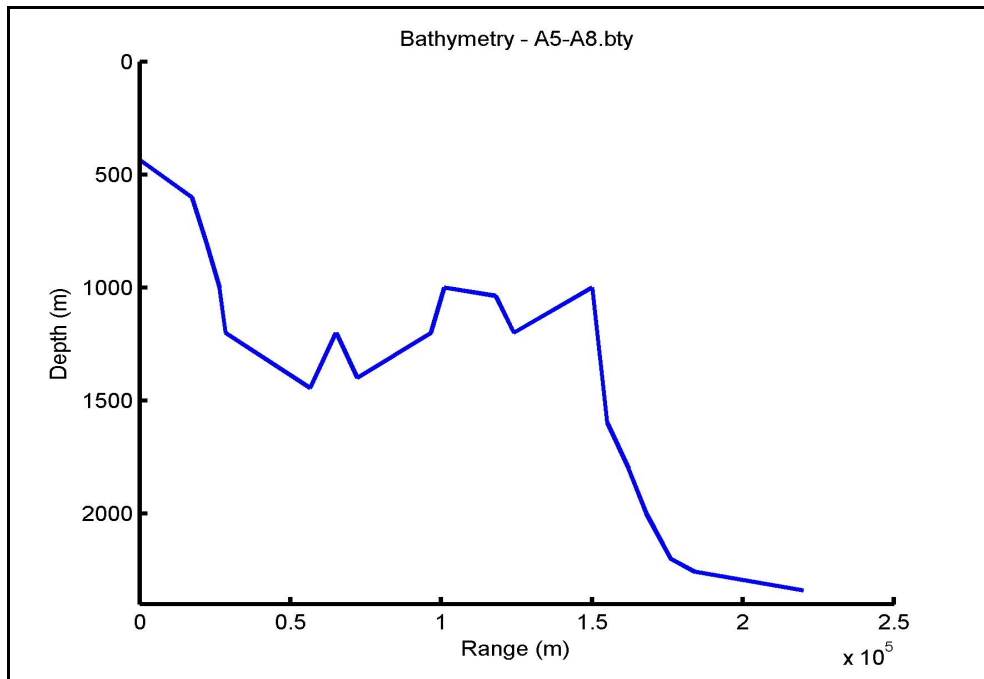
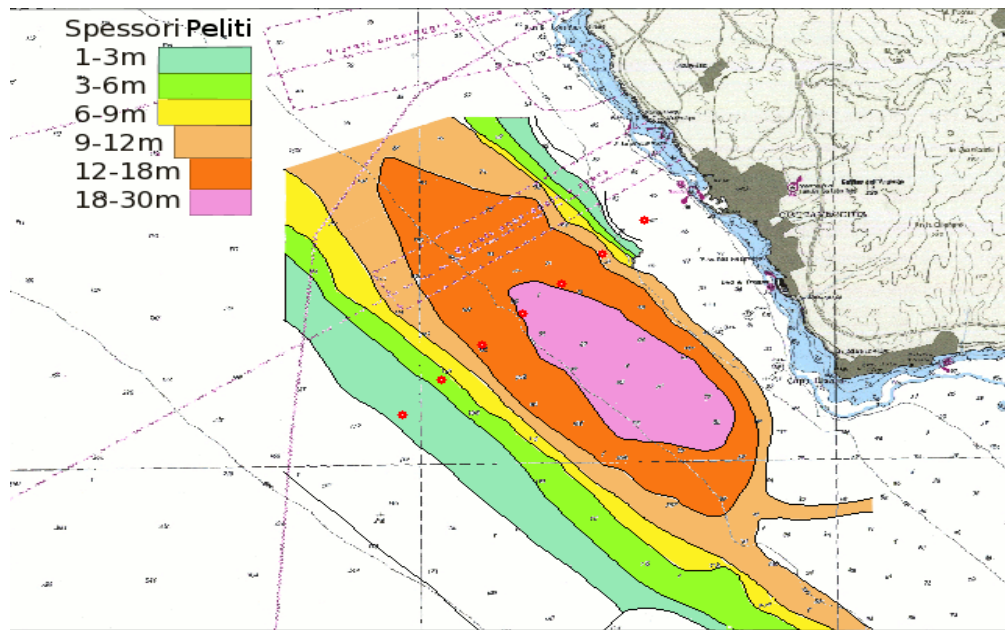


Illustrazione 12: Profilo batimetrico ambiente tirrenico pelagico, notare la spezzata che caratterizza il profilo è distribuita su 220 km di distanza.

Le variabili che caratterizzano acusticamente il fondale sono:

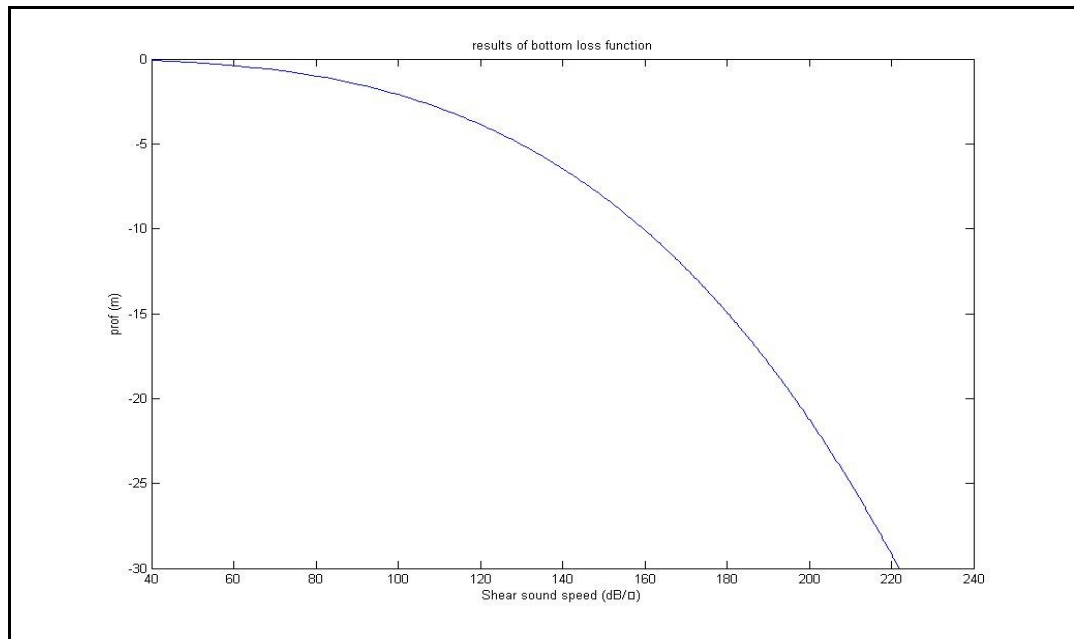
1. Potenza e tipologia dello strato sedimentario;
2. Velocità del Suono (m/s);
3. densità (kg/m^3);
4. Shear sound speed (m/s);
5. compressional wave absorption (dB/lambda);
6. shear wave absorption (dB/lambda).

Per la tipologia e lo spessore degli strati sedimentari si è fatto riferimento all'atlante delle spiagge del lazio (La Monica et al., 1991) , da cui è stata ricavata la seguente mappa, in cui in sono segnati in rosso la stazioni di misura ctd e gli spessori del sedimentari, chi si sono rivelati pelitici, in legenda. Alla classificazione generica di peliti si è fatto riferimento al silt che rappresenta generalmente la classe più abbondante.



Carta stratigrafica di Civitavecchia indicante gli spessori pelitici e le stazioni di misura CTD

È possibile notare come la distribuzione degli spessori pelitici segua un andamento quasi gaussiano da costa-largo, mentre la prima stazione sotto costa è risultata non caratterizzabile dal punto di vista sedimentologico. Per la descrizione dei parametri acustici si è fatto riferimento a Jensen (1994) per l'effective acoustic penetration (considerando per le zone costiere il primo strato sedimentario), shear sound speed (m/s), compressional wave absorption (dB/lambda) e lo shear wave absorption (dB/lambda). Mentre da Hamilton (1980) è stato ricavato il modello per la descrizione della variazione dello shear sound speed con la profondità, rappresentata nella seguente figura:



derivata dalla seguente formula:

$$c_s = 80z^{0,3} \quad .19$$

z =profondità(m).

Per i fondali considerati in entrambe le simulazioni è stato scelto lo stesso tipo di sedimento siltoso.

Zona	Spessore	Compression al wave speed	Share wave speed	Compreession al wave attenuation	Share wave attenuation
Civitavecchia	In base alla carta stratigrafica	1575 (m/s)	eq.19	1,0 (dB/λp)	1,5 (dB/λs)
Tirreno	45m	1575 (m/s)	eq.19	1,0 (dB/λp)	1,5 (dB/λs)

2. Code-Independent propagation parameter.

In questa sezione del modello vengono definiti i parametri di base che descrivono lo scenario di propagazione. La scelta dei parametri per i due ambienti di simulazione è di seguito riportata.

Parametri	Civitavecchia	Tirreno
Frequenze	Da 20 a 16000 Hz in terze d'ottava	Da 20 a 16000 Hz in terze d'ottava
Profondità sorgente	6-8m	6-8m
Profondità ricevitore	10m	10m
Range minimo	0m	0m
Range massimo	17km	220km
Slices del range	200	2000

Note:

1. Il range di frequenze è funzione delle proprietà fisiche dell'idrofono e degli intervalli spettrali delle navi e dei cetacei in oggetto.

20 25 31,5 40 50 63 80 100 125 160 200 250 315 400 500 630 800 1000 1250 1600 2000 2500 3150 4000 5000 6300 8000 10000 12500 16000

Tabella 2: 30 frequenze centrali simulate.

2. Sebbene la trattazione modellistica della sorgente possa essere molto complessa, in questo caso per semplificazione imposta del modello si considera l'elica come riferimento principale del rumore irradiato in mare, la cui profondità è definita dal pescaggio.
3. Fa riferimento alla profondità a cui è stato calato l'idrofono durante tutte le misure in mare.

3. Code Dependent propagation parameters

La sezione code dependent è in realtà il core del modello poiché da esso dipendono i limiti di risoluzione spaziale nel calcolo. A seconda dell'estensione del dominio è necessario operare un'analisi di sensibilità del modello per impedire l'overflow di dati, che possono causare errori.

I parametri usati nelle due simulazioni sono riassunti in tabella:

Parametro	Civitavecchia	Tirreno
Depth resolution	0.5-2	2.1-10
Min. OP grid depth Resolution (m)	10	100
Relative range resolution (0-5)	2	2
Min OP grid range resolution (m)	100	1000
N° Therm in Padé expansion	6	6

Tabella 3: Parametri code dependent usati nelle simulazioni.

Segnali acustici della Balaenoptera physalus nel Mar Mediterraneo.

La balenottera comune, presente in tutto il Mediterraneo ha una distribuzione legata a 3 regioni elencate in ordine di abbondanza relativa (Notarbartolo et al., 2003):

- Il bacino corso-ligure-provenzale e il Golfo del Leone;
- Il bacino tirrenico, adriatico e ionico;
- Il bacino egeo e levantino.

Le attività vocali della Balenottera comune sono piuttosto semplici dal punto di vista acustico, rispetto ad altri misticeti. Il suono comunemente emesso è il cosiddetto “20 Hz pulse” con un PSD (Power Spectral Density) di 170 dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$ (Clarck, 2002), centrata su 20 Hz. La durata dei segnali è variabile e generalmente sono prodotti in sequenze stereotipate. È possibile riassumere le caratteristiche principali attualmente note di questa specie nella seguente tabella:

Durata media impulso	0,5-1,5 sec.
Intervallo medio fra impulsi	7-26 sec.
Range intervallo fra impulsi	6-46 sec.
Range durata della sequenza	3-4;15-21 min.
“Rests” (periodo di silenzio fra sequenze)	1-5 min.

Tabella 4: *Principali caratteristiche acustiche dei segnali emessi dalla Balaenoptera physalus secondo Clarck (2002)*

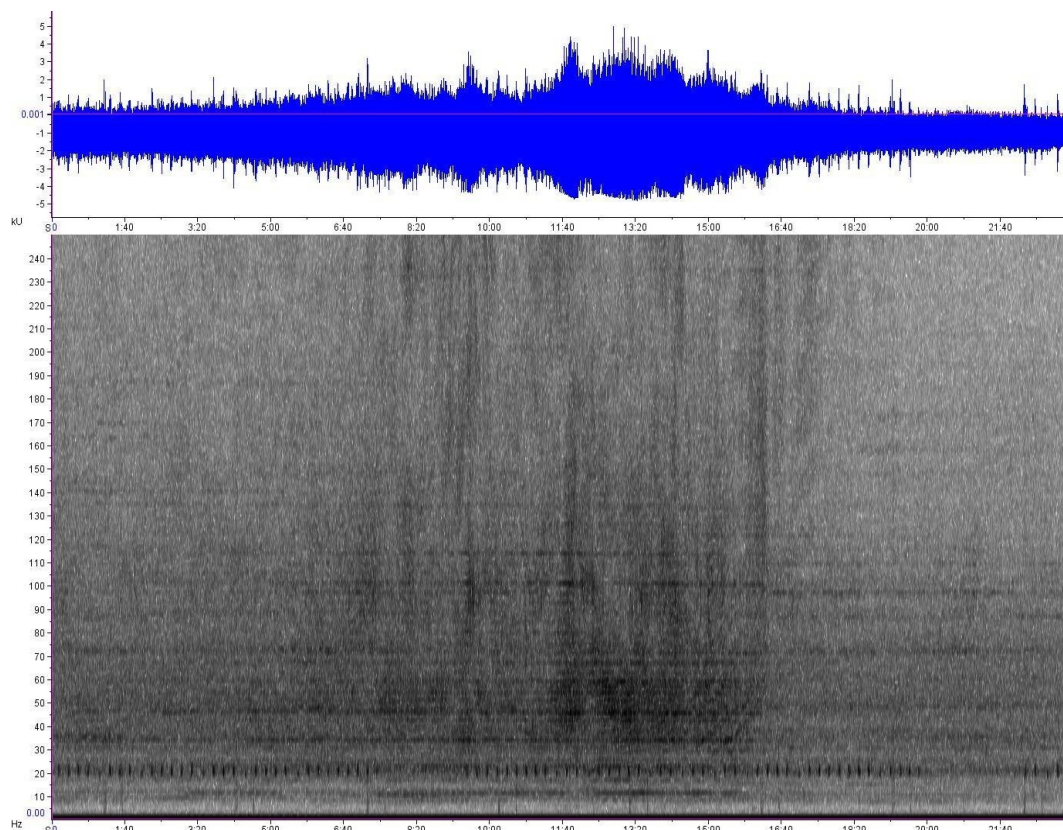


Illustrazione 13: *Balenottera comune in presenza di un traghetto, evidente la sequenza di segnali tra 19 e 24 Hz.*

In questa rappresentazione grafica vengono riportati la forma d'onda e lo spettro in frequenza di un traghetto in presenza di una *Balaenoptera physalus*.

Lo spettro in frequenza è stato delimitato in un intervallo compreso tra 0 Hz e 250 Hz in cui è particolarmente visibile l'interazione fra il rumore navale e il segnale della *Balaenoptera physalus*.

Come già mostrato da Clark (2002) la *Balaenoptera physalus* emette dei segnali tra i 19 e i 24 Hz, nel nostro caso con frequenza di 1/7 Hz per l'intera durata della registrazione di 23'20" e con un'intensità acustica rispetto al rumore di fondo maggiore di 18.8 dB.

Il rumore navale è particolarmente visibile nella parte centrale del grafico, relativa al CPA (Closest Point of Arrival) in cui le intensità alle varie frequenze sono più elevate, e la prima armonica si sovrappone al segnale della *Balaenoptera physalus*. Nell'intervallo di tempo compreso fra i 7'10" e i 9' è visibile il completo mascheramento.

La variabilità in frequenza dello spettro navale rispetto a quella della *Balaenoptera physalus*, è dovuta al moto relativo rispetto all'idrofono fisso.

Il rumore navale riferito al CPA risulta predominare sul rumore di fondo a partire

dall'armonica fondamentale di 10-12 Hz ai 100 Hz e oltre fino ai 500 Hz, mostrando uno spettro continuo.

Come già indicato da Ross (1987) lo spettro di rumore generato dalle navi tra i 5 Hz e i 50 Hz è dovuto principalmente alla cavitazione delle eliche, che quindi sono il principale elemento di interazione acustica con i segnali emessi dalla *Balaenoptera physalus* in questa registrazione. In presenza di questo evento mascherante la non sembra esserci una evidente reazione da parte dell'individuo.

RISULTATI e DISCUSSIONE

Transmission Loss

I valori di transmission loss ricavati dal modello sono stati utilizzati per calcolare: i Source Levels del rumore navale, il Received Level in ambiente marino e per le distanze di mascheramento acustico con i cetacei considerati, esplicitando l'equazione del sonar passivo secondo le diverse variabili d'interesse.

Nella fase successiva il valori sono stati introdotti nell'eq. A

Le frequenze presentate nei risultati fanno riferimento al valore centrale in 1/3 di ottava, in cui sono noti ad oggi i segnali della balenottera comune, ossia 20Hz.

Il calcolo del transmission loss ha richiesto tempi di calcolo elevati con macchine a singolo processore. Poiché uno degli obiettivi secondari di questo lavoro è l'applicabilità generale dei metodi presentati, abbiamo usato il un tablet pc ASPIRE ONE della ACER® con processore intel Atom, cpu N270 @1.66 Ghz e 1GHz di R.A.M., (macchina calcolatrice a basso costo) che ha riportato i seguenti tempi di calcolo esemplificativi:

Ambiente Simulato / Frequenza	Tempo
Civitavecchia / 20 Hz	45'
MedGOOS9 /20 Hz	8h 30'
Civitavecchia / 2100 Hz	3h 15'
MedGOOS9 / 2100 Hz	30h
Civitavecchia / 16000 Hz	8h
MedGOOS9 /16000 Hz	65h

Tabella 5: tempi di calcolo per ambiente simulato e frequenza

Nel dominio costiero di Civitavecchia, basandoci sulla tabella 2 delle frequenze a pg. 48, vengono elencati i valori di transmission loss rispetto al range, Considerando un ricevitore posizionato a 20 m di profondità (Z_r in figura) e la profonità della sorgente a 8m (Z_s in fig.). La Z_s fa riferimento al range di profondità delle eliche delle navi, mentre il Z_r fa riferimento al minimo step di calcolo verticale del modello in ambiente pelagico (usato

quindi per eseguire dei confronti)

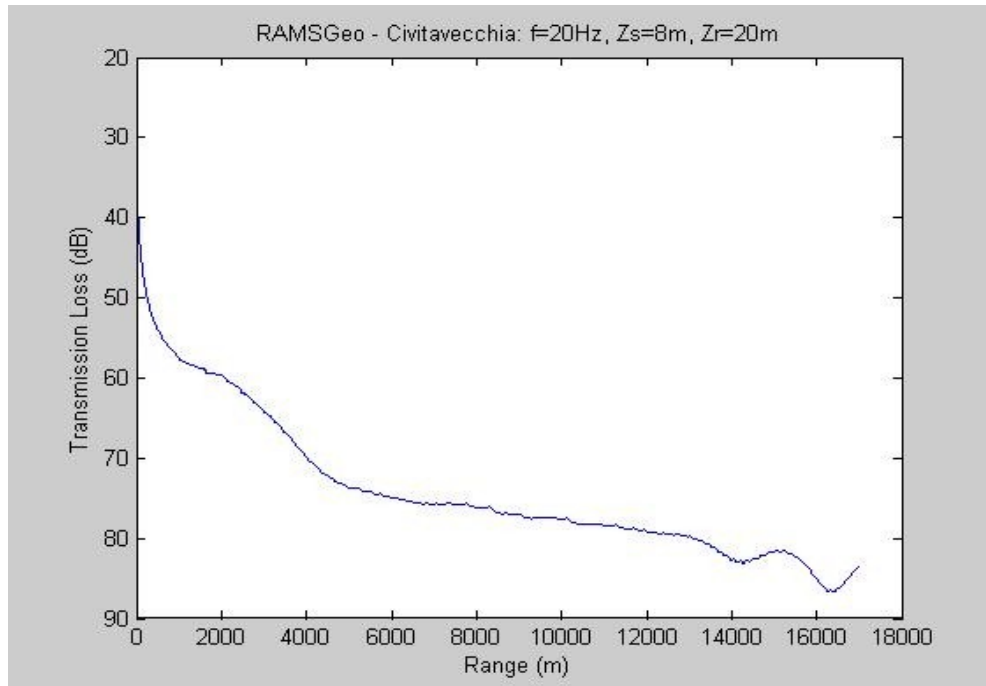


Illustrazione 14: Transmission loss a 20 Hz nel dominio costiero di Civitavecchia a 20 m di profondità

Nell'illustrazione 16 è possibile notare il cut-off alle basse frequenze caratteristico delle aree costiere, poiché a causa della grande capacità di penetrazione nel sedimento e delle numerose riflessioni superficie-fondo le frequenze più basse sono particolarmente attenuate. E' stata calcolata la soglia del taglio in frequenza, in base alle seguente equazione:

$$f_0 = \frac{c_w}{4D \sqrt{1 - (c_w/c_b)^2}} \quad \text{eq. 19}$$

dove c_w = velocità del suono, D = profondità, c_b = vel. suono nel sedimento. Nell'area di studio in questione, considerando il primo sottodominio, la soglia calcolata è di **33 Hz**. Sebbene generalmente si possa applicare come modello concettuale che all'aumentare della frequenza un segnale tonale venga attenuato in maniera direttamente proporzionale, nel caso degli ambienti costieri questo modello concettuale non è applicabile sotto la soglia del cut-off.

Il taglio in frequenza determina un Transmission Loss di circa 41 dB a 50m di distanza

dalla sorgente, proseguendo con un andamento quasi logaritmico fino a raggiungere il massimo di attenuazione dopo 16 km con un valore di circa 87 dB.

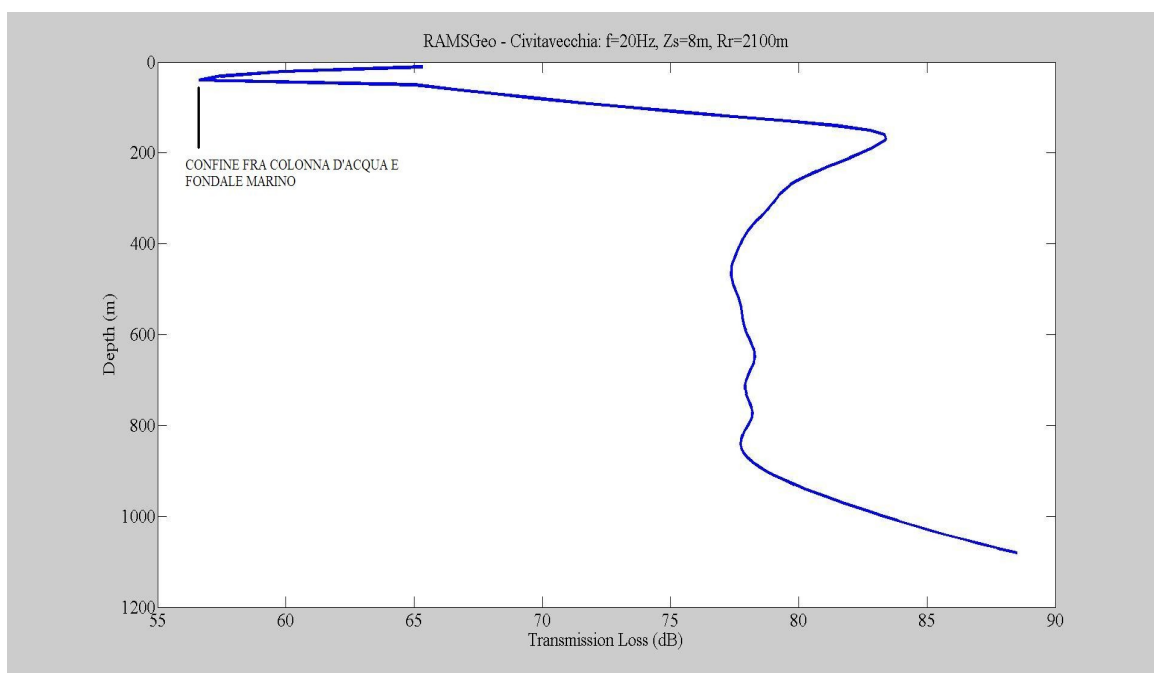


Illustrazione 15: TL vs Depth a 2100 m di distanza dalla sorgente. Il contributo del fondale all'attenuazione della propagazione è molto alto.

L'attenuazione del rumore rispetto la profondità della colonna d'acqua tende a diminuire con la profondità fino al confine con il fondale (Ill. 14), dove a causa della notevole impedenza acustica fra i due differenti mezzi si verifica un brusco aumento fino alla soglia degli 80 dB.

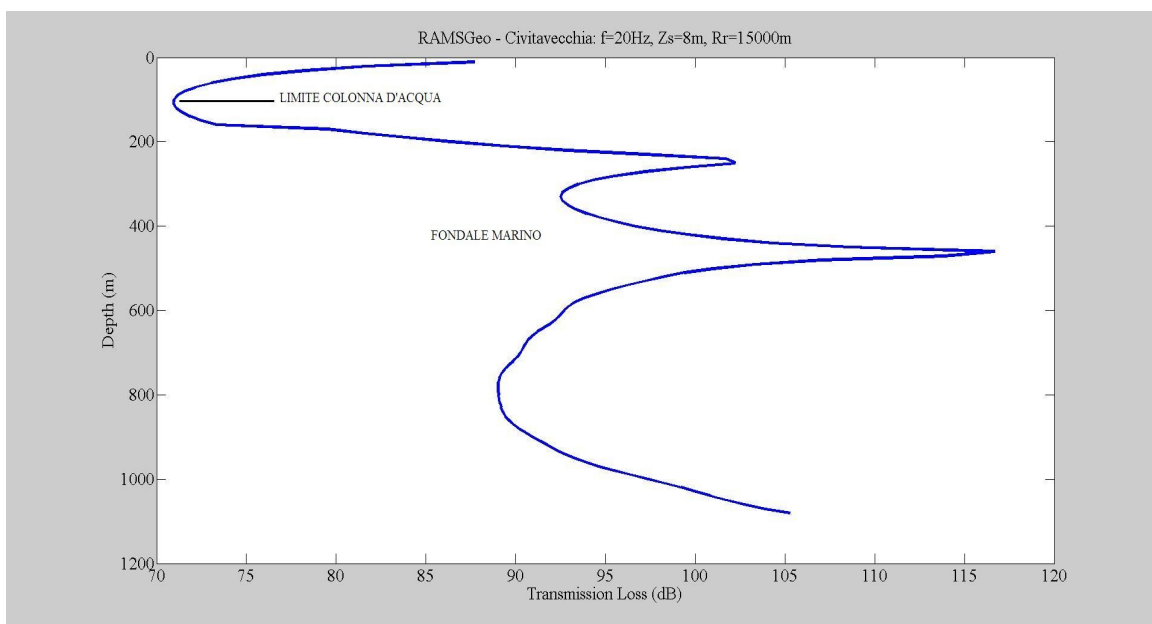


Illustrazione 16: TL vs Depth a 15 km di distanza dalla sorgente. Rappresentazione del contributo sia del mezzo marino che del fondale.

Stesso tipo di andamento dell'attenuazione si verifica ai limiti del dominio costiero simulato (15km Ill. 17).

L'ambiente pelagico, a differenza di quello costiero mostra dei valori di attenuazione nettamente minori, come mostrato nell'illustrazione 18, dove a 500m di distanza dalla sorgente il TL non raggiunge i 33 dB.

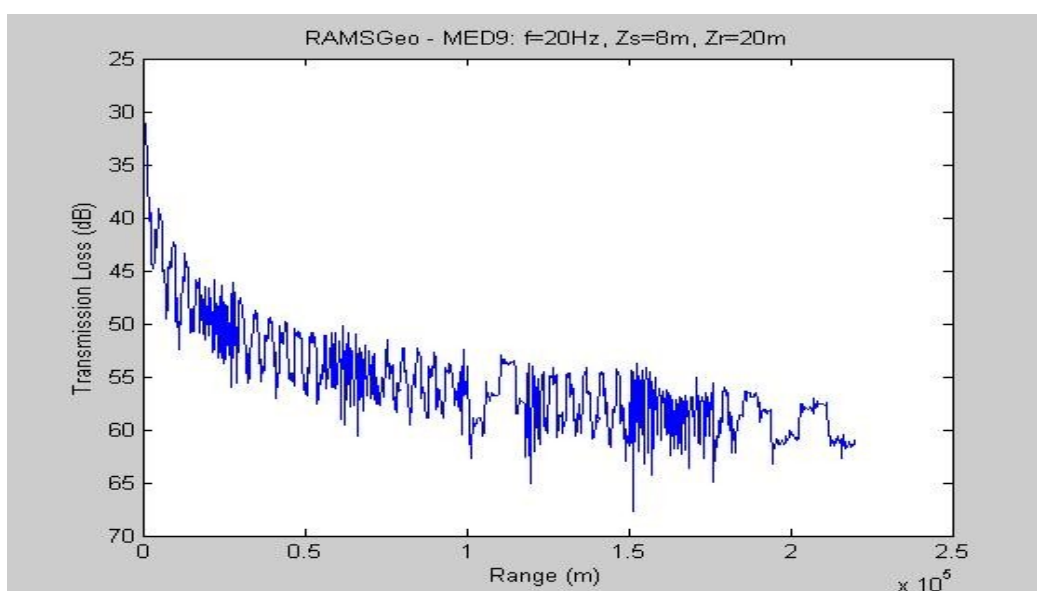


Illustrazione 17: Transmission Loss nel dominio pelagico del Tirreno, a 20 m di profondità

Il particolare andamento del Transmission Loss mostra come la propagazione in ambiente pelagico sia caratterizzata da notevoli fenomeni di interferenza anche alle basse frequenze. L'andamento dell'attenuazione nello spazio anche in questo ambiente è quasi logaritmico, mostrando un plateau di circa 60 dB dopo i 100 km di distanza.

A differenza del dominio costiero l'attenuazione lungo l'asse della profondità in quello pelagico ha variazioni meno marcate tra colonna d'acqua e fondale.

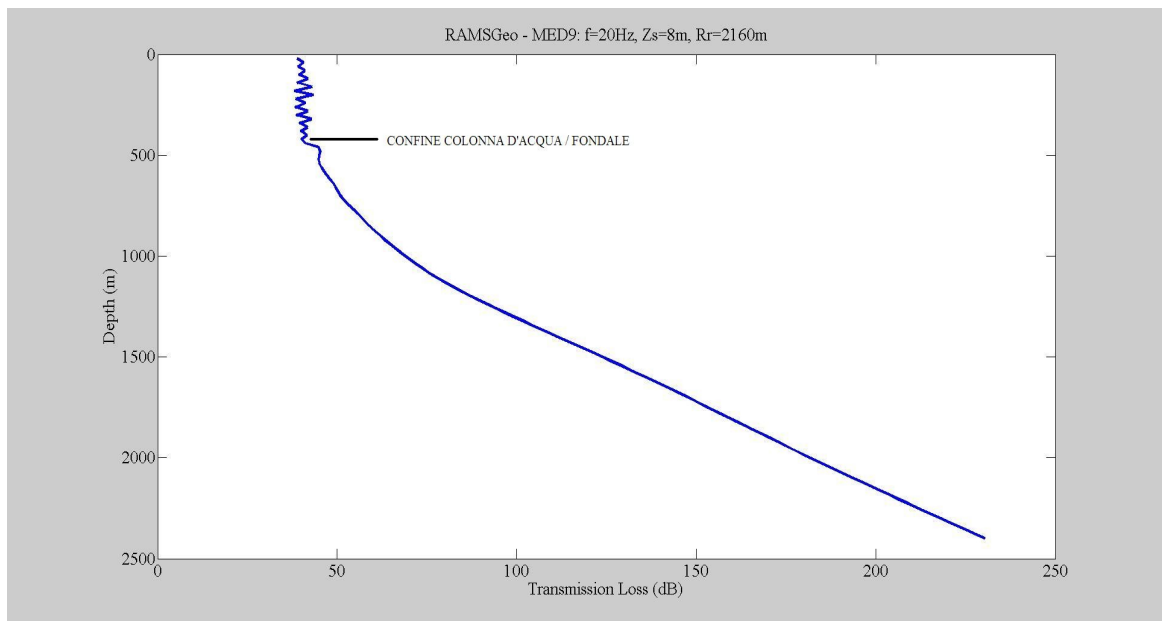


Illustrazione 18: TL vs Depth a 2160 m di distanza dalla sorgente. l'andamento dell'attenuazione varia nella colonna d'acqua ed è molto regolare lungo il sedimento.

Questo risultato non è attualmente confrontabile con altri citabili (poiché non reperiti), inoltre la causa della notevole differenza nel profilo di attenuazione all'interno del sedimento tra ambiente costiero e pelagico (ill.14-15,17-18), è da ricercarsi esclusivamente nella soluzione delle matrici tridiagonali di accoppiamento al boundary layer, poiché le caratteristiche acustiche del fondale sono uguali per assunto.

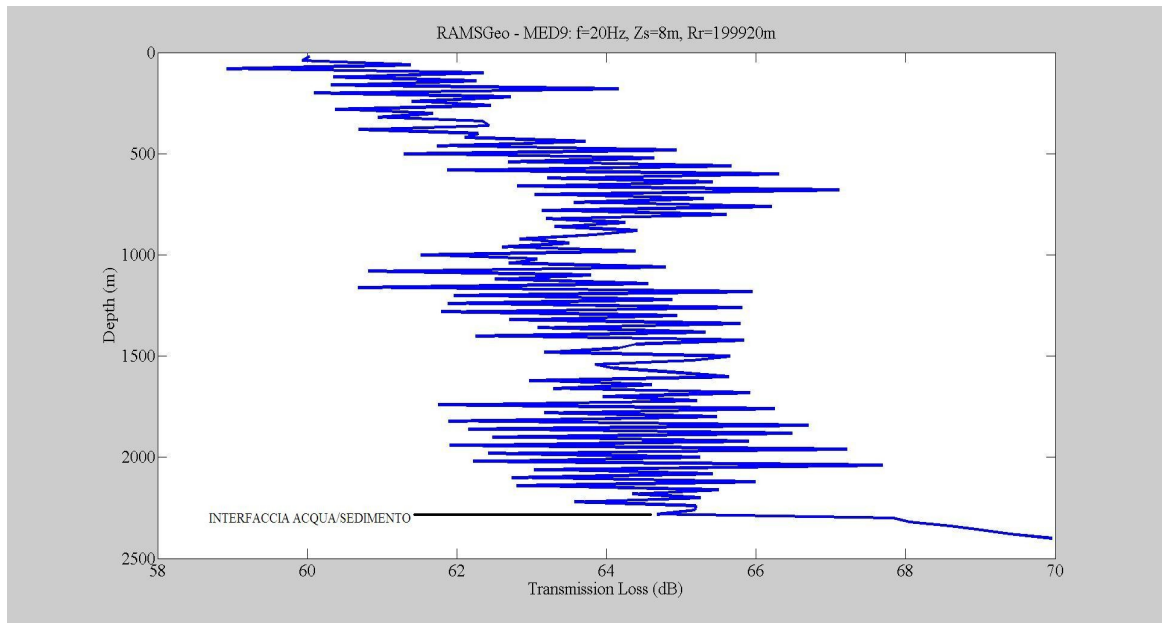


Illustrazione 19: TL vs Depth a 200 km di distanza dalla sorgente, quota batimetrica 2300m.

Sebbene con intervalli diversi i profili di attenuazione lungo l'asse della profondità nella colonna d'acqua, si presentano molto variabili. I risultati del Modello RAMSGeo non hanno subito nessun processo di 'smoothing' e probabilmente il loro andamento reale è tracciabile secondo valori interpolabili rispetto a quelli prodotti. Poiché questo è un risultato modellistico e non fa riferimento ad andamenti noti a priori, viene lasciato tale quale.

Il confronto fra i TL nei due ambienti, ristretto nel dominio orizzontale di 17 km mostra l'evidente differenza di propagazione a favore del dominio pelagico.

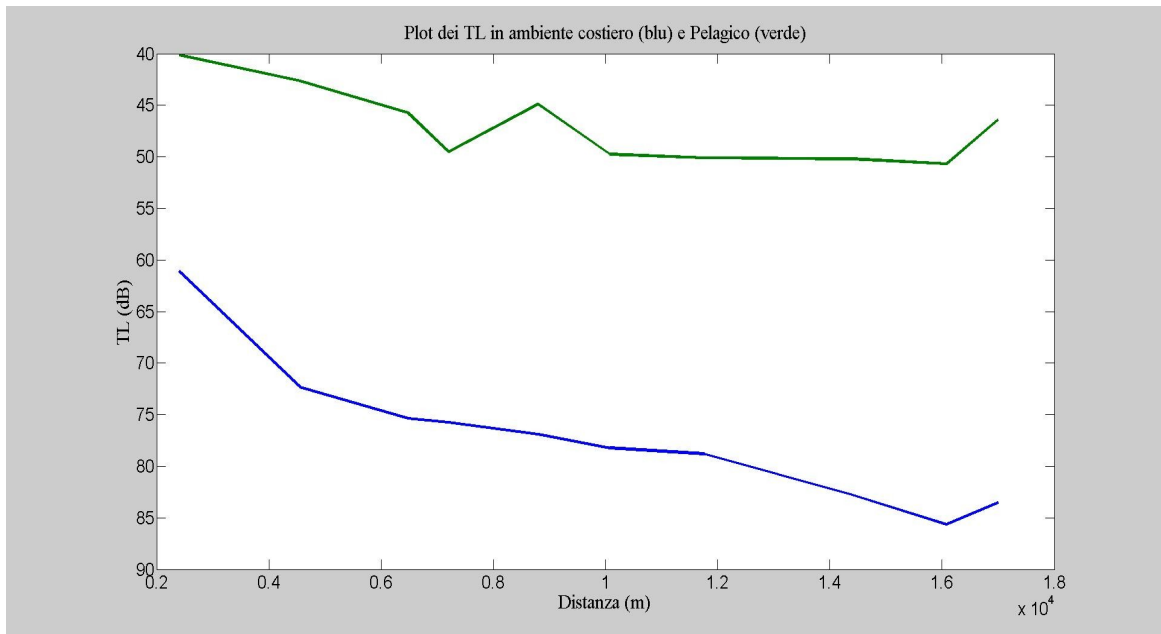


Illustrazione 20: Confronto fra i TL nei due domini simulati.

Le differenze in dB vanno da 30 a 55 pari a variazioni di intensità acustica da 128 a 4096 volte maggiori.

Ciò significa che ai fini della propagazione di un segnale, i due valori di attenuazione rappresentano il limite inferiore di intensità acustica che deve avere per potersi propagare. Di conseguenza, affinché in presenza di rumore un determinato segnale si propaghi è necessario che la differenza fra i due superi il valore minimo di attenuazione della colonna d'acqua.

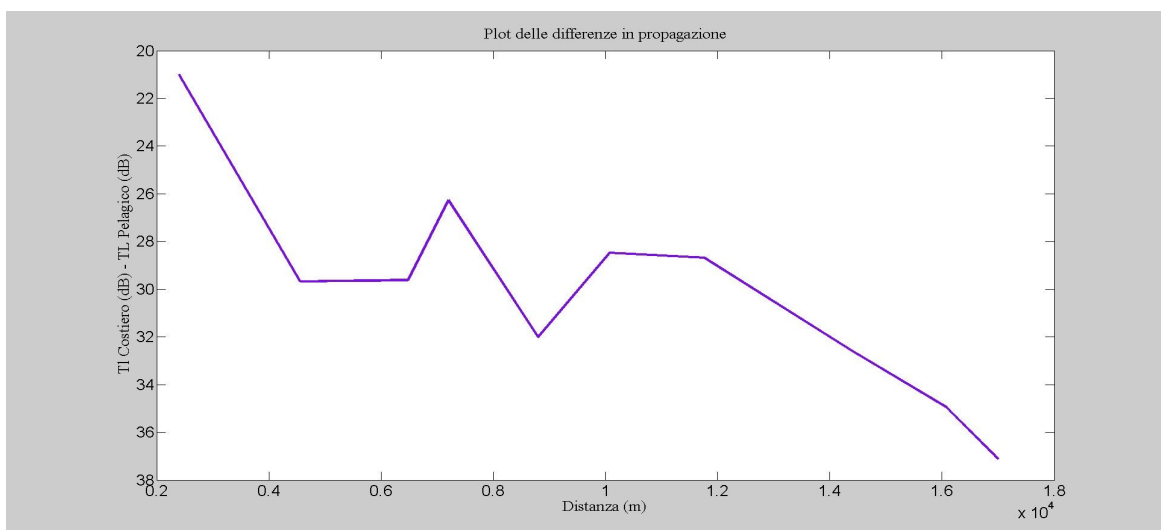
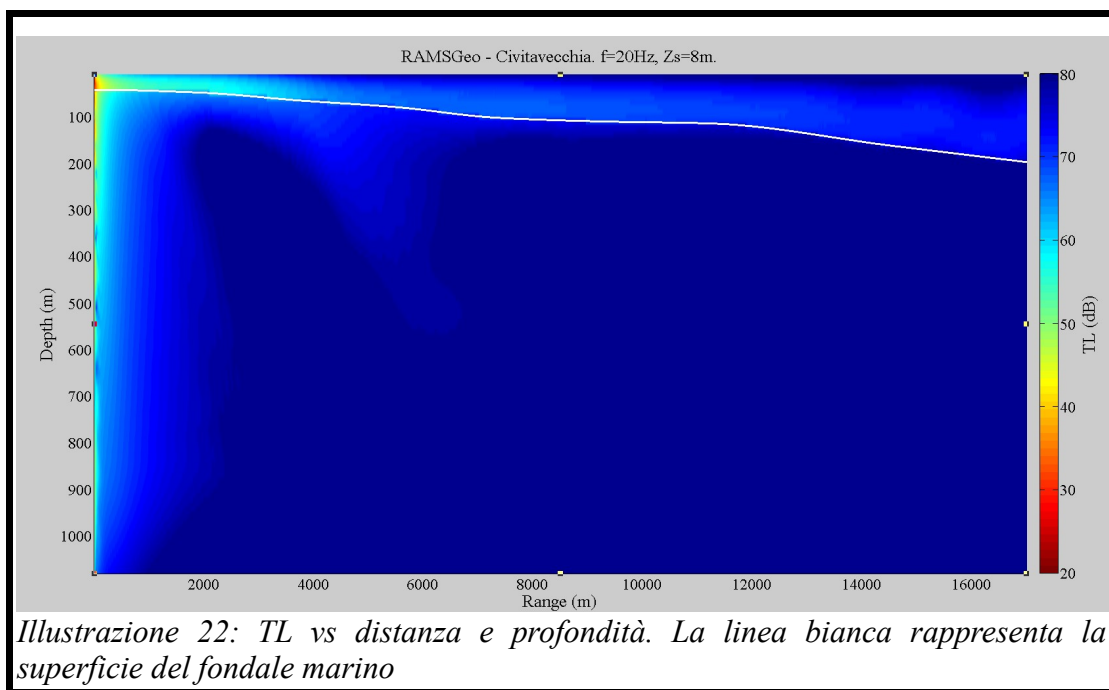


Illustrazione 21: Plot dell differenze in TL tra ambiente costiero e pelagico

Integrando i dati di Transmission Loss rispetto al range orizzontale e verticale si ottengono delle tabelle sinottiche dell'attenuazione nel dominio 2D.



Nell'illustrazione 22 del TL vs Range e Depth di Civitavecchia è visibile la notevole influenza del fondo marino nel campo acustico rappresentato. Nei primi 1000 in profondità e distanza avviene un raddoppio dell'attenuazione e dopo circa 5000m nella colonna d'acqua i valori superano i 60 dB. L'introduzione nel modello dei profili reali di velocità del suono permette di rappresentare il contributo dei rispettivi gradienti nella propagazione; infatti a partire dai 4000m di distanza si nota una maggiore attenuazione negli strati superficiali.

Nell'illustrazione 25 osserviamo come il dominio pelagico simulato sia molto meno attenuante rispetto a quello costiero, con valori compresi fra 45 e 55 dB. Ciò comporta come vedremo in seguito, che gli ambienti pelagici favoriscono un maggiore dominio spaziale al mascheramento. Notare la differente dimensione orizzontale del dominio che in questa figura raggiunge i 220 km. La linea bianca che rappresenta il fondale marino è il risultato di un compromesso di calcolo fra la necessità di creare un profilo batimetrico il più liscio ('smoothed') possibile per evitare discontinuità e/o punti singolari nel calcolo e il

numero massimo celle di calcolo imposto dal kernel del modello, pari a 22000.

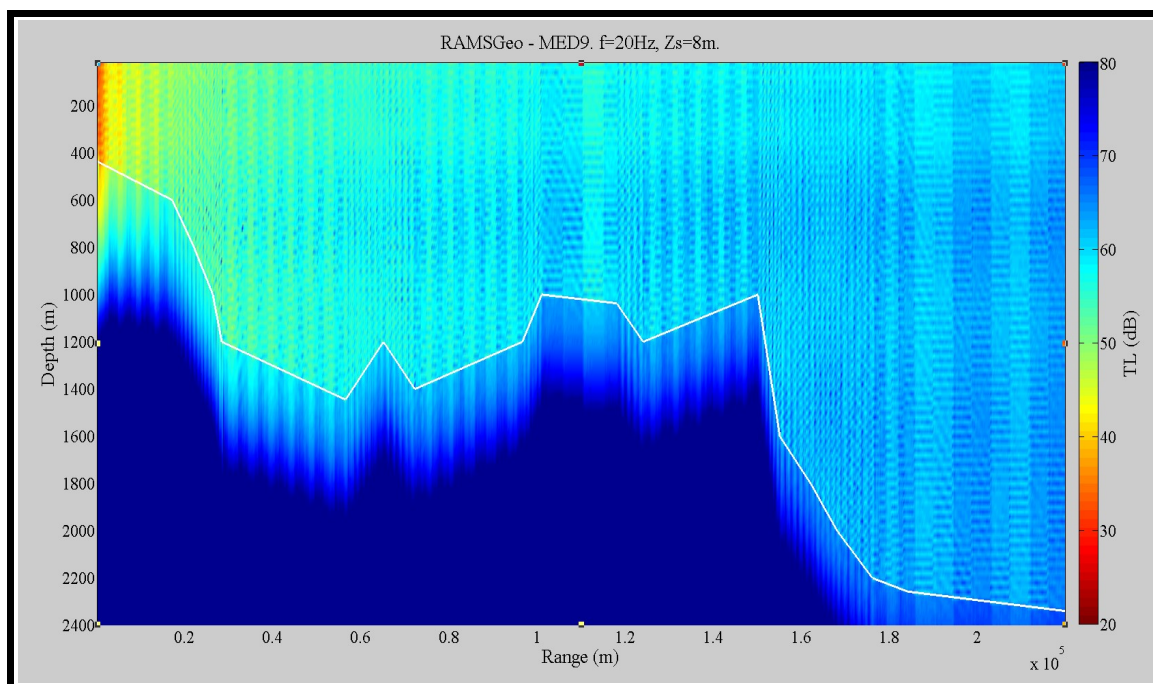


Illustrazione 23: TL vs. distanza e profondità in ambiente pelagico. La linea bianca delimita la superficie del fondale marino

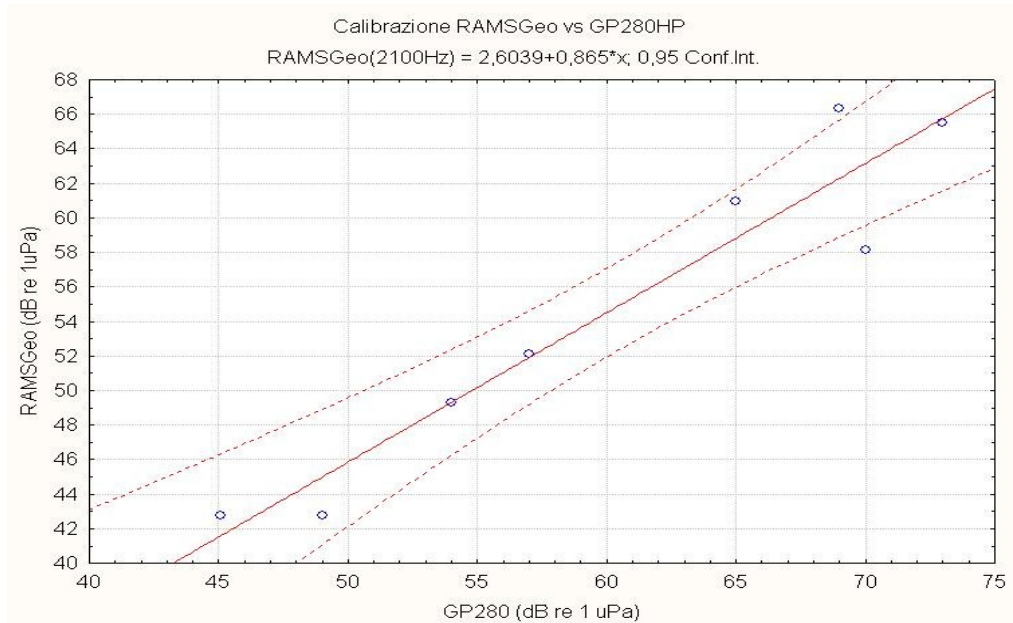
I risultati sono consistenti con la letteratura presente (Milou et al., 2004).

Il codice di Parabolic Equation usato nel RAMSGeo in questo lavoro comprende ordine di correzione conservazione dell'energia più alto nell'interfaccia verticale. Questo agevola la risoluzione delle simulazioni che coinvolgono grandi variazioni nella profondità, nelle distanze e nelle variazioni di velocità del suono. Inoltre permette la propagazione con angoli di rifrazione molto ampi e continue variazioni di densità (Collins et al, 1991.), grazie alle soluzioni split-step Padé. La caratterizzazione fisica del fondale marino come elastico, permette di calcolare anche la presenza di onde di taglio (Collins, 1993), e il self-starter per la condizione iniziale delle PE, insieme ad alcune correzioni esaminate nell'analisi di sensibilità, tendono a eliminare i problemi di overflow. Il modello allo stato attuale è sufficientemente accurato e stabile per le nostre finalità su single source.

Calibrazione del modello RAMSGeo

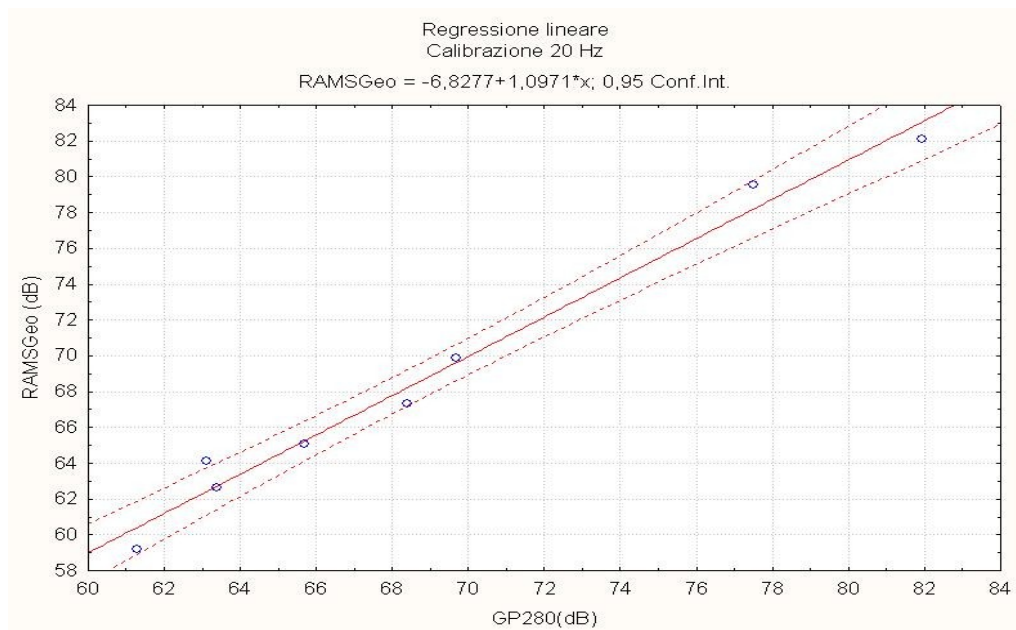
Il modello è stato calibrato per confronto fra i Received Levels calcolati e quelli misurati da un secondo idrofono GP 280. Il segnale di calibrazione a 2100 è stato misurato a distanze crescenti, pari a :

500m; 1000m; 1500m; 2000m;2500m; 3000m;5000m e 8000m



I dati mostrano un buon accordo fra misure e simulazioni, considerata la complessità dell'ambiente reale rispetto alle semplificazioni modellistiche. I dati a 3000m e 5000m escono fuori dall'intervallo di confidenza a causa delle differenze nelle interferenze stimate.

A partire dal back-calibration eseguito sulle sensibilità inferiori a 2100 Hz dell'idrofno sono state ricavate le rette di calibrazione per la frequenza rilevante:



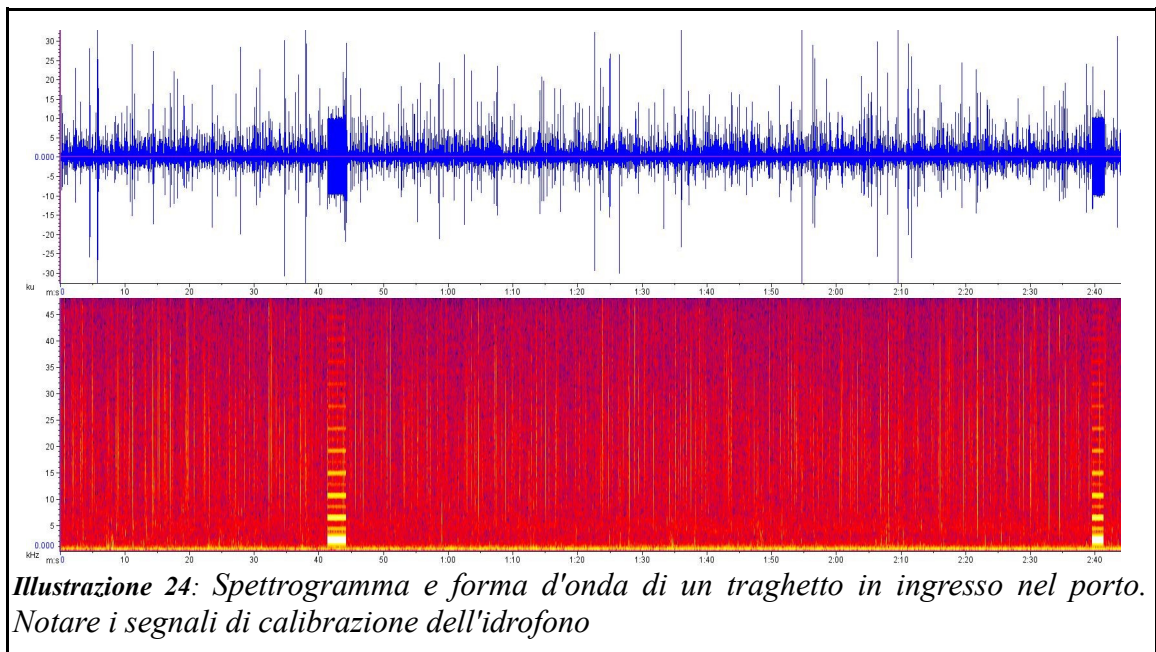
Per la frequenza di 20 Hz la correlazione fra le due misure è elevata, dimostrando come il modello possa ben simulare i fenomeni di attenuazione alle basse frequenze degli ambienti costieri.

Questi valori di calibrazione ottenuti per back-calculation, sono da considerarsi validi ai fini della stabilità e della coerenza dei risultati del modello. Questo metodo dovrebbe comunque essere affiancato da ulteriori misure sperimentali a basse frequenze. Anche se il problema oggettivo si sposta in questo caso sulle misure e sulle tecniche di analisi ,poiché alle basse frequenze, non solo il rumore è notevole, ma le sorgenti che contribuiscono ad esso non sono identificabili.

Il metodo è comunque soddisfacente rispetto all'assetto strumentale a singolo idrofono e in in una scena acustica omnidirezionale.

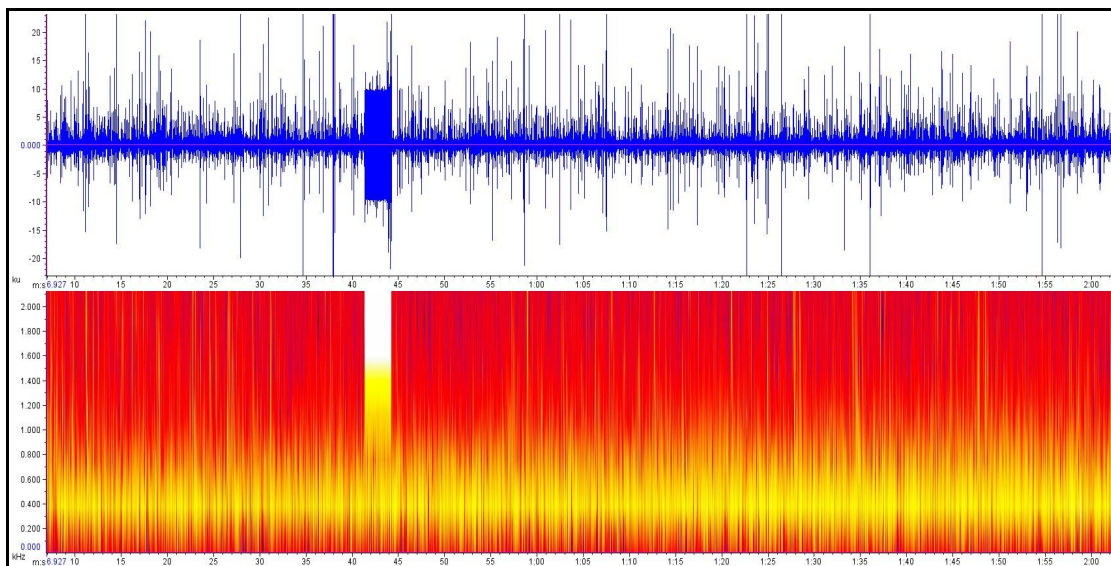
Spettri di Rumore navale e Rumore Ambientale

Di seguito vengono riportati gli spettri dei traghetti misurati nell'area prospiciente il porto di Civitavecchia, le rappresentazioni includono la forma d'onda e lo spettrogramma dei suoni nell'intero range di misura di 48 kHz poiché la frequenza di campionamento è di 96 kHz.



In questa prima immagine (ill. 24) sono ben visibili i due segnali di calibrazione generati dall'idrofono a 2100 Hz con le rispettive armoniche, il rumore navale è solo percepibile nella zona più bassa dell'illustrazione a colori, in giallo.

Ingrandendo l'area delle basse frequenze notiamo come esistano due picchi a 380 Hz e 190 Hz, come mostrato nella seguente illustrazione:



Il risultati delle simulazioni modellistiche applicate ai Received Leves delle 5 navi misurate nelle 12 bande in terze d'ottava tra 20 e 250 Hz sono riportati nella figura sottostante(ill. 25).

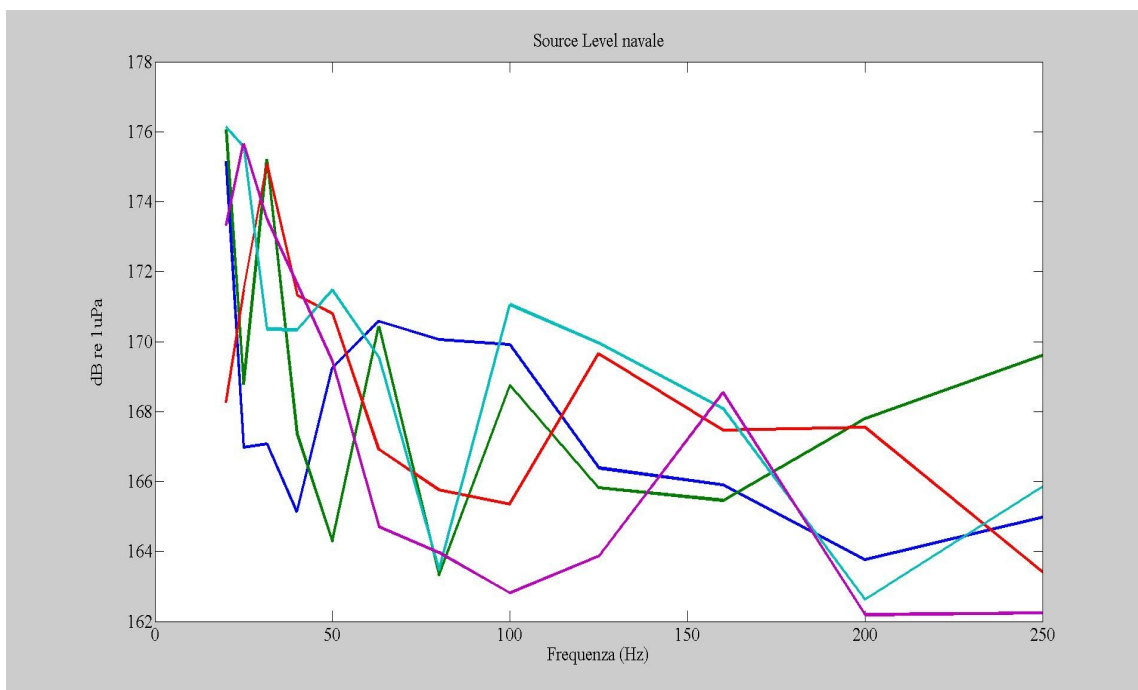


Illustrazione 25: Source Level @ 1m delle 5 navi misurate nelle 12 bande in terze d'ottava.

In questa illustrazione i dati sono riportati senza nessun filtro di 'smoothing' e pertanto gli andamenti dei vari Source Levels @ 1m sono delle rette spezzate. Alle frequenza del segnale della *B. physalus* i valori sono compresi tra 168 dB re 1μPa e 176 dB re 1μPa. Gli spettrogrammi sono stati ottenuti eseguendo un'analisi FFT dei dati usando una finestra di

Hamming di 4096 samples, e un overlap sul time grid del 50%. In questo intervallo quindi viene considerato il contributo del Noise Level dovuto al rumore navale nell'equazione del Signal to Noise Ratio. Per poter eseguire un confronto con un livello di rumore ambientale, è stata prodotta una sequenza di misure eseguite nel sito di Civitavecchia nell'arco di 24 ore.

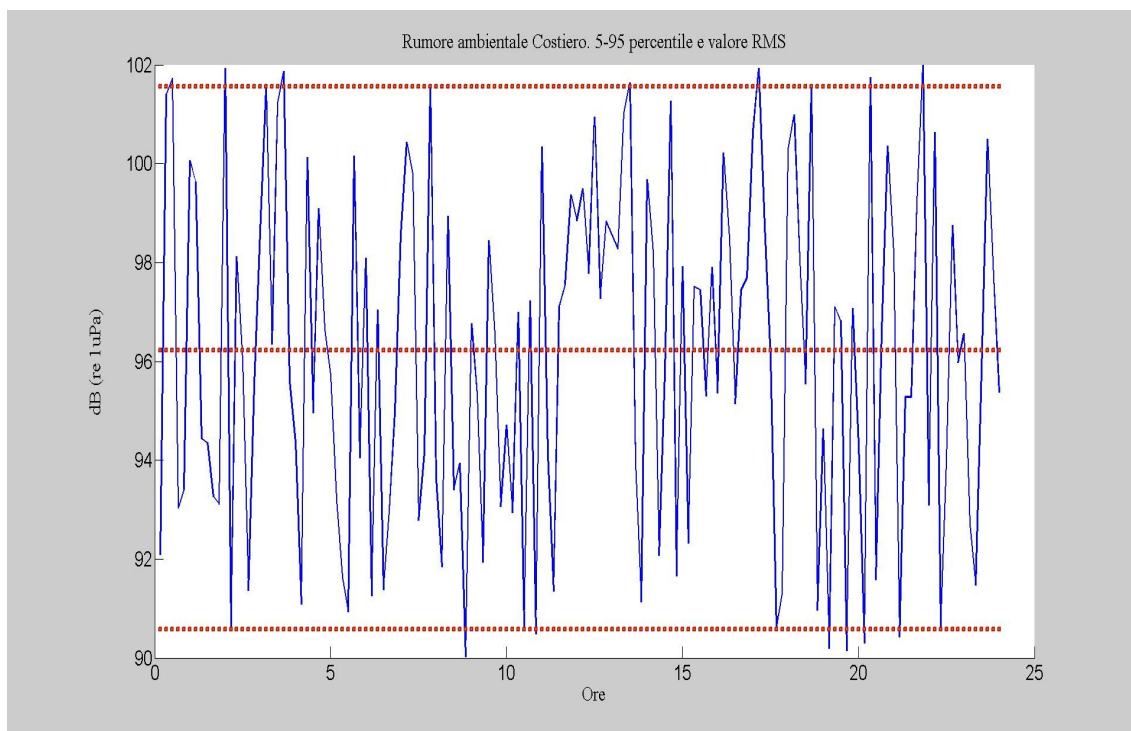


Illustrazione 26: Rumore di fondo misurato nelle 24 ore nel sito costiero di Civitavecchia, maggio 2009

Il sito mostra degli alti valori di rumore di fondo dal quale sono stati estratti i valori che cadono nel 5 e nel 95 percentile di una distribuzione normale ed un valore centrale rms.

Ai fini del mascheramento acustico sono stati estratti i valori estremi e centrali del rumore navale e ambientale riassunti nella seguente tabella:

Rumore @ 20 Hz	Navale	Ambientale
Valori superiori (95 percentile)	176 dB re 1 μ Pa	101 dB re 1 μ Pa
Valori centrali (rms)	173.9 dB re 1 μ Pa	96 dB re 1 μ Pa
Valori inferiori (5 percentile)	168 dB re 1 μ Pa	90.5 dB re 1 μ Pa

Tabella 6: Valori estratti dalle misure e dalle simulazioni per l'analisi del mascheramento acustico.

Mascheramento acustico

Di seguito vengono riportati i risultati in 2D del mascheramento acustico ottenuto simulando le sorgenti di rumore e del segnale posizionate a costa e comunicando verso il largo. La frequenza simulata è 20 Hz, corrispondente alla banda centrale in 1/3 di ottava del range di comunicazione della *Balaenoptera physalus*.

L'equazione applicata per il calcolo del mascheramento è :

$$SNR = RL - NL = SL - TL - NL.$$

Il valore di SNR è adimensionale poiché rapporto fra logaritmi.

Il valore del SL per la *B. Physalus* è stabilito in 170 dB re 1 μ Pa (Clarck, 2002), mentre i valori di NL sono quelli rms e 5 percentile elencati nella tabella 6.

Dall'analisi in frequenza è risultato evidente come lo spettro di comunicazione della *B. physalus* (17-24 Hz) sia completamente sovrapposto al più ampio spettro del rumore navale ben più ampio in frequenza e particolarmente intenso fino a 500 Hz.

Nella prima figura n.27, vediamo l'ambiente di simulazione costiero di Civitavecchia, con un rumore navale di 173 dB re 1 μ Pa, poiché il valore del Segnale della *B. physalus* è di 170 dB re 1 μ Pa è semplice pensare che venga mascherato nell'intero dominio spaziale.

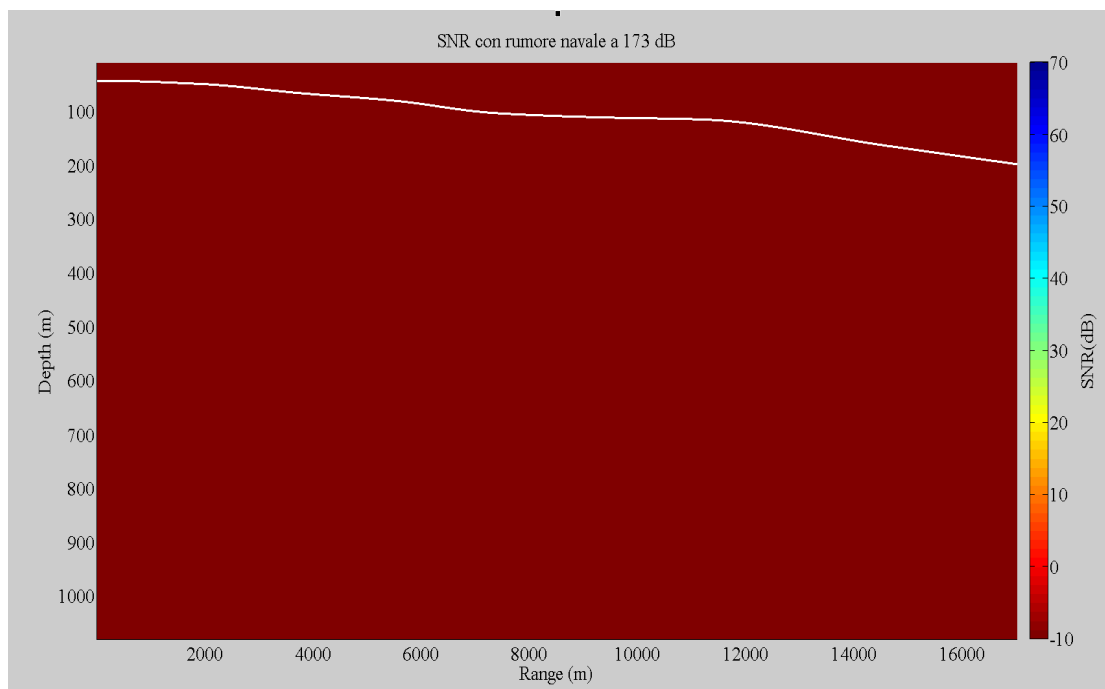


Illustrazione 27: Rappresentazione del SNR con rumore a 173 dB su tutto il dominio di calcolo nel sito Costiero di Civitavecchia

la linea bianca demarca il confine fra colonna d'acqua e fondale marino. In legenda i valori di SNR variano fra -10 e 70. Come detto in precedenza a partire da 0 possiamo ipotizzare che il segnale abbia una probabilità del 50% di essere percepito (Clark et al., 2009) venga percepito. In questo caso tutti i valori sono nettamente inferiori a 0, significando un completo mascheramento.

Lo stesso tipo di risultato lo otteniamo considerando un valore più basso per la sorgente di rumore navale pari a 168 dB.

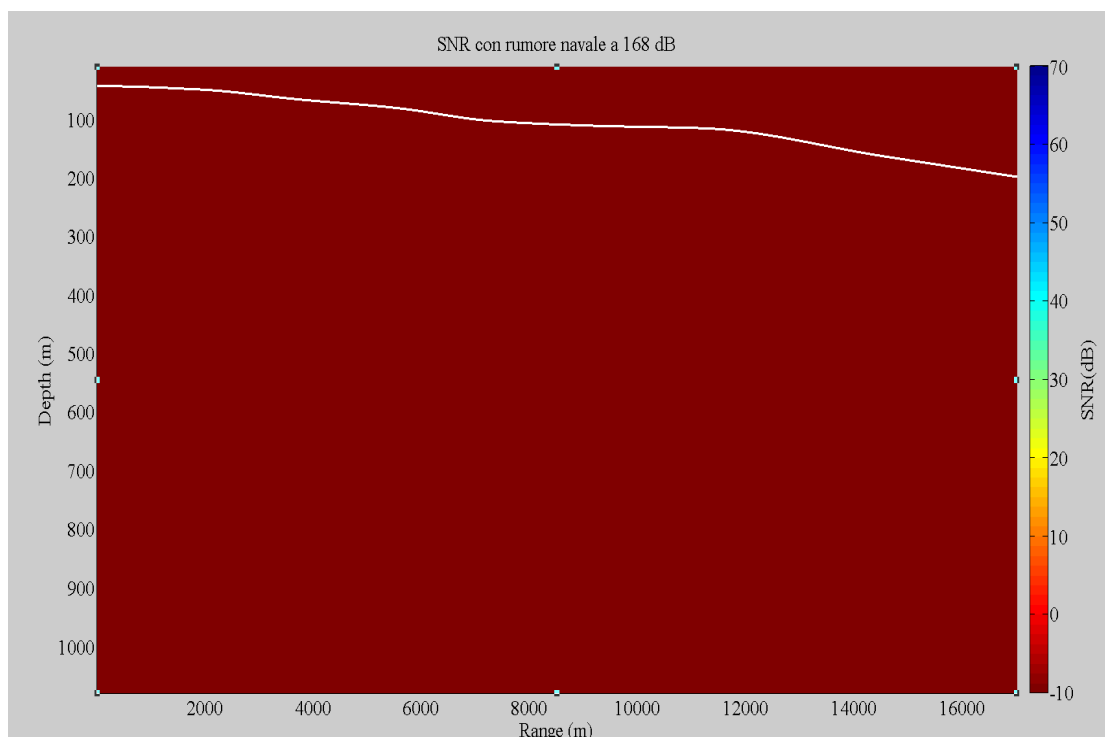


Illustrazione 28: rappresentazione del SNR con rumore a 168 dB su tutto il dominio di calcolo nel sito costiero di Civitavecchia.

Il valore del SNR è inferiore allo 0 nel dominio di simulazione. Il mascheramento è presente in tutto lo spazio della colonna d'acqua. Questo risultato è prevedibile nella misura in cui, conoscendo i valori di Transmission Loss che in questo ambiente hanno valori iniziali di 60 dB, affinché possano essere prodotti valori maggiori o uguali a 0 di SNR, la differenza fra sorgente e rumore deve almeno essere di 60 dB. In base ai nostri risultati questo significherebbe che in ambiente costiero i valori di rumore non dovrebbero superare i 110 dB re 1 μ Pa.

Infatti introducendo nel modello RAMSGeo, i valori RMS del rumore ambientale (96 dB

re 1 μPa), notiamo come sia possibile ottenere valori positivi di SNR con dettagli significativi ai fini della comprensione delle vie di propagazione subacquee.

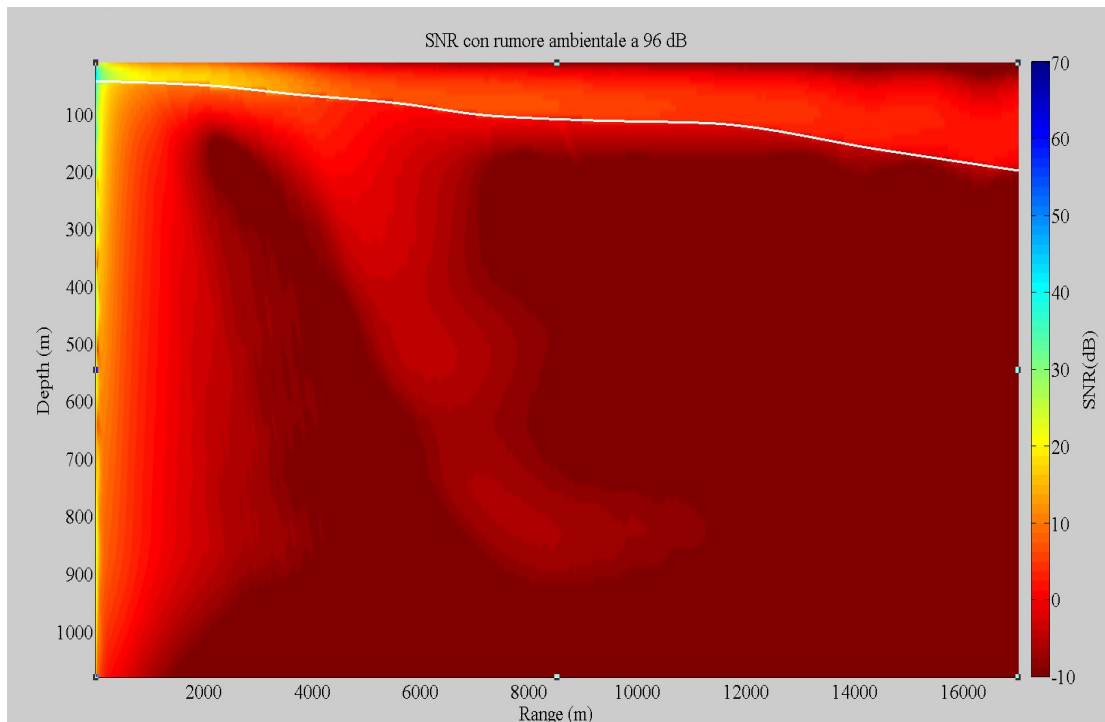


Illustrazione 29: rappresentazione del SNR con rumore ambientale a 96 dB. Notare che la propagazione del segnale non viene mascherata come in precedenza.

A partire dai valori costieri, notiamo con la propagazione sia migliore sotto la superficie dove il SNR raggiunge valori superiori a 30 (verde, compreso fra i 5 e i 35 m di profondità e circa 80m di distanza) e di seguito i valori maggiori seguono sempre il gradiente del profilo di velocità del suono indicato nell'illustrazione di pg 30. In mare è noto che il suono segua dei canali di comunicazione preferenziali nelle zone di minima velocità poiché, se nell'intono superiore o inferiore del minimo i valori tendono a crescere, il suono di conseguenza tenderà ad essere rifratto e quindi mantenuto nella zona di minimo.

Ciò può avere delle implicazioni molto importanti nella comunicazione dei mammiferi marini in genere. Infatti è possibile che riconoscano e scelgano particolari canali di comunicazione piuttosto che altri. Ciò ad oggi non è stato ancora verificato, ma è sicuramente un argomento degno di interesse di ricerca.

Queste considerazioni sono ancora più evidenti inserendo un rumore ambientale minore (90 dB re 1 μPa).

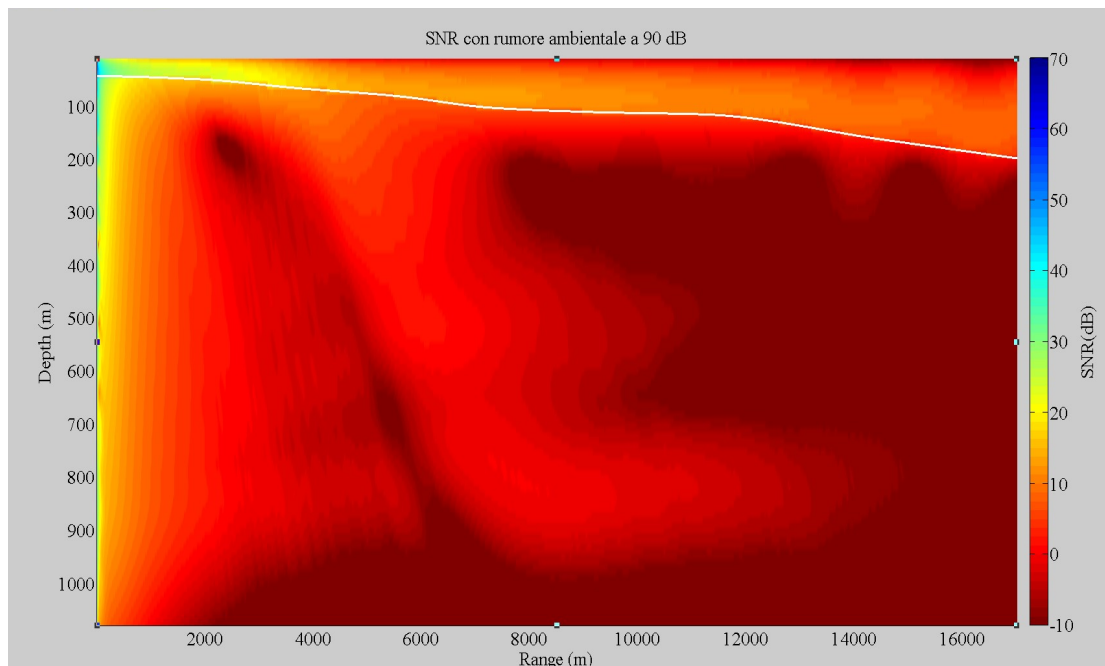


Illustrazione 30: rappresentazione del SNR con rumore ambientale pari al 5 percentile dei dati misurati nel sito costiero di Civitavecchia

Nell'ambiente di propagazione Pelagico avviene lo stesso fenomeno prodotto in quello costiero, poiché sebbene la differenza tra sorgente e rumore in questo caso sia almeno 40 dB, i valori di rumore navale sono sempre troppo vicini a quello della sorgente, causando un completo mascheramento.

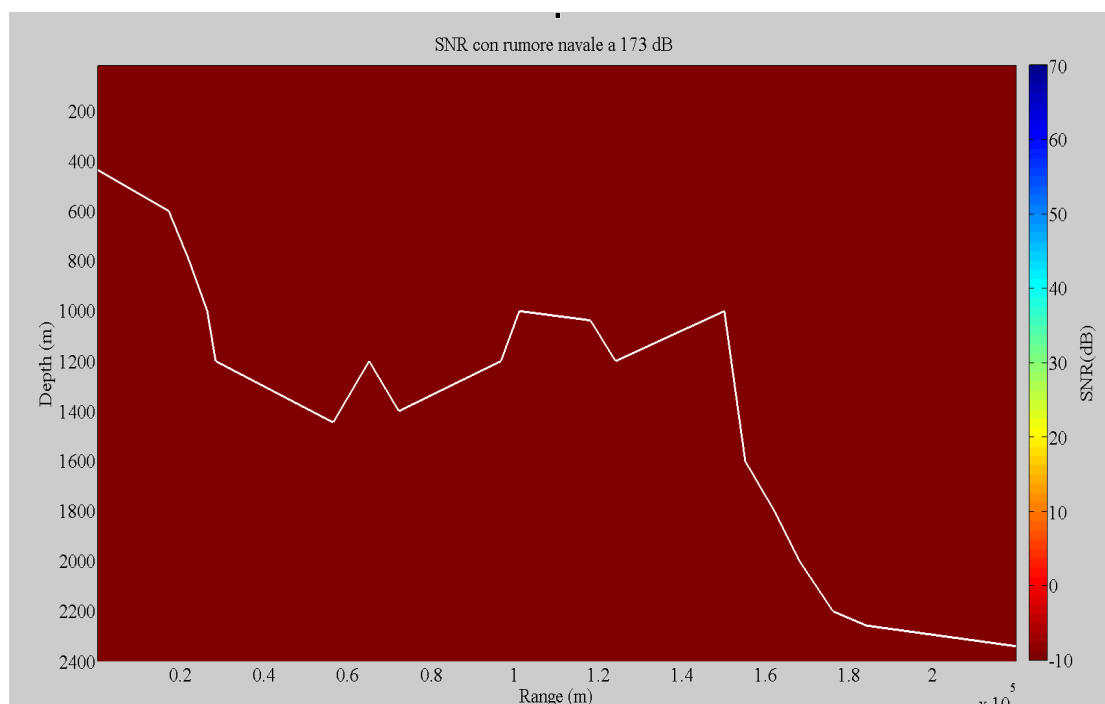


Illustrazione 31: rappresentazione del SNR con rumore a 173 dB su tutto il dominio di calcolo nel sito pelagico Tirrenico

Questo è visibile sia a 173 dB del valore rms del rumore navale che per i valori del 5 percentile a 168 dB.

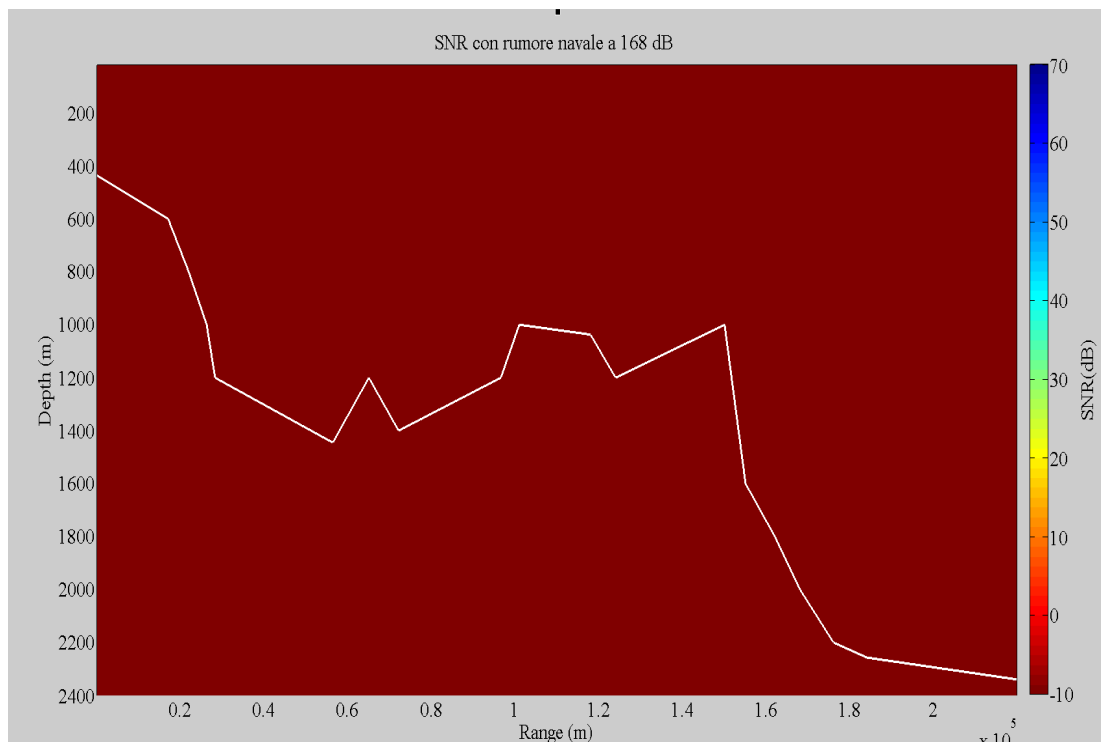


Illustrazione 32: rappresentazione del SNR con rumore a 168 dB su tutto il dominio di calcolo nel sito pelgico Tirrenico

Ciò che appare evidente è che nel simulare la propagazione di una sorgente singola, i valori di attenuazione mostrano evidentemente che per ottenere valori di SNR maggiori di 1 il segnale deve almeno superare il rumore di una valore pari al valore soglia di quel determinato ambiente.

Nel nostro caso è visibile come ciò non avvenga e quindi i valori sono abbondantemente al di sotto delle soglie (pari a 0) di percezione.

Nell'ipotesi di una caso reale dove il contributo del rumore non sia dovuto a una singola sorgente ma ad una moltitudine, questa situazione si estende anche al di là delle distanze simulate.

Viceversa il rumore ambientale non risulta mascherante, ma permette all'intero distanza di 220 km la possibilità di comunicare, con valori che variano da 42 dB a 5 dB.

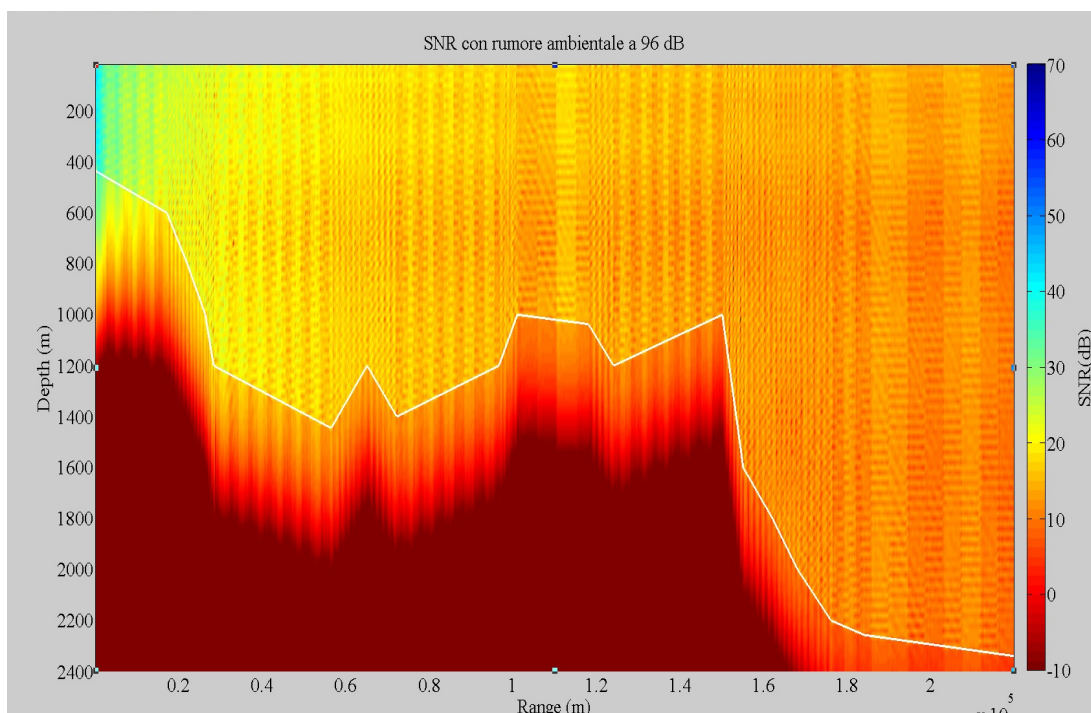


Illustrazione 33: Rappresentazione del SNR nel sito pelagico con rumore ambientale a 96 dB

E nel caso di bassa rumorosità (a 90 dB figura sotto) notiamo che si intravedano dei canali di propagazione preferenziali compresi tra i 200-400 m e lungo il fondale.

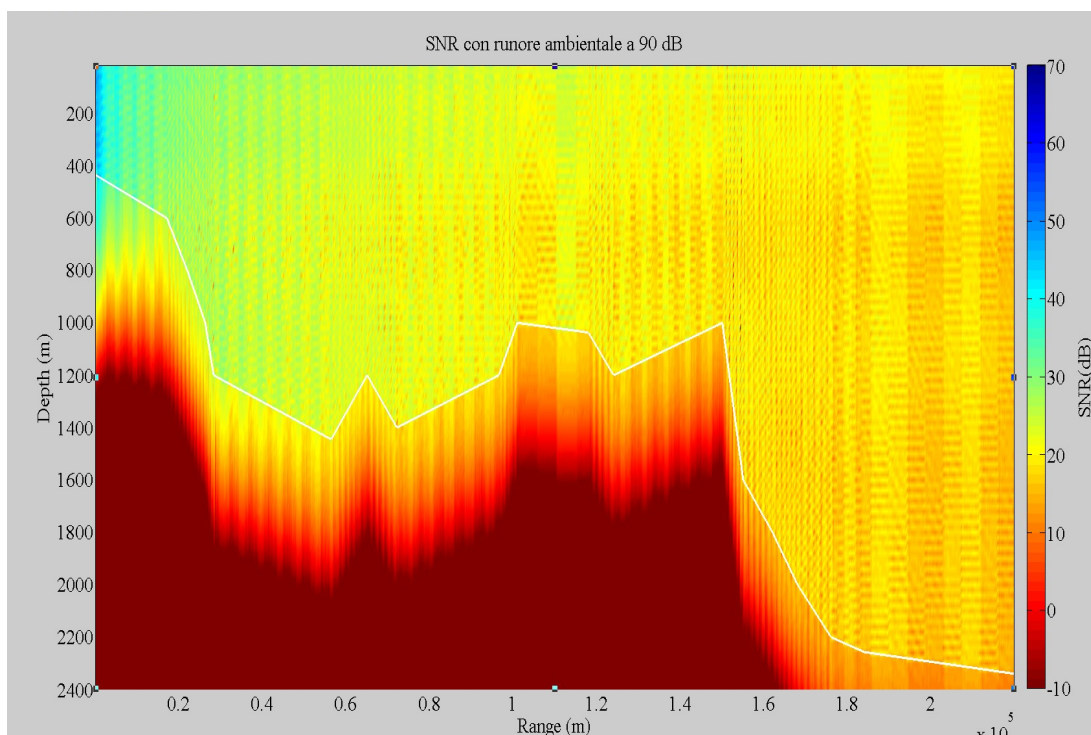


Illustrazione 34: rappresentazione del SNR i nel sito pelagico con 90 dB di rumore ambientale

Nel complesso questi risultati mettono in evidenza una situazione molto critica, soprattutto

in considerazione del fatto che stiamo simulando singole sorgenti. Non solo il rumore di fondo che abbiamo misurato è sicuramente alto (Clark et al., 2009).

Lo stadio successivo di elaborazione dei risultati riguarda la trasposizione dei valori di SNR nello spazio 2D profondità-distanza sulla mappa delle principali rotte navali nel santuario Pelagos.

Per poter applicare i dati alla mappa georeferenziata, è stata scritta una funzione di filtraggio e smoothing dei dati che associa in corrispondenza di ogni punto geografico di una data rotta navale, n-matrici di valori di SNR in funzione di n- valori di profondità. Ogni matrice di dati SNR con le matrici adiacenti e infine al boundary, con la isobata.

In questo modo è possibile filtrare per una data quota batimetrica il corrispettivo valore del SNR esteso in tutto il dataset di profondità comprese nel Santuario Pelagos.

In questo caso specifico poiché i dati di SNR del rumore navale risultano mascheranti ovunque, è stato applicato un valore di fondo < 1 per indicare la caratteristica del SNR ai fini della comunicazione.

Nella prima delle due mappe di mascheramento, vengono riportati i valori di SNR a 50 m di profondità (ill. 35).

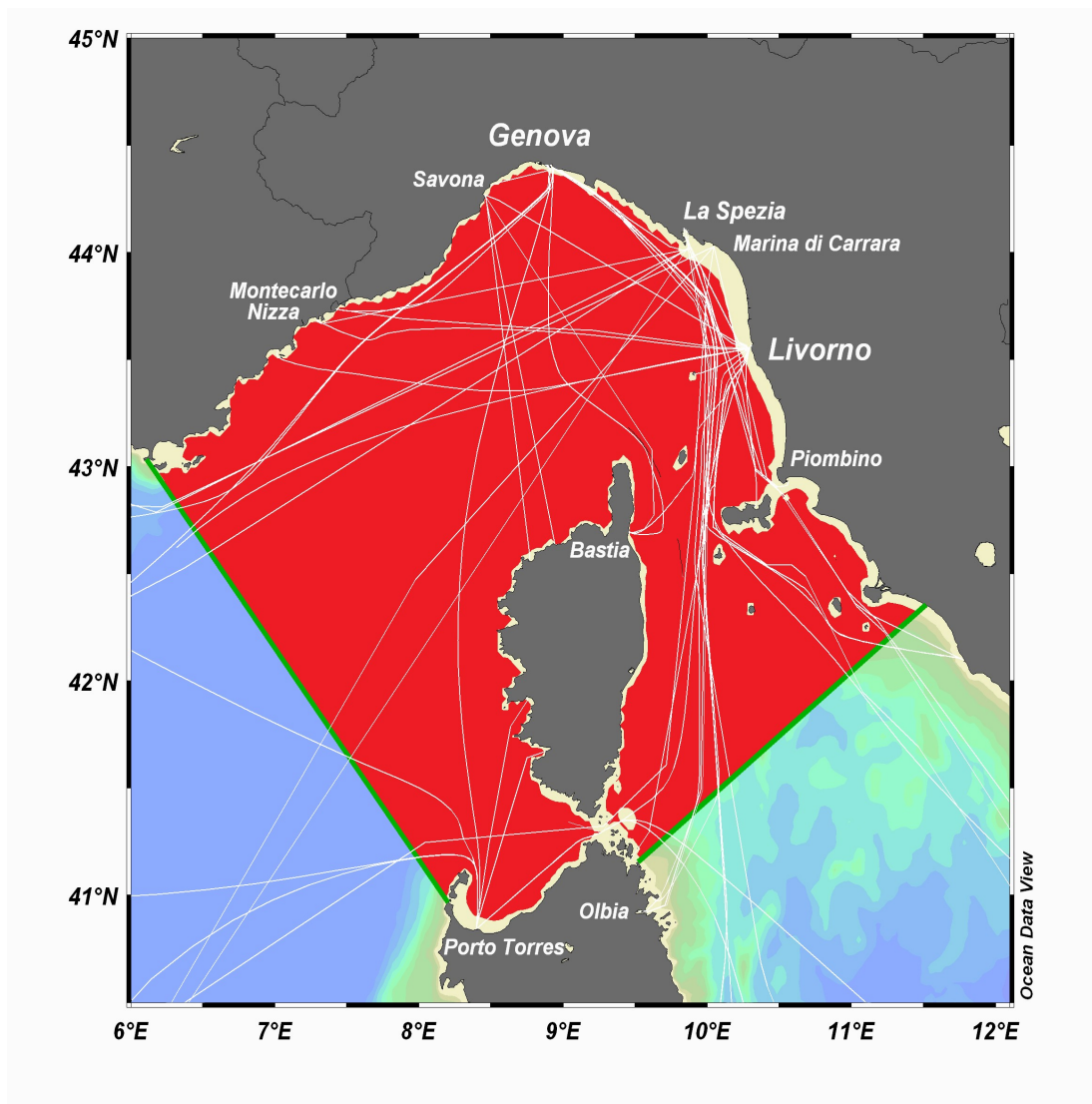


Illustrazione 35: rappresentazione del $SNR < 0$, applicato al Santuario Pelagos alla quota di 50m. Il colore rosso rappresenta la superficie inteessata del mascheramento.

Sullo sfondo dell'illustrazione in bianco sono tracciate le rotte navali, mentre in rosso sono riportati i valori di SNR inferiori a 0, ossia mascheranti per la *B. Physalus*. Questa immagine ci pone di fronte ad uno scenario preoccupante, viste le finalità previste dall'accordo istitutivo del Santuario Pelagos, se pensiamo alla necessità di trovare delle soluzioni atte a ridurre i livelli di intensità acustica.

Stesso tipo di risultato viene riscontrato nella sezione a 1500 m di profondità.

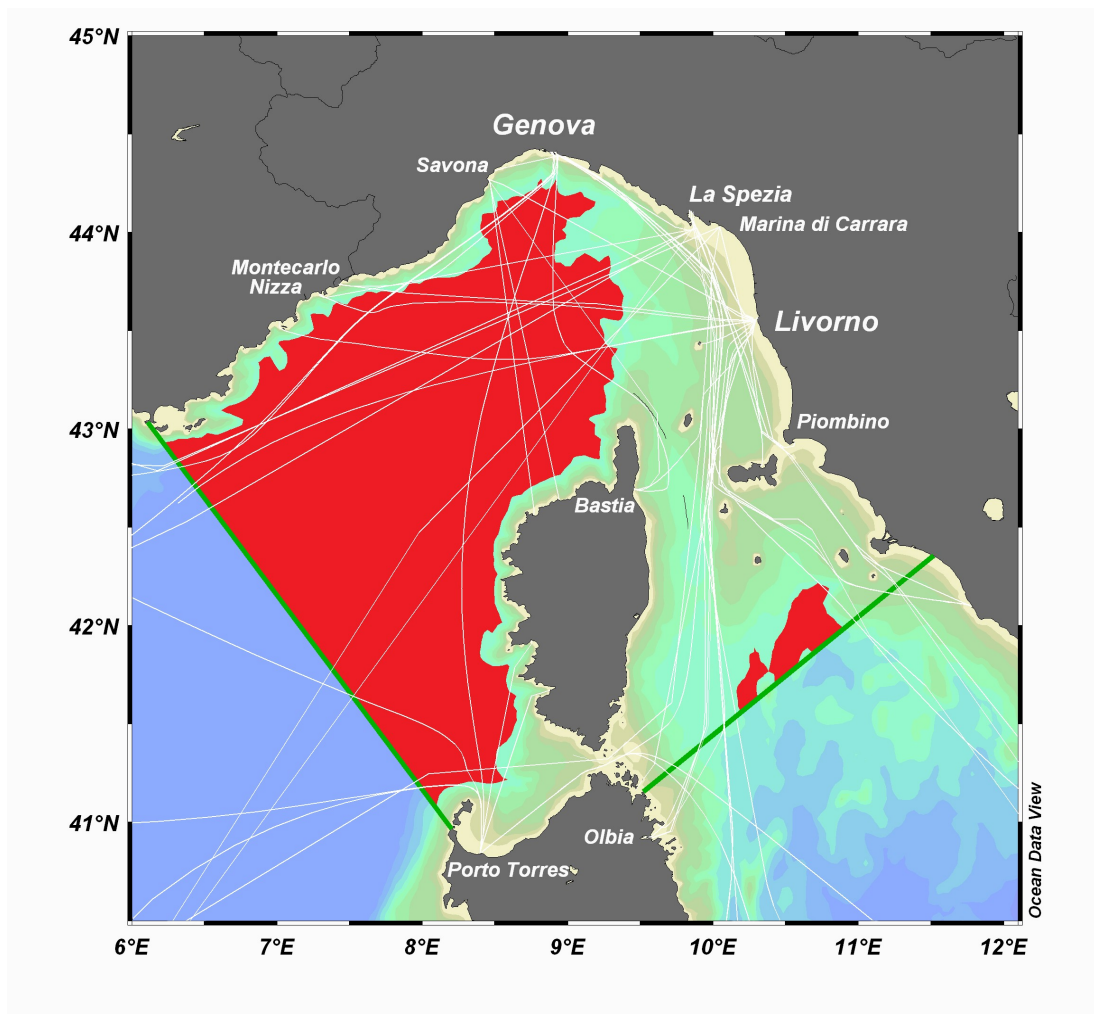


Illustrazione 36: Rappresentazione del SNR a 1500m di profondità nel Santuario Pelagos

Concettualmente possiamo pensare quindi che tutto il volume di acqua in tutta la superficie del Santuario Pelagos sia soggetta a fenomeni di mascheramento causato dal traffico navale.

Non emergono quindi zone di rispetto, dove il rumore sembri essere in qualche modo attenuato.

A questo proposito è necessario notare, che una trattazione modellistica ed empirica più ampia potrebbe permettere di ottimizzare i risultati prodotti in questo lavoro.

I risultati prevedono la sovrapposizione spaziale delle due sorgenti, ponendo nave e ipotetica balenottera, nello stesso punto. Infatti lo step modellistico successivo dovrebbe essere focalizzato sulla possibilità di prevedere più sorgenti nello spazio.

CONCLUSIONI

E' stato descritto il contributo delle navi ro-ro pax e del rumore ambientale al mascheramento acustico della *Balaenoptera physalus*, in due ambienti diversi: uno costiero e uno pelagico.

Il termine mascheramento usato indica il processo con cui la soglia uditiva di un suono è superata dalla presenza di un altro (Tanner, 1958, Moore 1982). Questo termine viene adattato alla reale distribuzione dei mammiferi, ponendo un ipotetico ascoltatore in ogni nodo di calcolo del modello. L'equazione del sonar passivo è stata integrata con l'equazione che descrive il rapporto segnale rumore, attraverso la scrittura di funzioni MATLAB aggiuntive in un modello matematico preesistente (RAMSGeo).

L'uso dello strumento modellistico permette di approfondire alcuni dettagli poco noti della propagazione acustica subacquea alle basse frequenze in ambiente costiero e pelagico. Infatti dove generalmente vengono usati modelli semplicistici per la propagazione, o dove non si considera il contributo del fondale marino (per una summa consultare Ocean Noise and Marine Mammals, 2001), in questo lavoro si completa la caratterizzazione fisica di tutti gli elementi ambientali che contribuiscono all'attenuazione del suono in mare.

Ne emerge un quadro che presenta degli scalini di attenuazione minimi al di sotto dei quali è fortemente probabile il fenomeno di mascheramento. Questi step sono di **40 dB** per l'ambiente pelagico e di **60 dB** per quello costiero.

Il modello RAMSGeo permette di esplicitare l'equazione del sonar passivo secondo le diverse variabili, potendo quindi calcolare il Source Level delle navi e il Transmission Loss dell'ambiente marino, considerando l'elevato contributo di attenuazione del fondale, grazie all'applicabilità del principio di reciprocità (Nghiem-Phu, 1977).

I risultati del modello sono stati calibrati alla frequenza di 2100 Hz mostrando un ottimo accordo con i dati misurati. Necessiterebbe di calibrazione a basse frequenze come 20 Hz, ma esiste un limite fisico nei sistemi di calibrazione a basse frequenze che impone trasduttori e ambienti molto grandi.

Il sistema di calibrazione dell'idrofono è sicuramente innovativo e utile al fine di riportare i valori acustici in scale assolute e per calibrare i dati simulati.

L'attuale limite del modello RAMSGeo, consiste nell'impossibilità di inserire più sorgenti

nello stesso ambiente di propagazione. Infatti nelle presenti simulazioni l'assunto è stato quello di considerare sorgente di segnale e sorgente di rumore nello stesso punto.

Un risultato importante è che questo metodo può fornire un contributo alla comprensione del mascheramento su sorgente singola.

L'informazione ecologica che risulta da questo lavoro è che le navi sono una fonte di mascheramento in frequenza, spazio e tempo. A meno di ulteriori conoscenze sulla capacità di guadagno direzionale da parte della *Balaenoptera physalus* in una scena acustica omnidirezionale (Clark et al., 2009), il mascheramento pone un ulteriore interrogativo sulle caratteristiche della comunicazione da parte di questi cetacei. Infatti non sono evidenti fenomeni di variazione nelle caratteristiche dei segnali emessi in presenza di navi, come mostrato nella figura 13 a pg 51 (e Clark ,2002).

Queste considerazioni di base sottolineano la necessità di saperne di più sulle caratteristiche della comunicazione della *Balaenoptera physalus*. L'interdipendenza delle variabili nelle equazioni usate impone dei valori di incertezza sui risultati non ancora quantificabili, poiché necessiterebbero di consolidamento e validazione con misure reali e ulteriori approcci modellistici.

Tuttavia in prima approssimazione possiamo ritenere queste stime come utili nella valutazione del rischio potenziale di mascheramento acustico, e inoltre il metodo presentato è applicabile ad altre specie.

Una conclusione che risulta indipendente dalla specie considerata o ambiente simulato sta nell'incertezza relativa alle scale spaziali e temporali che interessano la comunicazione bioacustica.

Dovrebbero infatti essere fatte ulteriori considerazioni che partendo da questi risultati possano portare a stimare il volume di comunicazione effettivo della specie e indicizzare se questa condizione cronica di rumore comporti una reale perdita nell'opportunità di comunicazione.

Per ora l'obiettivo è di mettere a punto il metodo cercando di aumentare il numero di dati empirici e ampliare la geometria e il numero delle sorgenti presenti nelle simulazioni.

L'ecologia acustica dell'habitat attuale in cui vive la *B. physalus* ci pone di fronte al dubbio che se questa specie non fosse pre-adattata o ben adattata per compensare i cambiamenti di rumore specifico e ambientale a cui è sottoposta, rischierebbe l'insuccesso nelle

comunicazioni in ambienti antropizzati. Quindi alcuni scenari acustici potrebbero rappresentare fattori di stress i cui effetti sull'ecologia della specie non sono ancora prevedibili.

A partire dai lavori di Payne e Webb (1971) che hanno sollevato per primi l'attenzione sul preoccupante aumento di rumore associato con la navigazione commerciale e sugli effetti a lungo raggio per la comunicazione dei cetacei, solo 30 anni dopo sono stati realizzati workshop per discutere formalmente un problema che non poteva essere più ignorato (O.N.A.M.M. 2001, 2005).

Come mostrato in questo lavoro il rumore delle navi ro-ro pax può compromettere gravemente la comunicazione della *B. physalus*; sebbene i risultati dovrebbero essere applicati anche a molte altre specie di mammiferi marini.

Come specie dominante sul pianeta ci troviamo di fronte delle scelte per conservazione delle specie, scelte che non possono attendere altri 3 decenni.

RINGRAZIAMENTI

Questo dottorato non avrebbe avuto modo di esistere senza l'impegno del Prof. Marco Marcelli e della dott.ssa Viviana Piermattei che hanno provveduto ai fondi di ricerca, a loro va un incommensurabile grazie.

L'argomento della tesi è stato a lungo oggetto di discussione con il mio tutor il prof. Marco Marcelli. Oggi riconosco che il fine era quello di convincermi a credere nel lavoro che stavo facendo. Per questo non smetterò di ringraziarlo.

Al dott. Junio Fabrizio Borsani, direttore del laboratorio di Bioacustica dell'I.S.P.R.A, che ha dedicato tempo conoscenza e pazienza alla realizzazione e alla revisione del lavoro. Senza di lui avrei scritto solo i ringraziamenti, tralasciando anche qualcuno.

Agli amici e colleghi del Laboratorio di Oceanologica Sperimentale ed Ecologia Marina, che spesso e inconsapevolmente formano una grande squadra, che mi hanno stimolato ed aiutato innumerevoli volte. li voglio ringraziare uno ad uno:

Sergio, Simone, Enrico, Viviana, Alice, Andrea, Leo, Alessandra, Marco, Umberto, Maurizio, Francesco, Maximo, Rebecca, Natalizia, Luca.

Ringrazio la mia famiglia che ha supportato le mie scelte incondizionatamente.

Infine ma non per ultima ringrazio Francesca che con amore mi ha accompagnato lungo questo percorso.

BIBLIOGRAFIA CONSULTATA

- Au, W.W.L., "The sonar of Dolphins". Springer-Verlag, New York, N.Y. (1993).
- Bruntgard D.S. "Informational and energetic masking effects in multitalker speech perception". In : Divenji P (ed) speech separation by humans and machines. Kluwer Academic Press, Bostn, MA, 261.-267. (2004)
- Cederberg R.J. And M.D. Collins, "An efficient forward model and experimental configuration for geoacoustici inversion", J. Ac. Soc. Am (submitted may 1995).
- Fock V.A. , Electromagnetic Diffraction Propagation Problems (Pergamon, New York, 1965), pp 213-234.
- Jensen F.B. , W. A. Kuperman, M.B. Porter, and H. Schmidt, Computational Ocean Acoustics (American Institute of Physics,, New York, 1994).
- Leontovich M.A. and V.A. Fock, "Solution of problem propagation of electromagnetic waves along the earth's surface by method of parabolic equation," J.Exp. Theor. Phys. 16, 557-573 (1946).
- Clarck C.W. "Acoustic behaviour of mysticete whales". In Thomas J., KasteleinR (eds). Sensory abilities of cetaceans. Plenum Press, New York, 580-583 (1990).
- Clarck C.W., Borsani J.F., Notarbartolo di Sciara "Vocal activity of fin whales, *Balaenoptera physalus*, in the ligurian" Marine Mammal Science, 18(1): 286-295 (2002).
- Clark C.W., Ellison W.T. "Potential Use of low frequency sounds by baleen whales for probing environments: evidence from models and empirical measurements" In : Thomas J.A, Moss, CF, Vater M. (eds) Advances in the study of ecolocation in bats and dolphins. University of Chicago Press, Chicago, IL. 564-589. (2004).
- Clark C.W., Ellison W.T., Southall B.L., Hatch L., Van Parijs S.M., Frankel A. Ponirakis D. "Acoustic masking in marine ecosystems intuitions, analysis, and implication" Marine Ecol. Progr. Series: 395, 201-222, (2009).
- Collins M.D., "Benchmark calculations for high-order parabolic equation", J. Ac. Soc. Am. 87, 1535, 1538 (1990).
- Collins M.D. And E.K. Westwood, "A higher-order energy-conserving parabolic equation for range-dependent ocean depth, sound speed, and density," J. Acoust. Soc. Am 89, 1068-1075 (1991).
- Collins M.D, "A slip-step Padé solution for parabolic equation method" J.Acoust.Soc. Am. 93, 1736-1742 (1993).
- Collins M.D, "Generalization jof the slip.step Padé solution", J. Acoust. Soc. Am. 96, 382-385 (1993).

Collins M.D., Cederberg R.J., King D.B., and Ching-Bing S.A. "Comparison of algorithms for solving parabolic wave equations" J.Acoust Soc Am. 96, 382-385 (1995).

Collins* M.D, "An energy conserving parabolic equation for elastic media", J.Acoust.Soc. Am.94, 975-982 (1993).

Fay R.R., "hearing of vertebrates: a psychophysics databook. Hill-Fay Associated Winnetka. IL. 1988.

Ihlefeld A, Shinn-Cunningham B. "Spatial release from energetic and informational masking in selective speech identification task" J.Acoust.Soc. Am. 123, 4369:4379, (2008).

Jensen F.B., Kuperman W.A, Porter M.B, Schmidt, H "Computational Ocean Acoustics" AIP Press, New York, (1994).

Ketten D. R. "Marine Mammal Auditory Systems: A summary of audiometric and Anatomical Data and implication for Underwater Acoustic Impacts" Polarforschung 72 (2/3), 79-92, (2004)

La Monica G.B., Ciocci F.L., Raffi R., Almonti A., Cara P., Cristofalo G.C., Dibenedetto C., Falese F., Fiorini R., Frattini L., Taliana D. e Tufoni D., 1991, "Indagini sedimentologiche e sismostratigrafiche di dettaglio della piattaforma continentale tra l'Argentario e la rada di Gaeta: illustrazione della ricerca". Workshop attività oceanografica CNR, Roma 11-12/7/1991

Manzella G. M. R., E. Scoccimarro, N. Pinardi, and M. Tonani "Improved near real-time data management procedures for the Mediterranean ocean Forecasting System-Voluntary Observing Ship program", Annales Geophysicae (2003) 21: 49-62.

Marcelli M. "Traffico navale nel santuario Pelagos: stato dell'arte e ipotesi di impatto sui cetacei" relazione tecnica per Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare.

Millero, F.J., Chen, C.T., Bradshaw, A., and Schleicher, K." A new high pressure equation of state for seawater" Deep-Sea Research., (1980), Vol27A, pp255-264.

Milou De, Marta. E.; Salvadores, Silvia R. y Blanc, Silvia. "Using Updated Parabolic equation to examine acoustic transmission losses measurement over the argentinean continental slope. *Gayana (Concepts)* [online]. (2004), vol.68, n.2, pp. 385-388.

Monestiez P., Dubroca L., Bonnanc E., Durbecc J.-P., Guinet C. ,Geostatistical modelling of spatial distribution of *Balaenoptera physalus* in the Northwestern Mediterranean Sea from sparse count data and heterogeneous observation efforts" Ecological Modelling 193 615-628, (2006).

Moore B.C.J. "An introduction to the psychology of hearing" Academic Press, London (1982).

Nghiem-Phu L. & Tappert F., “ Modeling of reciprocity in the time domain using the parabolic equation methods, J. Acoust. Soc. Am, (1985) 78, 164-171.

O.N.A.M.M “Ocean Noise And Marine Mammals”, The National Academies Press (2001, 2005).

Panigada S., Notarbartolo di sciara, Zanardelli M., Airoidi S. ,Borsani J.F. & Jahoda M.” Fin whales (*Balaenoptera physalus*) summering in the Ligurian Sea: distribution, encounter rate, mean group size and relation to physiographic variables”.J. Cetacean Res. Manage. 7(2):137–145, (2005).

Payne R., Webb D. “ Songs of Humpback Whales” Science 173, 585-597 (1971).

Popper A.N. “Sound Emission and detection by delphinids” Cetacean Behavior: mechanism and function. Jhon Wiley and sons, NY, 1-52, (1980).

Porter M.B., Jensen,F.B.and Ferla C.M. “The problem of energy conservation in one-way models,” J. Acoust. Soc. Am. 89, 1058-1067 (1991).

REMPEC (Regional Marine Pollution Emergency Response Centre for the Mediterranean Sea), “ Study of Maritime Traffic Flow on Mediterranean Sea” Lloyd’s Marine Intelligence Unit under Task 2.3 O of Activity 2 of the the European Union financed MEDA regional project “Euromed co-operation on Maritime Safety and Prevention of Pollution from Ships – SAFEMED”, (2008).

Renolds J.E. III, Rommel S.A. “ Biology of marine mammals” Smithsonian Books, Washington, DC (1999).

Richardson, W.J., Green, C.R.Jr., Malme, C.I. & Thomson ,D.H., with Moore S.E. & Würsig, B., “Sound made by neonatal Sperm Whale” Academic Press, San Diego, CA, pp. 576. (1995)

Ross, D, “Mechanics of Underwater Noise” Peninsula Publishing, Los Alots, CA, (1987)

Tanner W.P., “ What is masking?” J. Acoust. Soc. Am. 30, 919-921 (1958).

Tappert F.D., “ The parabolic equation approximation method, “ in Wave Propagation and Underwater Acoustics, edited by J.B. Keller and J.S. Papadakis, Lecture Notes in Physics, vol. 70 (Springer, New Yorkm 1977).

Tyack P.L. “ Acoustic communication under the sea”. In : Hoop S.L., Owren M.J., Evans C.S. (eds) Animals Acoustic communication: Sound Analysis and research methods. Springer -Verlag, New York, 163-220. (1998).

Uexküll, J. Von “ A stroll through the wolds of animal and men. A picture book of invisible worlds. C. Schiller. Instinctive behaviour (translated 1957), London Metheum 5-80.

UNCLOS - United Nation Convention on the Law of the Sea (Montego Bay, 1982);
http://www.un.org/Depts/los/convention_agreements/texts/unclos/UNCLOS-TOC.htm.

Urick R.J., "Principles of Underwater Sound" Mc Graw Hill, (1983).

Watson C.S. "Uncertainty, informational masking and the capacity of immediaty auditory mamory". In : Yost W.A., Watson C.S. (eds) Auditory processing complex sounds. Erlbaum, Hilsdale, NJ. 267-277. (1987).

Wartzok D, Ketten D.R. "Marine mammal sensory system" In: Reynolds JE III, Rommel SA (eds) Biology of marine mammals. Smithsonian Institute Press, Washington, DC, 117-175 (1999).

Yost W.A., Popper A.N., Fay R.R., "Auditory perception of sound sources", Springer, New York. (2008).

NORMATIVA

LEGGE 11 febbraio 1992, n.157 "Norme per la protezione della fauna selvatica omeoterma e per il prelievo venatorio." pubblicato sulla G.U. n. 46 del 25-2-1992 - Suppl. Ordinario n. 41

LEGGE 11 ottobre 2001, n.391 "Ratifica ed esecuzione dell'accordo relativo all'a creazione nel Mediterraneo di un santuario per i mammiferi marini, fatto a Roma il 25 novembre 1999", pubblicato sulla G.U. n. 253 del 30-10-2001.