

## **FASE. 4.1 “Raccolta e l’elaborazione dati sulle fonti di inquinamento acustico e la loro interazione con i cetacei nell’area marino costiera toscana”**

Elaborazione e sperimentazione di un modello matematico di propagazione dell’inquinamento acustico subacqueo

CNR – IDASC, dicembre 2011



CONSIGLIO NAZIONALE DELLE RICERCHE  
ISTITUTO DI ACUSTICA E SENSORISTICA "O. M. CORBINO"  
LABORATORIO DI ACUSTICA SUBACQUEA

VIA FOSSO DEL CAVALIERE 100 – 00133 ROMA  
TEL: 06 45488482 – FAX: 06 45488061 - [www.idasc.cnr.it](http://www.idasc.cnr.it)

## RELAZIONE TECNICA

**Elaborazione e sperimentazione di un modello matematico di propagazione  
dell'inquinamento acustico subacqueo, nell'ambito del progetto GIONHA  
“Governance and Integrated Observation of marine Natural Habitat”**

Destinatario

ARPAT - Agenzia Regionale per la Protezione  
Ambientale della Toscana  
Dipartimento di Livorno  
Via Marradi, 114 - 57126 Livorno

Relazione a cura di: D. Taburni  
Revisione a cura di: L. Di Marcoberardino

## RELAZIONE TECNICA

### *"Elaborazione e sperimentazione di un modello matematico di propagazione dell'inquinamento acustico subacqueo, nell'ambito del progetto GIONHA Governance and Integrated Observation of marine Natural Habitat"*

## Indice

Introduzione.....	2
1 - Sorgenti di rumore.....	2
1.1 - Sorgenti naturali.....	2
1.1.1 - Il vento.....	3
1.1.2 - La pioggia.....	4
1.1.3 - Altre sorgenti.....	5
1.2 - Sorgenti antropiche.....	5
1.2.1 - Le indagini geosismiche.....	7
1.2.2 - Lo sfruttamento dei giacimenti di olio e gas.....	8
1.2.3 - I SONAR.....	8
1.2.4 - Le ricerche scientifiche.....	9
1.2.5 - La strumentazione acustica di disturbo ed i deterrenti acustici.....	10
1.2.6 - I dragaggi e le esplosioni sottomarine.....	10
1.2.8 - Il traffico navale.....	11
2 - Studio delle caratteristiche del volume di propagazione.....	13
2.1 - Il Santuario dei Cetacei.....	13
2.2 - Caratteristiche oceanografiche.....	13
2.3 - Percorsi acustici.....	16
2.4 - Transmission Loss.....	18
3 - Scelta del modello idoneo a simulare la propagazione all'interno dell'area di studio.....	18
3.1 - Equazione d'onda e tipologie di modelli.....	18
3.2 - Review dei principali modelli esistenti.....	20
3.3 - Scelta del modello: il BELLHOP.....	21
3.3.1 - Struttura dell'environmental file.....	22
4 - Determinazione dei parametri di input.....	24
4.1 - Batimetria.....	25
4.2 - Profili di Velocità del Suono (SSP).....	25
4.2.1 - Origine dei dati.....	25
4.2.2 - Pulizia dei dati.....	27
4.2.4 - Estensioni dei profili.....	27
4.2.5 - Profili sonori e ray paths.....	29
4.3 - Fondale marino.....	30
5 - Procedure tecniche per l'implementazione del sistema di simulazione.....	34
5.1 - Definizione griglia sorgenti-ricevitori.....	34
5.2 - Profili di velocità.....	35
5.2.1 - Impiego del modello propagativo come strumento di selezione dei profili.....	35
5.2.2 - Variabilità temporale.....	37
5.2.3 - Variabilità spaziale.....	45
5.2.4 - Procedura implementata per la scelta dei profili.....	46
5.3 - Batimetria.....	47
5.4 - Fondale marino.....	47

5.5 - Scelta delle profondità di simulazione.....	48
6 - Sperimentazione.....	48
6.1 - Parametri di simulazione.....	48
6.2 - Input modello.....	49
6.3 - Output.....	49
Appendice A - Coefficienti dei funzionali parabolici nei vari scenari ambientali analizzati.....	51
Appendice B1 - Enviromentale File.....	54
Appendice B2 - File di batimetria.....	55
Appendice B3 - File Sound Speed Profile.....	56
Bibliografia.....	56

## Introduzione

L'Istituto di Acustica e Sensoristica "Orso Mario Corbino" (IDASC) del CNR Roma, partecipa al progetto GIONHA (Governance and Integrated Observation of marine Natural HABitat) nell'attività concernente l'elaborazione e la sperimentazione di un modello matematico di propagazione dell'inquinamento acustico negli ambienti subacquei.

Le numerose specie viventi marine, presenti all'interno dell'area progettuale, sono impattate da numerose sorgenti di disturbo, tra quali il rumore, con particolare riferimento alle componenti di natura antropogenica.

Per poter arrivare ad una corretta valutazione dell'impatto del rumore subacqueo nei confronti delle specie viventi è opportuno approcciare la problematica seguendo una ben definita successione di passi interdipendenti tra loro:

- (1) determinazione delle classi esistenti di sorgenti di rumore (proprietà acustiche e distribuzione spazio-temporale);
- (2) studio delle caratteristiche del volume interessato dalla propagazione del rumore;
- (3) scelta del modello idoneo a simulare la propagazione all'interno dell'area di studio;
- (4) determinazione (tramite database esistenti e/o campagne di rilevazione) dei parametri da fornire in ingresso alla simulazione tramite modello;
- (5) sviluppo delle procedure tecniche per implementazione del sistema di simulazione;
- (6) sperimentazione tramite la scelta di opportuni casi studio.

## 1 - Sorgenti di rumore

In questa prima parte è stato condotto un review bibliografico delle principali tipologie di sorgenti sonore presenti negli ambienti marini.

L'ambiente marino è un sistema complesso dal punto di vista acustico, caratterizzato da un'ampia varietà di segnali sonori, che si differenziano per origine, intensità, caratteristiche spettrali, etc.

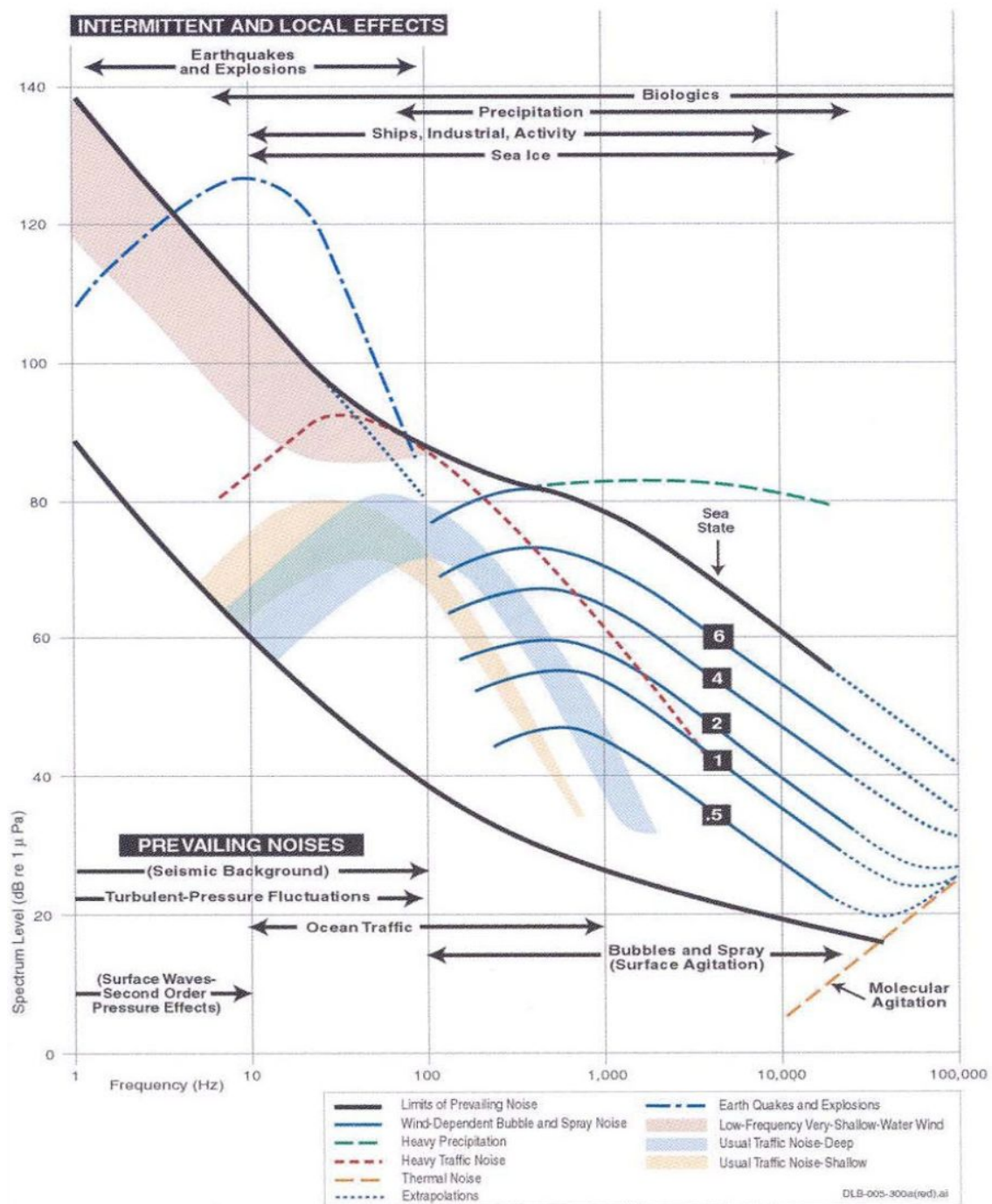
Una classificazione generica delle sorgenti sonore marine può essere realizzata sulla base della tipologia in:

- **sorgenti naturali:** insieme dei suoni prodotti da fenomeni di natura sia fisica che biologica;
- **sorgenti antropiche:** risultato delle molteplici attività che insistono e sfruttano le risorse marine. Queste a loro volta possono suddividersi in
  - intenzionali,
  - non-intenzionali.

## 1.1 - Sorgenti naturali

Uno tra i primi studi condotti sul rumore ambiente nei sistemi marini, e che tutt'oggi costituisce ancora un valido punto di riferimento è stato condotto negli anni '60 da Wenz (Wenz 1962) ed è riassunto nella figura sottostante.

Da questo grafico si può notare come le varie sorgenti naturali, a carattere sia intermittente che continuo, abbracciano una porzione considerevole dello spettro sonoro, andando dai pochi Hz fino alle centinaia di kHz.



**Fig. 1** - Curve di Wenz. L'asse verticale mostra i valori dei livelli sonori (dB re 1  $\mu$ Pa), mentre quello orizzontale le frequenze (Fonte: Wenz 1962).

### 1.1.1 - Il vento

La sorgente sonora “vento”, tramite il trasferimento di energia cinetica alle masse d'acqua, interessa una vasta porzione dei sistemi marini, con un contenuto spettrale, che in assenza di fonti antropiche e biologiche, si estende da 1 Hz fino ai 100 kHz (Hildebrand 2005).

Il livello di rumore associabile alla sorgente vento è dovuto generalmente alle naturali pulsazioni dalle bolle di gas prodotte dai movimenti degli strati superficiali della colonna d'acqua, come, ad esempio, il frangersi delle onde. L'entità di tali livelli è, inoltre, fortemente dipendente dalla durata del vento, dalla sua velocità, dell'estensione della zona di *fetch*, e dalla conformazione batimetrica dell'area marina interessata.

Scendendo maggiormente nel dettaglio, la densità spettrale di questa tipologia di rumore varia con la frequenza, presentando un andamento iniziale, tra 50-400 Hz, pressoché piatto seguito da una seconda parte, in cui si ha un decremento costante all'aumentare delle frequenze (Kuperman & Ferla 1985).

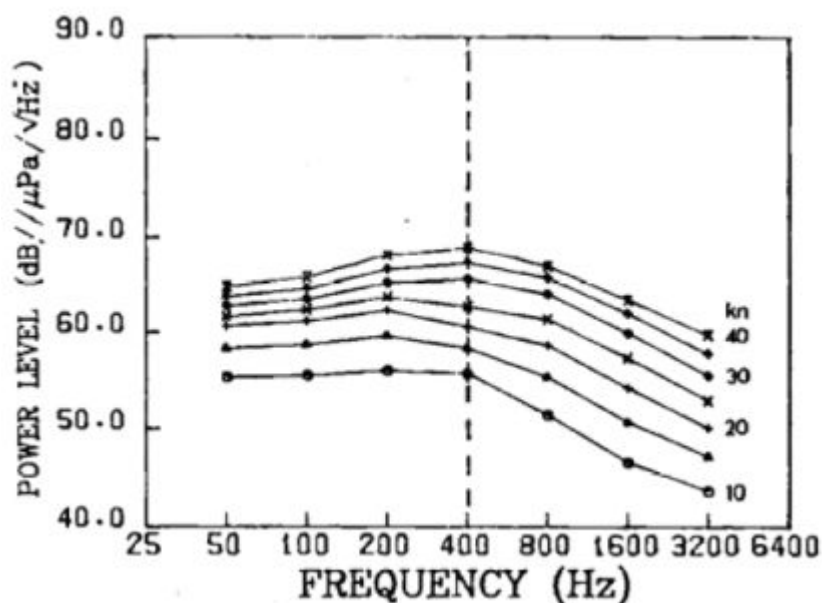


Fig. 2 - Relazione velocità del vento (ca. 5-20 m/s) e densità spettrale. (Fonte: Kuperman & Ferla 1985).

Nel complesso l'intero spettro può essere suddiviso in più porzioni:

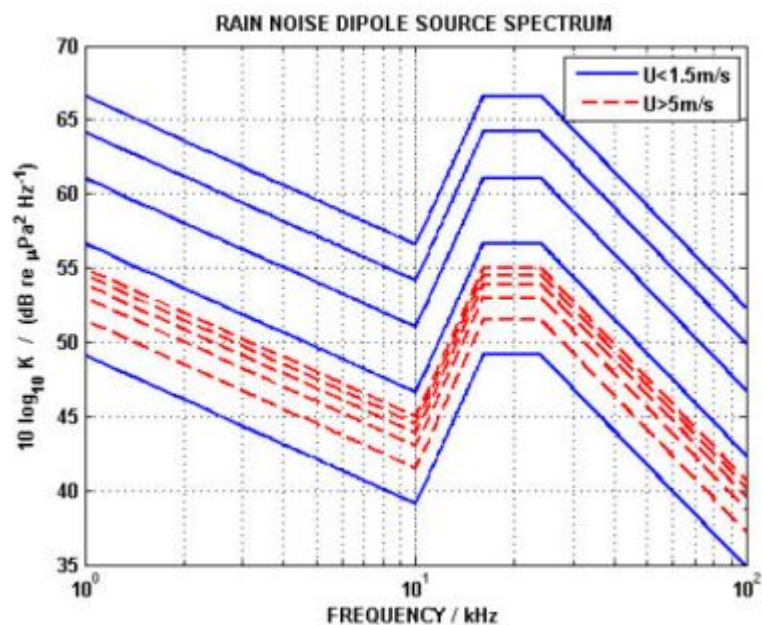
- **Basse frequenze** (1-100 Hz): dove si sommano le azioni sia delle onde superficiali che delle molteplici turbolenze che provocano variazioni di pressione. Questa porzione dello spettro è al contempo la più difficoltosa per la stima dei livelli sonori, in quanto la sorgente vento viene mascherata dal rumore navale.
- **Alte frequenze** (100 Hz-10 kHz): azione oscillante delle bolle di gas all'interno della colonna d'acqua e degli spray (agitazione superficiale).

### 1.1.2 - La pioggia

I suoni generati dagli schizzi (minuscole bolle d'aria), o “*splashes*”, delle gocce di pioggia quando cadono sulla superficie marina occupano una porzione rilevante dello spettro sonoro naturale tra 1 Hz e 50 kHz (Ainslie et al. 2009). Questo tipo di rumore è molto sensibile alla velocità e alla dimensione delle gocce che cadono, oltre che alla velocità locale dei venti.

La figura seguente descrive la dipendenza del rumore della pioggia in funzione delle dimensioni delle gocce.





**Fig. 3** - Densità spettrale del rumore da pioggia. Le linee blu (dal fondo alla superficie) sono per *rainfall rates* da 2 a 10 mm/h, mentre la velocità del vento è minore di 1.5 m/s. Le linee tratteggiate sono per uguali *rainfall rates* e per velocità dei venti inferiori ai 5 m/s (Fonte: Ainslie et al. 2009).

### 1.1.3 - Altre sorgenti

Viene di seguito preso in esame il contributo apportato dalle altre tipologie di sorgenti naturali, come ad esempio vulcani, terremoti, etc.

I terremoti ed i lampi sono da considerarsi tipici esempi di sorgenti transienti, in grado di interessare zone piuttosto ampie. Varie registrazioni hanno evidenziato come i suoni generati da una tempesta fossero rilevati fino ad una distanza di 5-10 km con dei picchi di energia focalizzati tra i 50 ed i 250 Hz (Dubrovsky & Kosterin 1993).

L'attività sismica apporta un importante contributo: terremoti sottomarini sono in grado innalzare anche di 30-40 dB il normale rumore di fondo (Schreiner et al. 1995).

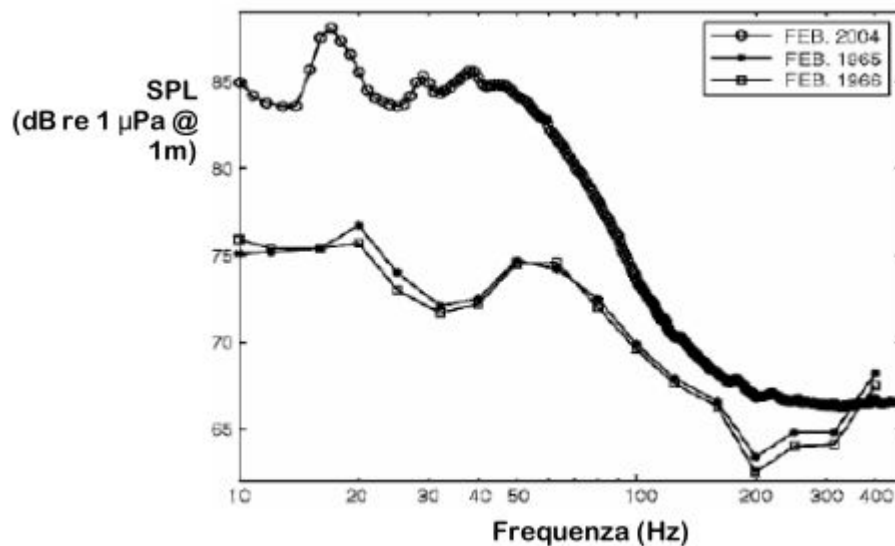
**Tabella 1** - Frequenze delle sorgenti naturali di rumore in ambiente marino (Fonte: Wenz 1962 & Hildebrand 2005).

Sorgente	Frequenze
Vento	1 Hz - 100 kHz
Pioggia	1 Hz - 50 kHz
Vulcani e Terremoti	2 Hz - 100 Hz
Condizioni Meteorologiche	10 Hz - 15 kHz
Rumore Biologico (gamberi, cetacei)	10 Hz - 100 kHz
Ghiaccio	10 Hz - 10 kHz

### 1.2 - Sorgenti antropiche

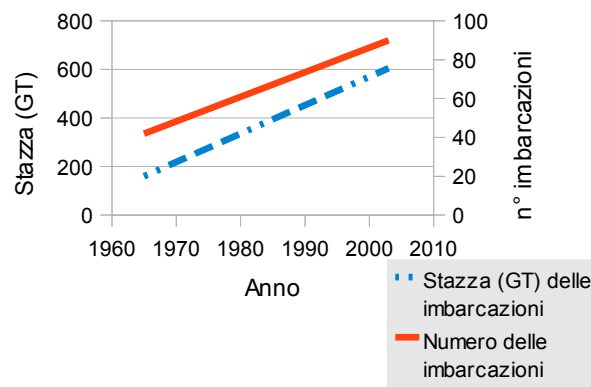
La frazione antropica del rumore è la componente che contribuisce maggiormente ad alterare il livello del rumore di fondo, grazie ad una serie di attività che sfruttano tutte le potenzialità che l'ambiente marino è in grado di offrire.

Informazioni sul rumore antropico (fig. 4) dimostrano come negli ultimi quarant'anni i livelli sonori siano decisamente aumentati al di sotto della soglia dei 200 Hz, a causa di un netto incremento del volume del traffico navale.



**Fig. 4** - Livelli del rumore in ambiente marino nel corso del tempo. Il grafico si riferisce al settore Nord-Orientale dell'Oceano Pacifico, con riferimento ai periodi di Febbraio del 1965, 1968 e 2004. (Fonte: McDonald et al. 2006).

In questo periodo la flotta commerciale (fig. 5), in tutto il mondo, è passata da un numero appena inferiore alle 42,000 unità a circa 90,000 imbarcazioni, mentre il tonnellaggio totale è passato dalle 160 alle 605 milioni di tonnellate (IFAW 2008). L'emisfero boreale (dove si concentra gran parte di traffico navale) è risultato maggiormente impattato lungo le zone costiere rispetto all'emisfero australe.

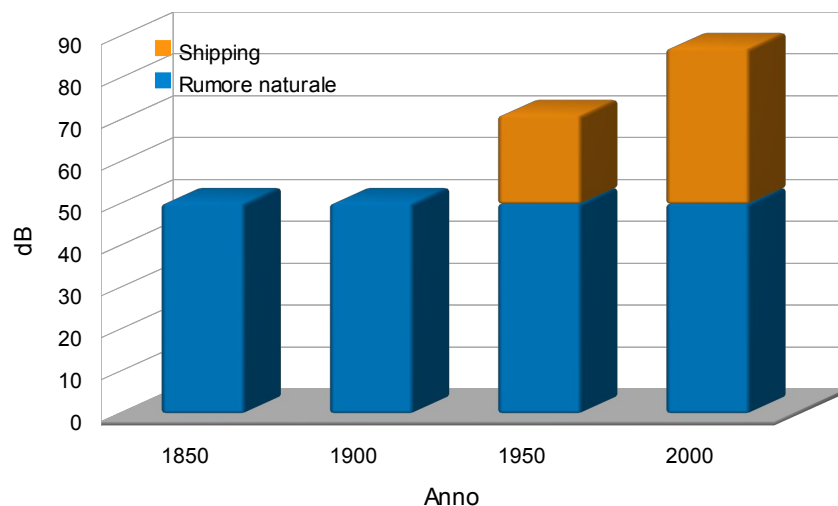


**Fig. 5** - Incremento della navigazione commerciale, dal 1965 al 2003, sia nel numero di imbarcazioni che nel tonnellaggio del carico (Fonte: IFAW 2008).

A causa del forte aumento dei volumi di traffico è stato registrato, nel settore Nord-Orientale dell'Oceano Pacifico, un innalzamento del rumore di fondo che se confrontato con le misure realizzate nelle acque australiane (dove il traffico navale è meno intenso) mostra come alle basse frequenze (100 Hz) vi siano dei livelli sonori anche 30-40 dB inferiori.

Se si volesse quantificare l'aumento del livello del rumore di fondo dal 1950 al 2000 si vedrebbe che, negli ultimi cinquanta anni, il rumore dovuto alla componente *shipping* è aumentata di 16 dB (Hildebrand 2005).

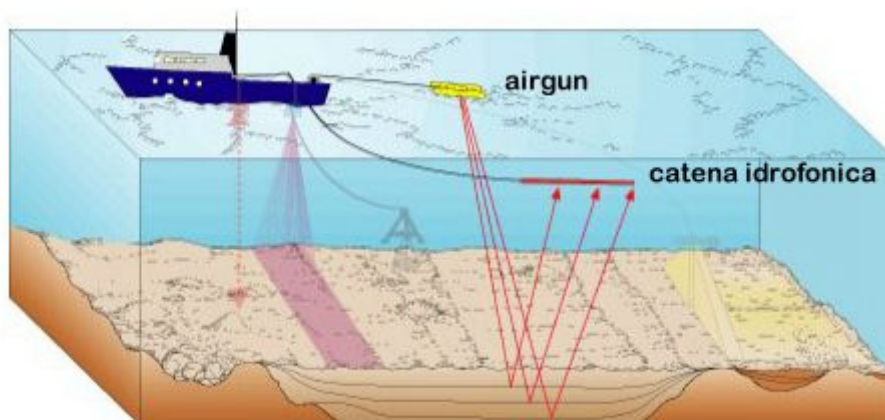




**Fig. 6** - Trend del rumore di fondo (dB), suddiviso nelle categorie naturale ed antropico-navale, dal 1850 al 2000. (Fonte: Hildebrand 2005).

### 1.2.1 - Le indagini geosismiche

Durante le indagini geosismiche, suoni di alta intensità e a basse frequenze vengono diretti verso la crosta terrestre e da questa riflessi per poter così avere una conoscenza dei vari strati geologici presenti nell'area indagata. Il suono riflesso viene processato per ottenere informazioni riguardo alla struttura e alla composizione delle formazioni geologiche, e per individuare potenziali riserve di idrocarburi.



**Fig. 7** - Schema delle componenti di base per un'indagine geosismica.

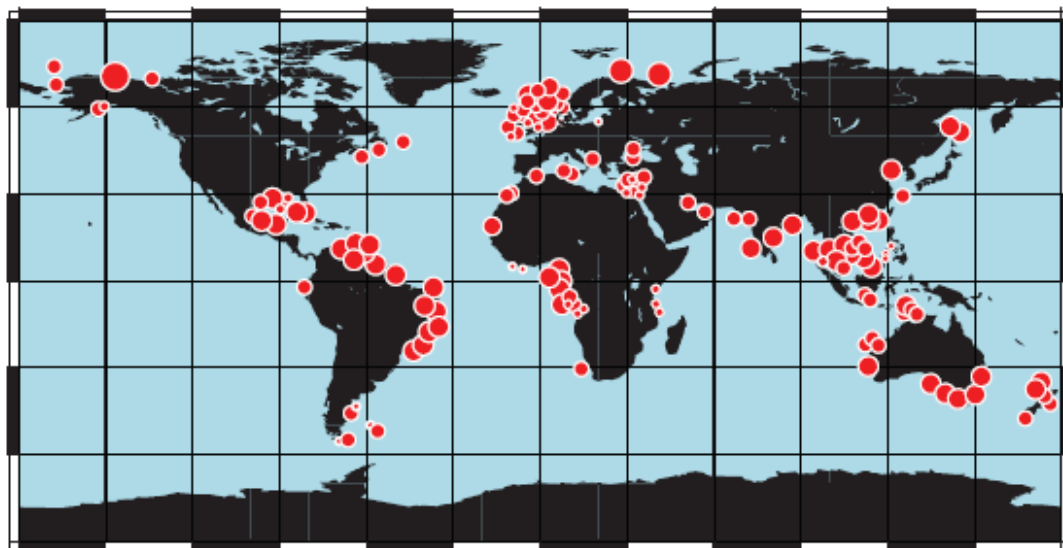
Durante queste operazioni la sorgente acustica, un array di *airguns*, viene trainato ad una profondità di 4-10 m con una velocità di 4-6 nodi, mentre la catena idrofonica (per la rilevazione dei segnali riflessi) viene posizionata ad una profondità di 12 metri ed ad una distanza di alcuni chilometri dall'array delle sorgenti.

Ad ogni singolo *airgun* è associabile un livello sonoro tra 215-230 dB re 1  $\mu$ Pa, con una concentrazione dell'energia tra i 10 ed i 300 Hz (Greene *et al.* 1994), e può interessare aree (in acque poco profonde, 20-25 m) distanti fino a 50-75 km.

### 1.2.2 - Lo sfruttamento dei giacimenti di olio e gas

Queste attività mirate all'estrazione di gas e olio da depositi sottomarini hanno un grande impatto sulla stabilità e la sopravvivenza di alcune popolazioni di cetacei.

Nel Gennaio 2005, ad esempio, ben 37 balene si sono spiaggiate sulle coste statunitensi della Carolina del Nord, in seguito all'intensa attività di esplorazione oceanografica del fondale per la ricerca di riserve di idrocarburi (Green 2005). Altri esempi di spiaggiamenti, legati all'impiego di questa tecnologia, si sono verificati nel 2002 sia nel Golfo della California che in Brasile.



**Fig. 8** - Distribuzione delle maggiori aree per lo sfruttamento di depositi di olio e gas nel mondo.

Olio e gas vengono recuperati utilizzando delle apposite piattaforme, molto varie per forme, dimensioni e materiali impiegati. Le differenti combinazioni di queste componenti creano varie modalità di distribuzione-trasmissione delle onde sonore all'interno della colonna d'acqua.

I suoni emessi da queste strutture possono essere prodotti da:

1. vibrazioni dei macchinari: sia dei sistemi di propulsione (motori diesel e motori principali) che di quelli ausiliari (generatori, pompe ed equipaggiamento per aria condizionata)
2. cavitazione: dovuta all'azione continua delle eliche dei motori, in grado di generare delle bolle che collassano rapidamente, o in una corrente turbolenta o contro la superficie delle eliche, creando dei suoni impulsivi. Questo fenomeno è responsabile del sibilo rumoroso spesso associato alle imbarcazioni.
3. rumore idrodinamico: associabile a movimenti dei flussi d'acqua (vortici indotti dalle vibrazioni, risonanza delle cavità, flussi turbolenti all'interno delle tubature) a contatto con una qualsiasi struttura fisica (scafo di un'imbarcazione, gambe di una piattaforma)

### 1.2.3 - I SONAR

I SONAR sono dei sistemi che introducono intenzionalmente l'energia acustica negli ambienti marini, con lo scopo di investigare tali ambienti: recuperare informazioni su oggetti presenti nella colonna d'acqua, sul fondale o all'interno dei sedimenti marini.

Da un punto di vista pratico, per quanto riguarda la tutela dei mammiferi marini, i sonar più pericolosi sono quelli attivi, ovvero quei sistemi che, a differenza dei passivi, emettono energia acustica ad alta intensità (fino a 200 dB re 1  $\mu$ Pa) andando a ricevere l'energia riflessa dagli eventuali oggetti presenti.

Questi sistemi sono impiegati in molte attività, sia di tipo civile che militare, e possono essere raggruppati in funzione delle frequenze di esercizio:

- bassa frequenza (< 1 kHz);
- media frequenza (1-20 kHz);
- alta frequenza (> 20 kHz).

**Tabella 2** - Proprietà acustiche di alcune tipologie di sonar attivi. I sonar 53 C e 56 sono i dispositivi che sono stati coinvolti negli spiaggiamenti di balene alle Bahamas. (Fonte: Simmonds et al. 2004 & MMC 2007).

Tipologia di sonar	Frequenze [kHz]	Valore medio del livello della sorgente [dB re 1 $\mu$ Pa @ 1m]
SURTASS LFA	0.1 – 0.5	235
SONAR 2087	0.1 – 0.5	200
Sonar 53 C	2.6 – 3.3	223
Sonar 56 C	6.8 – 8.2	235+
Ricerca e sorveglianza	2 – 57	230+

Nello spettro delle *basse frequenze* hanno un vasto impiego i sonar militari (LFA), dove vengono destinati principalmente per scopi di sorveglianza, permettendo ai sottomarini di recuperare informazioni su aree molto vaste (centinaia di migliaia di km, Hildebrand 2005). tra questi si possono citare:

1. il **SURTASS LFA** (*Surveillance Towed Array Sensor Sistem Low Frequency Sonar*) che viene attualmente utilizzato dalla marina statunitense;
2. il **SONAR 2087** (*UK Royal Navy Low Frequency Sonar System*): impiegato dall'esercito del Regno Unito.

Tra quelli a *medie frequenze* vi sono gli ASW (*AntiSubmarine Warfare*), progettati per la localizzazione di sottomarini su distanze di diverse decine di chilometri. Questa tipologia di sonar viene impiegata dalla marina anche per indagini sui fondali, comunicazioni tra piattaforme, etc.

I sonar ad *alte frequenze* sono altamente direzionali e sono stati disegnati per lavorare all'interno di range che vanno dalle poche centinaia di metri fino a qualche chilometro. Gli scopi possono andare dalla mappatura dei sedimenti marini fino all'azione mirata alla detezione di mine.

I sonar cosiddetti civili, vengono impiegati per individuare stock ittici, raccogliere informazioni sia sui fondali che sulla colonna d'acqua. Lavorano con frequenze di 3-200 kHz, e livelli di 150-235 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1m (Hildebrand 2005).

#### 1.2.4 - Le ricerche scientifiche

La strumentazione che viene impiegata in questo campo è molto varia: si va da semplici trasduttori disponibili sul mercato fino a sistemi appositamente disegnati che rispondono a ben precise specifiche tecniche.

Un esempio di queste attività è l'ATOC (*Acoustic Thermometry of Ocean Climate*), iniziata nei primi anni '90 con l'obiettivo di studiare il riscaldamento degli oceani. Il programma, poi divenuto NPAL (*North Pacific Acoustic Laboratory*) era sotto la costante attenzione di agenzie di controllo, dell'opinione pubblica, della comunità scientifica internazionale.

Da un punto di vista acustico le sorgenti sonore ATOC che venivano utilizzate in queste sperimentazioni avevano livelli di 195 dB re 1  $\mu$ Pa @1m (Hildebrand 2005), e venivano posizionate ad una profondità di 939 m, ovvero nelle vicinanze dell'asse del canale sonoro SOFAR. Il segnale trasmesso era centrato intorno ai 75 Hz, con una banda di 37.5 Hz (Hildebrand 2005).

Un secondo esempio è il *SOFAR floats*, un sonar utilizzato nel settore delle ricerche sottomarine che emette suoni ad alta intensità (195 dB re 1  $\mu$ Pa @1m, Hildebrand 2005), con delle frequenze tra i 185 ed i 310 Hz, e della durata superiore ai 120 secondi (Hildebrand 2005).

Inoltre, si produce rumore subacqueo con differenti tipi di sorgenti utili in molteplici attività come l'impiego delle attrezzature utilizzate per la mappatura del fondale e dei sedimenti sottostanti, lo studio della distribuzione dello spostamento delle specie marine, la ricerca di imbarcazioni perdute, la raccolta dei dati per l'implementazione di modelli climatici, etc.

#### 1.2.5 - La strumentazione acustica di disturbo ed i deterrenti acustici

Gli impianti di acquacoltura sono spesso soggetti a fenomeni di predazione da parte delle foche e di alcuni mammiferi marini. A questo scopo sono state sviluppate delle apparecchiature (*Acoustic Harrassment Devices* - AHDs) che, tramite la produzione di suoni omnidirezionali molto intensi (190-205 dB re 1  $\mu$ Pa @1m tra i 10-25 kHz), mantengono lontani i predatori dalle vasche di crescita.

I **deterrenti acustici** (*Acoustic deterrent Device* - ADD) svolgono una funzione simile, ovvero generano dei suoni che mantengono i mammiferi marini lontano dalle reti, nelle quali potrebbero rimanere intrappolati.

I segnali acustici che vengono prodotti dai deterrenti hanno dei livelli intorno ai 130-150 dB re 1  $\mu$ Pa @ 1 m.

#### 1.2.6 - I dragaggi e le esplosioni sottomarine

Diversi studi hanno documentato gli effetti del rumore sottomarino, generato da operazioni di dragaggio, sui cetacei. Ad esempio le balene grigie hanno evitato, per diversi anni, la laguna di Guerre Negro in California (Bryant *et al.* 1984).

Le balene della Groenlandia esposte a delle riproduzioni dei suoni creati da dei dragaggi (del livello di 122-131 dB re 1  $\mu$ Pa @1m) si sono spostate dall'aera in cui sono stati riprodotti i suoni, fino a raggiungere una distanza di 2 km dalla sorgente del rumore (Wartzok *et al.* 1989).

Ci sono due tipologie di esplosioni antropiche in grado di produrre suoni ad alta intensità nell'ambiente oceanico: esplosioni nucleari ed esplosioni chimiche.

Le esplosioni nucleari sono una sorgente sonora estremamente potente: tests del passato hanno avuto probabilmente un impatto significativo sui cetacei che si trovavano nelle immediate vicinanze, anche se non ci sono riscontri su spiaggiamenti di cetacei avvenuti negli stessi periodi.

Le esplosioni chimiche vengono utilizzate per molti scopi: ricerche oceaniche, costruzioni e test militari. Inizialmente erano impiegate anche nelle indagini geosismiche, prima che venissero rimpiazzate dagli airgun sismici in grado di offrire una localizzazione delle potenziali sorgenti molto più accurata.

Da un punto di vista acustico le caratteristiche spettrali e di ampiezza dei suoni prodotti da queste esplosioni varia sensibilmente con il peso della carica impiegata e della profondità a cui viene fatta detonare. Il livello (RMS) iniziale di un'onda di shock è dato da:

$$\text{SPL dB re 1 } \mu\text{Pa @ 1m} = 269 \text{ dB} + 7.53 \times \log_{10}(w)$$

dove  $w$  è il peso (in libbre) della carica impiegata (Hildebrand 2005).

Ad esempio con una carica di TNT da 100 libbre (circa 45 kg) si produrrebbe un onda sonora da un SPL di 284 re 1  $\mu$ Pa @ 1m, con delle frequenze tra i 10 Hz ed 1 kHz (Hildebrand 2005).

### 1.2.8 - Il traffico navale

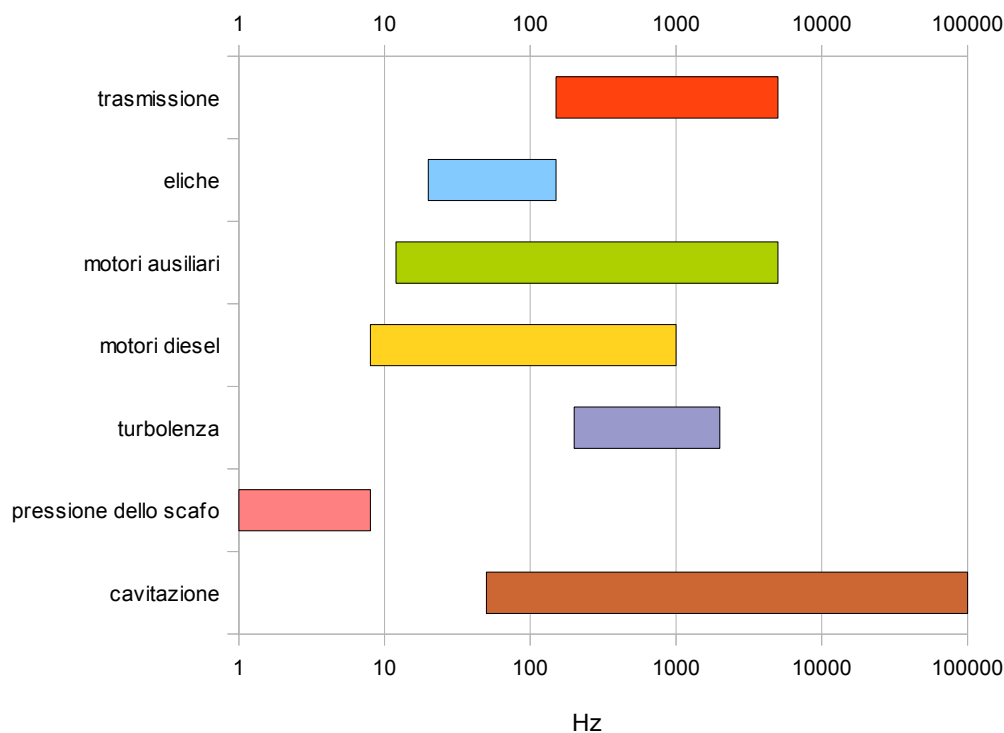
A differenza dei survey sismici e dei sonar, ovvero di sorgenti acustiche intenzionali, l'energia sonora prodotta dal traffico navale non può essere ristretta ad un'area ben definita all'interno di un dato intervallo temporale, in quanto le basse frequenze emesse da queste sorgenti, in presenza di canali di focalizzazione, possono propagarsi a notevoli distanze dalla sorgente.

Le aree costiere sono le zone in cui il rumore antropico raggiunge i livelli più alti (valori vicino ai 100 dB, fino ai 150 dB re 1  $\mu$ Pa @1m nelle vicinanze dei porti, Dos Santos *et al.* 1995), a causa del continuo ed intenso traffico di imbarcazioni da pesca, turistiche e commerciali (Roussel 2002).

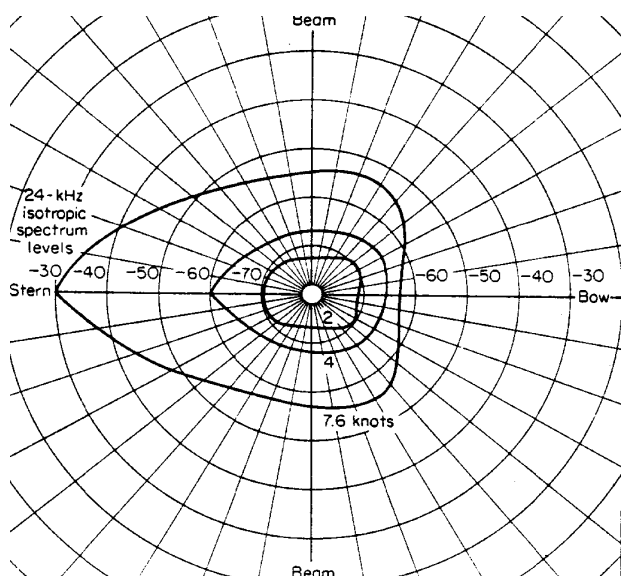
Secondo Green *et al.* (1994), circa il 90% dell'energia che l'uomo immette nell'ambiente marino viene prodotta dagli impianti di propulsione delle imbarcazioni, con un contenuto spettrale che si colloca in un intervallo inferiore ad 1 kHz. Le dimensioni del natante, la sua velocità e l'efficienza delle componenti meccaniche dei motori sono tutti fattori che concorrono a determinare il livello complessivo prodotto da una qualsiasi imbarcazione.

Se da una parte un'imbarcazione può essere vista come una singola sorgente, è al contempo possibile scomporla in una serie di sotto-sorgenti, ognuna con delle frequenze caratteristiche:

1. i motori: dove il movimento dei cilindri determina la frequenza fondamentale del rumore prodotto;
2. i macchinari: di cui fanno parte le scatole degli ingranaggi di riduzione per le quali la frequenza fondamentale è determinata dal numero di denti che vengono a contatto ogni secondo. Queste sono necessarie per l'accoppiamento tra le macchine di propulsione e l'asse dell'elica: in determinate circostanze, possono anche produrre più rumore rispetto ai motori.
3. le eliche (o altre forme di propulsione): a cui è associato il fenomeno della cavitazione (descritto in precedenza)
4. lo scafo: sorgente di rumore ad alte frequenze a causa sia della formazione della scia turbolenta che dello sfregamento dell'acqua sulle pareti laterali dello scafo.



**Fig. 9** - Gamme di frequenza tipiche delle varie fonti di rumore in una nave (Fonte: Collier 1998).



**Fig. 10** - Direttività del rumore irradiato da una nave (Fonte: Urlick 1982).

Analizzando il contenuto spettrale delle quattro classi di sorgenti si può notare come la maggior parte delle informazioni sono comprese complessivamente nel range tra i 10 Hz ed i 2 kHz, dove il contributo più netto viene fornito dalla cavitazione e dai sistemi di propulsione.

Un'altra caratteristica importante che deve essere necessariamente considerata quando si

vuole stimare il rumore prodotto dalle imbarcazioni nell'ambiente marino è la direttività, ovvero vedere se ci sono delle direzioni preferenziali lungo le quali le onde sonore tendono a propagarsi, o se queste sorgenti sonore sono da considerarsi omnidirezionali. Visto che sia i motori che il sistema di propulsione di un natante sono installati a poppa ci si aspettano dei livelli sonori più alti nella parte posteriore.

**Tabella 3** - Tipologie di imbarcazioni, range di frequenze emesse e livello della sorgente (Fonte: Simmonds et al. 2004 & MMC 2007).

Tipo di imbarcazione	Frequenze [kHz]	Livello della sorgente [dB re 1 $\mu$ Pa @ 1m]	Riferimenti
Jetski (650 cc)	0.8 – 50.0	75 – 125	Evans <i>et al.</i> 1996
Gommoni	6.3	152	Malme <i>et al.</i> 1989
Barca a motore (7 m)	0.63	156	Malme <i>et al.</i> 1989
Navi da pesca	0.25 – 1.0	151	Greene 1985
Peschereccio	0.1	158	Malme <i>et al.</i> 1989
Rimorchiatore	0.037	166	Buck <i>et al.</i> 1972
(scarico)	1.0	164	Miles <i>et al.</i> 1989
	5.0	145	
Rimorchiatore	1.0	170	Miles <i>et al.</i> 1989
(carico)	5.0	171	
Navi da lavoro (motore diesel)	0.63	159	Malme <i>et al.</i> 1989
Nave cisterna (135 m)	0.43	169	Buck <i>et al.</i> 1972
Nave cisterna (179 m)	0.06	180	Ross 1976
Grande nave cisterna (266 m)	0.008	187	Thiele <i>et al.</i> 1983
Grande nave cisterna (337 m)	0.007	185	Thiele <i>et al.</i> 1983
Grande nave cisterna (340 m)	0.007	190	Thiele <i>et al.</i> 1983
Nave container (219 m)	0.033	181	Buck <i>et al.</i> 1972
Nave container (274 m)	0.008	181	Ross 1976
Nave da carico (135 m)	0.041	172	Thiele <i>et al.</i> 1983



**Tabella 4** - Caratteristiche acustiche delle principali tipologie di sorgenti di rumore (Fonte: Simmonds et al. 2004 & MMC 2007).

Sorgente	Frequenze [kHz]		Livello massimo [dB re 1 $\mu$ Pa @ 1m]
	Specifiche	Totali	
Traffico navale	0.07 – 50	0.007 – 50	156-190
Indagini geosismiche	0.005 – 0.15	0.005 – 0.15	> 259
Sonar navali a basse frequenze	0.1 – 0.5		240
Sonar navali a medie frequenze	2.6 – 8.2	0.1 – 200	245
Sonar per pesca e ricerche	3 – 200		> 235
Deterrenti acustici	5 – 25	5 – 25	205
Esplosioni chimiche	0.01 – 1	0.01 – 1	284

## 2 - Studio delle caratteristiche del volume di propagazione

L'analisi delle caratteristiche dell'ambiente di propagazione è necessaria per poter definire e quantificare i vari parametri che influiscono maggiormente sulla propagazione.

### 2.1 - Il Santuario dei Cetacei

L'area di indagine coincide sostanzialmente con la riserva marino-costiera del Santuario dei mammiferi marini Pelagos, una zona che si estende all'interno del bacino del Mediterraneo nord occidentale fra le coste della Toscana, Liguria, Sardegna, Corsica e Principato di Monaco, per un'area complessiva di quasi 90.000 km<sup>2</sup>. Il Santuario dei Cetacei del Mar Ligure-Provenzale è stato



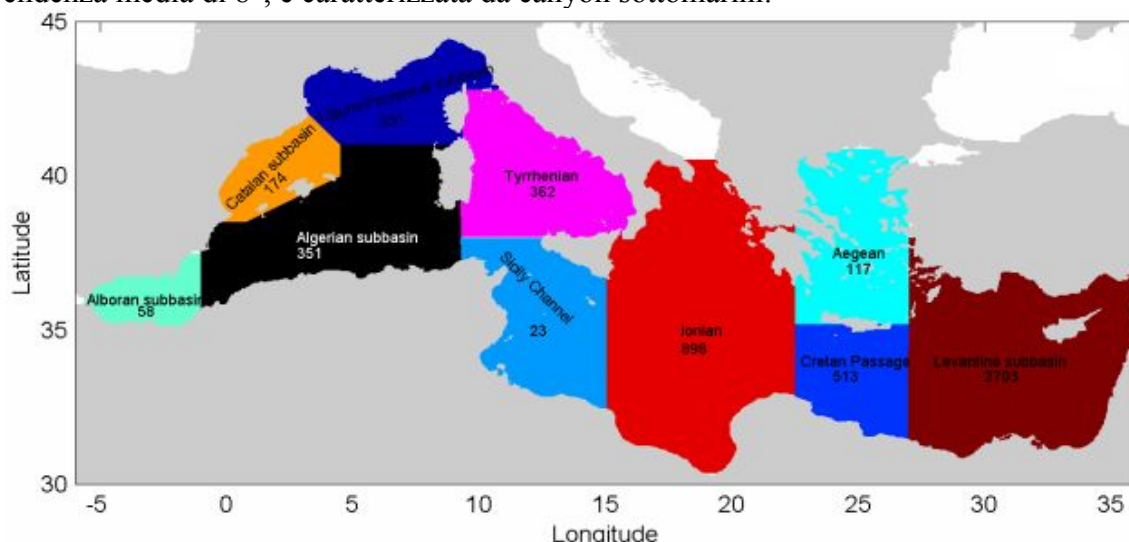
istituito nel 1999, tramite un accordo siglato dai tre stati coinvolti: Italia, Francia e Principato di Monaco, e nasce dall'esigenza di dare una protezione concreta ed efficiente ad un habitat ricchissimo di biodiversità (cetacei, tonno, pesce spada e squali), e perciò definita come "area specialmente protetta di interesse Mediterraneo" (ASPIM).

**Fig. 11** - Il Santuario Pelagos.

### 2.2 - Caratteristiche oceanografiche

Da un punto di vista fisiografico l'area progettuale occupa parte dei bacini Ligure-Provenzale e del Tirreno, all'interno di una porzione che si estende a nord da 41° fino ai 44.4°, ed ad est da 5.6° a 11.5°. Il bacino Tirrenico (situato a Nord del parallelo 41°), è caratterizzato da elementi fisiografici quali: la piattaforma continentale ben sviluppata, la scarpata continentale superiore, i bacini peritirrenici ed i *seamounts* peritirrenici (con orientazione N-S).

Nel **bacino Liguro-Provenzale** la platea continentale diventa quasi inesistente e il fondale precipita in una ripida scarpata verso il fondo della piana abissale del bacino Sardo-corso. La scarpata, con una pendenza media di 8°, è caratterizzata da canyon sottomarini.



**Fig. 12** - Suddivisione dei principali bacini oceanografici del Mar Mediterraneo (Fonte: Barbanti & Poulain 2007).

Generalmente la velocità con cui le onde sonore si propagano attraverso un qualsiasi mezzo (gassoso, liquido o solido) dipende dalle caratteristiche del mezzo stesso. L'elasticità del mezzo e la sua densità sono i parametri che modificano il valore della velocità di propagazione secondo la seguente formula di Mackenzie:

$$c(P, S, T) = 1448.96 + (4.591)T - 5.304 \times 10^{-2} T^2 + 2.374 \times 10^{-4} T^3 + 1.340 (S - 35) + 1.630 \times 10^{-2} P + 1.675 \times 10^{-7} D^2 - 1.025 \times 10^{-2} T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13} T P^3$$

Essa è valida per: temperatura da 2 a 30 °C; salinità da 25 a 40 ‰ e profondità da 0 a 8000 m.

Il valore convenzionale della velocità del suono in acqua, ad una temperatura di riferimento di 23 °C, è di circa 1500 m/s, ovvero circa 4.3 volte il valore in aria.

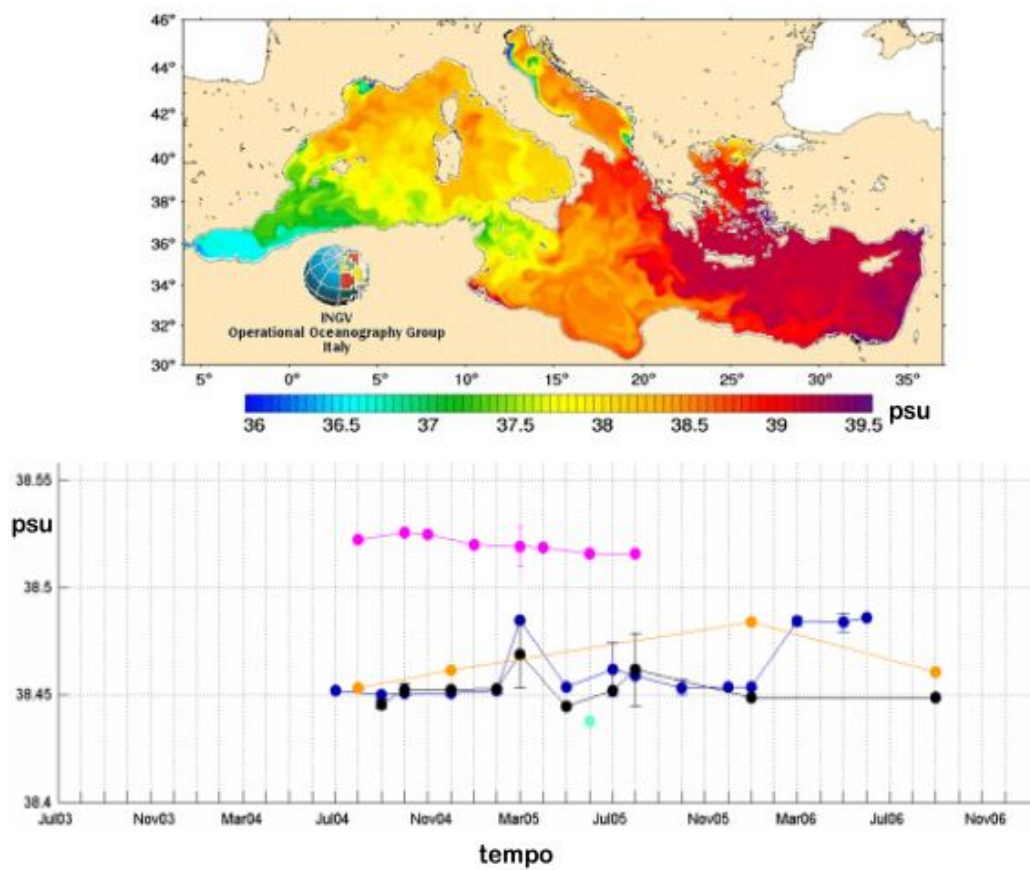
Questa semplificazione è valida qualora ci si trovi in un ambiente perfettamente omogeneo sia orizzontalmente che verticalmente. In realtà le caratteristiche chimico-fisiche (che determinano variazioni locali della densità), quali temperatura, pressione e salinità, sono molto variabili sia da un punto di vista spaziale che temporale, perciò si deve considerare che anche il valore della velocità del suono sia soggetta a fluttuazioni più o meno significative.

Per quanto riguarda le temperature, il bacino Liguro-Provenzale è più freddo rispetto a quello Tirrenico, sia nello strato superficiale che in quello più profondo.

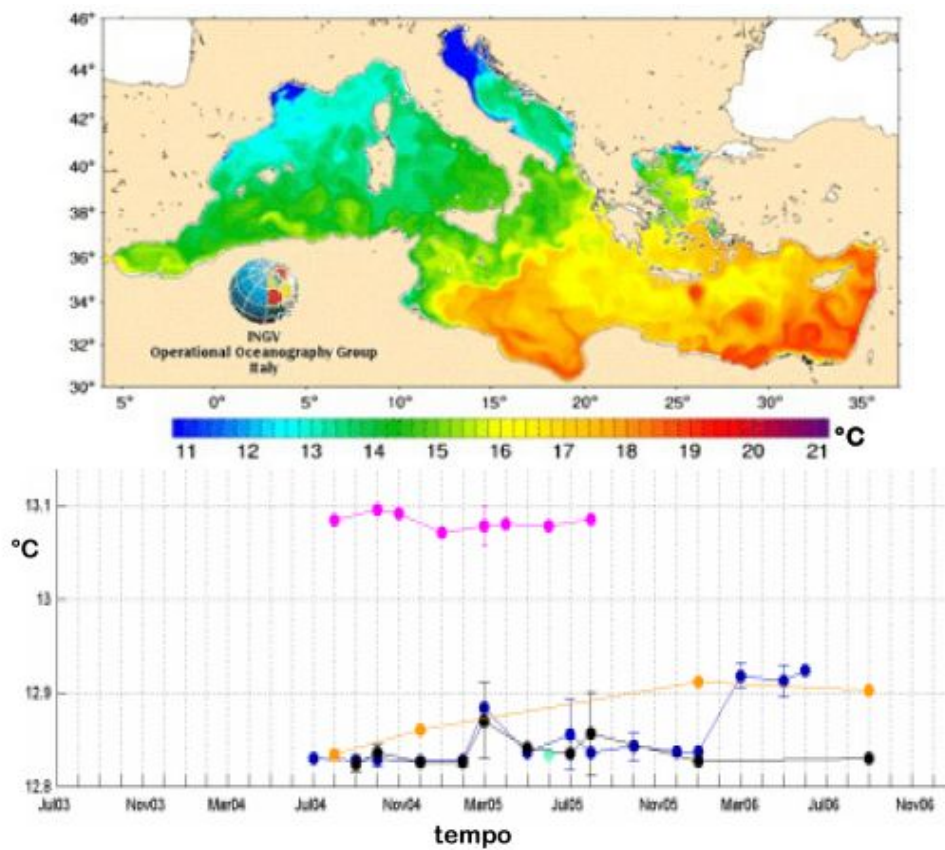
Per quanto concerne la salinità, i valori della salinità profonda sono pressoché simili, mentre per quella superficiale il Tirrenico ha fluttuazioni maggiori rispetto al Liguro-Provenzale, anche se il massimo valore raggiunto è uguale.

**Tabella 5** – Valori superficiali e profondi di temperatura e salinità nel Mediterraneo (Fonte: Barbanti & Poulain 2007).

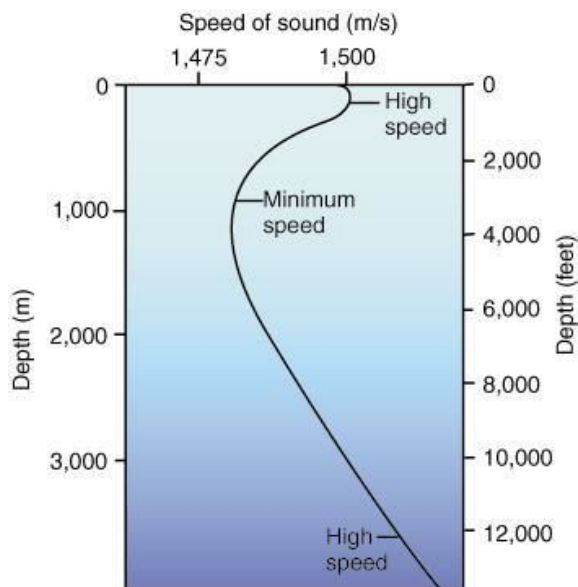
Bacino	Temperatura Superficiale	Temperatura Profonda	Salinità Superficiale	Salinità Profonda
	[°C]		[psu]	
Tirreno	13.6-14.1	13.1	37.6-38.5	38.5
Liguro-Provenzale	12.5-13.6	12.85	38.1-38.5	38.45



**Fig. 13, 14** - Temperatura superficiale e profonda (grafici in basso) e salinità superficiale e profonda (grafici in alto) del bacino Tirrenico (viola) e Liguro-Provenzale (blu). (Fonte: Barbanti & Poulain 2007).



### 2.3 - Percorsi acustici



La stratificazione delle acque marine ha una certa rilevanza sulla propagazione delle onde sonore nelle stesse.

Tipicamente la colonna d'acqua può essere suddivisa in una **parte superficiale**, in cui la temperatura dell'acqua varia con oscillazioni sia a breve termine (perturbazioni, alternanza giorno/notte) sia a lungo termine (stagioni), con un periodo caldo (primavera ed estate) durante il quale la radiazione solare riscalda maggiormente gli strati superficiali, aumentandone la temperatura e disegnando un profilo termico che diminuisce da un massimo all'interfaccia aria-acqua fino al minimo in cui inizia l'isoterma profonda.

E in una parte sottostante questa superficiale, se ne trova uno più profondo nel quale la temperatura rimane costante indipendentemente da fattori esterni

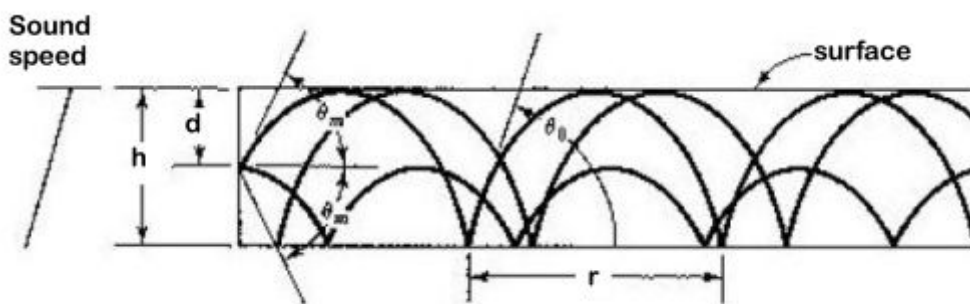
(**isoterma profonda**), e la pressione è l'unico parametro in grado di influenzare la velocità del suono.

Il limite fra questi due strati ha una profondità variabile a seconda della posizione geografica. Per il Mediterraneo, un bacino semichiuso dallo stretto di Gibilterra (300 metri di profondità), questo risulta caratterizzato dall'assenza totale di acque fredde che l'altezza della soglia non permette di far entrare dall'Oceano Atlantico. Così, a partire da circa 150-200 m di profondità, l'isoterma profonda del Mediterraneo ha una temperatura intorno ai 12-13°C.

Le modalità di propagazione sono quindi fortemente dipendenti dal profilo che caratterizza localmente la colonna d'acqua, con il rumore in grado di interessare aree più o meno ampie.

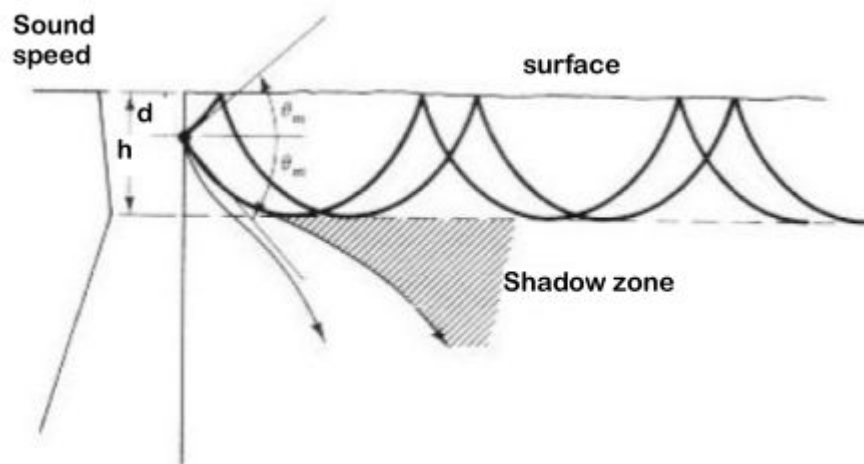
In presenza di un gradiente di velocità inizialmente negativo, i raggi sonori tendono verso zone a minor gradiente, ovvero curvano verso il fondale o uno strato inferiore discontinuo, dal quale vengono riflessi. Si crea quindi un doppio effetto di rifrazione verso il basso e riflessione verso l'alto, che contribuisce a confinare i raggi in una porzione limitata.

Questa condizione, che si verifica in situazioni in cui il termoclino risulta piuttosto marcato, accomuna tipicamente acque basse e condizioni meteo tipiche della stagione estiva.



**Fig. 15** - Percorso dei raggi acustici in presenza di un gradiente di velocità negativo (Fonte: Portunato 2008).

Analogamente a quanto visto per il gradiente negativo, nel caso in cui la colonna d'acqua sia caratterizzata da un gradiente positivo, il doppio effetto di rifrazione-riflessione è speculare, con la conseguenza che il percorso seguito dai raggi acustici descriverà degli archi con concavità verso l'alto.



**Fig. 16** - Percorso dei raggi acustici in presenza di un gradiente di velocità positivo (Fonte: Portunato 2008).

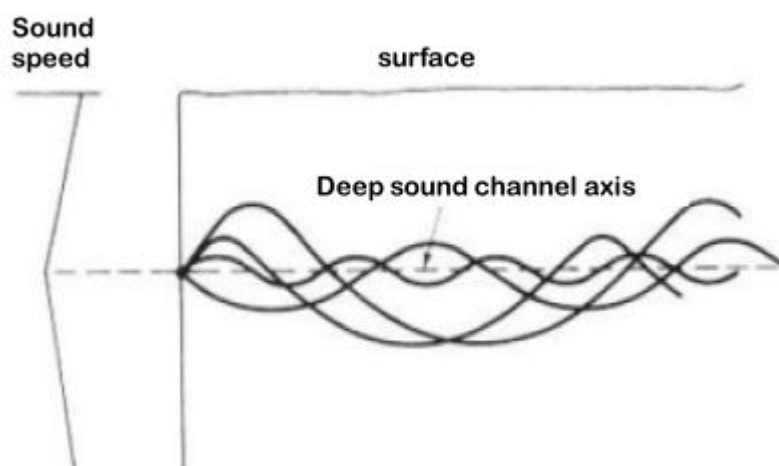
Analogamente al caso precedente la pendenza del profilo, in questo caso positiva, determina il valore degli angoli limiti e quindi dell'estensione delle rispettive zone d'ombra.

In presenza di acque sufficientemente profonde da avere un'inversione del profilo di velocità, si verranno a creare aree separate da due differenti gradienti di velocità (negativo nella parte superficiale e positivo nella profonda), condizione necessaria per la formazione di un canale di focalizzazione delle onde, **SOFAR** (acronimo di Sound Fixing And Ranging) o **Deep Sound Channel**, con asse in corrispondenza del minimo della SS.

L'effetto di focalizzazione si crea in quanto le onde sonore, che si spostano dall'asse del canale verso l'alto o verso il basso, vengono in contatto con porzioni di fluido a velocità maggiore con una conseguente rifrazione del fronte d'onda verso l'asse del canale.

Le onde rimangono intrappolate in questo canale propagandosi per lunghe distanze (anche diverse centinaia di chilometri).

Alle basse e medie latitudini la profondità del SOFAR è compresa tra i 600 e 1200 m. Nelle zone subtropicali la profondità è maggiore, mentre è più vicino alla superficie alle alte latitudini.



**Fig 17** - Propagazione dei raggi nel canale acustico profondo (Fonte: Portunato 2008).



## 2.4 - Transmission Loss

Man mano che le onde sonore si allontanano dalla sorgente, la loro intensità diminuisce:

- per divergenza geometrica (sferica o cilindrica);
- per assorbimento da parte dell'acqua;
- impatto con ostacoli o zone a diverse densità.

Nel caso dell'assorbimento l'acqua marina esercita un duplice effetto sulle onde: viscoso e chimico.

Nel caso dell'**assorbimento viscoso** il movimento delle particelle generato dal suono produce calore a causa della resistenza viscosa. L'assorbimento converte una porzione dell'energia vibrazionale in calore man mano che le onde si spostano lontano dalla loro sorgente. Questa perdita di energia è quindi proporzionale alla distanza dalla sorgente a cui noi andiamo a considerarla, ed è descrivibile attraverso un opportuno coefficiente di assorbimento (Ainslie & McColm 1998):

$$\alpha = 1.0936 \left[ \frac{0.1 f^2}{1 + f^2} + \frac{40 f^2}{4100 + f^2} \right]$$

Il coefficiente di assorbimento viscoso, che viene espresso per l'appunto in dB/km, dipende strettamente sia dalle frequenze delle onde che si stanno spostando, che dalla temperatura e dalla profondità dell'acqua in cui troviamo.

Nell'**assorbimento chimico** (frequenze inferiori a 1 MHz) l'energia trasportata dalle onde viene assorbita da delle molecole presenti normalmente in soluzione nelle acque marine. Queste molecole sono presenti in più stati stabili, dove l'equilibrio tra i vari stati è dovuto solo al valore della pressione idrostatica. Quindi cambi di pressione, come il caso delle onde sonore, possono far sì che una molecola passi da uno stato stabile ad un altro convertendo di fatto l'energia trasportata dalle onde in calore. Sono due, in particolare, le specie chimiche che contribuiscono a questo tipo di assorbimento: l'acido bórico ed il solfato di magnesio.

**Tabella 6** - Assorbimento chimico delle acque marine in funzione della frequenza.

Frequenza [kHz]	Assorbimento [dB/km]
0.1	$10^{-3}$
1	0.1
10	1

## 3 - Scelta del modello idoneo a simulare la propagazione all'interno dell'area di studio

In questa parte si inizia ad affrontare l'argomento centrale del lavoro, ovvero la scelta del modello e la sua conseguente applicazione alla caratterizzazione della propagazione acustica all'interno dell'area progettuale.

### 3.1 - Equazione d'onda e tipologie di modelli

I modelli matematici utilizzati per predire il comportamento delle onde sonore vengono suddivisi in base all'approccio che seguono per risolvere l'equazione dell'onda.



$$\nabla^2 \Phi = \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \Phi}{\partial t^2} \quad \nabla^2 = \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$$

dove:

$\nabla$  è l'operatore Laplaciano,

$\Phi$  è il potenziale di velocità,

$c$  è la velocità del suono,

$t$  è il tempo.

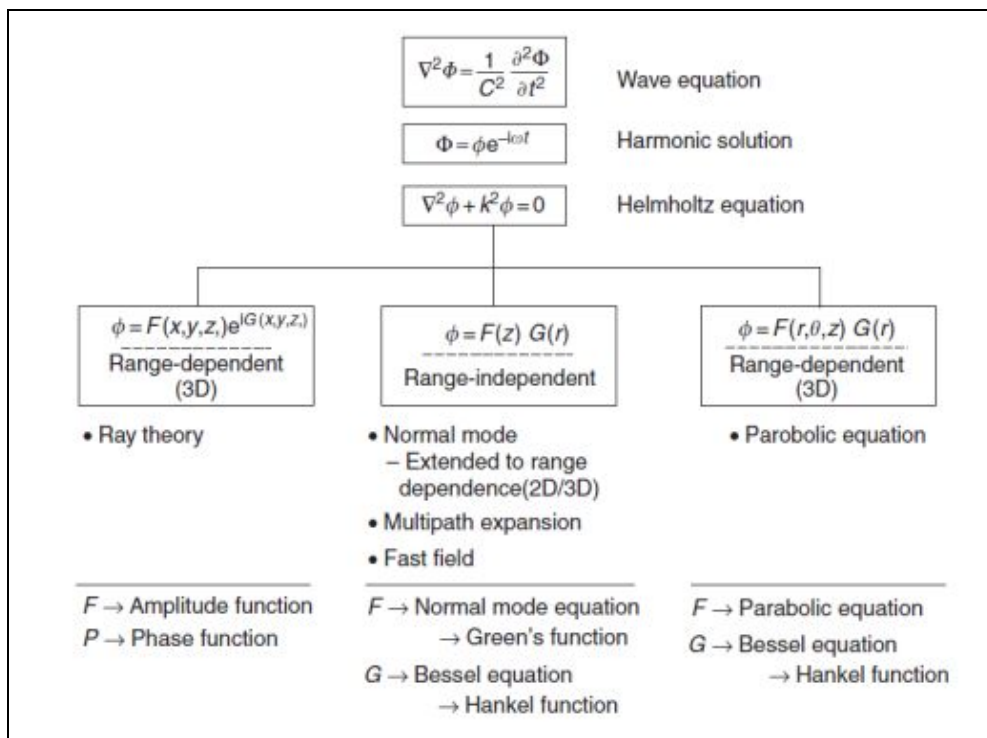
Una prima classificazione può essere basata sulle cinque soluzioni canoniche dell'equazione dell'onda:

- (1) teoria dei raggi (*ray-theory*),
- (2) modi normali (*normal mode*),
- (3) espansione con più percorsi dei raggi (*multipath expansion*),
- (4) campo veloce (*fast field*),
- (5) equazione parabolica (*parabolic equation*).

All'interno di queste cinque categorie può essere realizzata una suddivisione più fine ipotizzando due classi ben distinte:

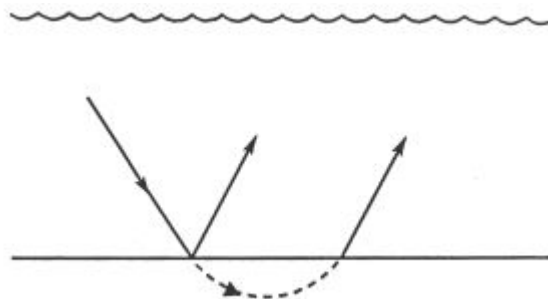
- **range-independent**: si considera la colonna d'acqua come suddivisa in una serie di strati orizzontali, all'interno dei quali le proprietà chimico-fisiche variano solo in funzione della profondità;
- **range-dependent**: per i quali le proprietà del mezzo sono da considerarsi variabili a seconda della distanza e dell'angolo dal ricevitore, oltre che della profondità.

Queste proprietà variabili comprendono la velocità del suono e la batimetria, oltre al grado di agitazione del mare (*sea state*), il grado di assorbimento e la composizione del fondale.



**Fig. 18** - Diversi tipi di modelli secondo le soluzioni all'equazione di Helmholtz (Fonte: Etter 2003).

I modelli della classe **ray-tracing** calcolano la perdita per trasmissione (*Transmission Loss* - TL) applicando la teoria dei raggi ad ambienti marini *range-dependent*. Questa tecnica modella la propagazione sonora tramite due equazioni, una che definisce la geometria dei raggi e l'altra che determina l'ampiezza delle onde, derivate a partire dall'equazione di Helmutz. Modelli di tipo *ray-tracing* permettono di affrontare l'effetto di diffrazione dei sedimenti marini, tramite opportune funzioni che vanno a determinare il valore dello sfasamento del raggio (*beam displacement*).



**Fig. 19** - Modellizzazione del *beam displacement* (Fonte: Etter 2003).

I modelli **normal-mode** si basano su delle soluzioni derivate da una rappresentazione integrale dell'equazione dell'onda, che viene risolta assumendo una simmetria di tipo cilindrico all'interno di un mezzo stratificato. Le proprietà che caratterizzano l'ambiente di propagazione sono funzione solamente della profondità, limitando di fatto questa tipologia di modelli a soluzioni *range-independent*.

Nei modelli **multipath expansion** la soluzione canonica dell'onda viene risolta tramite delle tecniche che espandano la rappresentazione integrale del campo acustico in termini di un set infinito di integrali, dove ad ognuno viene associata una particolare classe di percorsi acustici (*ray-path*). Questo metodo si pone quindi come un'approssimazione impiegata per risolvere equazioni *depth-dependent* derivate da soluzioni *normal-mode* dell'equazione dell'onda, dove ciascun modo normale viene associato ad una classe di *ray-path*.

I modelli di tipo **fast-field**, o integrazione del numero d'onda (*wavenumber integration*), validi all'interno di ambienti di tipo *range-independent*, si basano su un approccio che permette di risolvere l'equazione tramite l'impiego della trasformata rapida di Fourier (*Fast Fourier Transform*). Nell'ultima tipologia di modelli, **parabolic equation**, l'equazione dell'onda viene risolta partendo dall'assunzione che l'energia sonora si propaghi ad una velocità vicina ad una presa come riferimento, sia per le onde di tipo compressionale che di taglio. Grazie a questo approccio si possono risolvere ambienti *range-dependent*, considerandoli come una sequenza di regioni *range-independent*, dalle quali non sono previste perdite di energia per retro-diffusione (*backscatter*).

### 3.2 - Review dei principali modelli esistenti

In questa fase si è proceduto in un'analisi preliminare dei principali modelli utilizzati nel campo dell'acustica subacquea per modellare i campi sonori.

Di seguito si riporta una breve descrizione dei modelli presi in esame.

#### DANM (Dynamic Ambient Noise Model)

È un modello sviluppato dalla marina militare americana, particolarmente orientato alla caratterizzazione del rumore da traffico navale, nel quale si considerano cinque differenti classi di imbarcazioni:

- |                                |                                |
|--------------------------------|--------------------------------|
| (1) supertanker (18-22 nodi),  | (4) tanker (10-15 nodi),       |
| (2) large tanker (15-18 nodi), | (5) navi da pesca (7-10 nodi). |
| (3) merchant (12-16 nodi),     |                                |

Nelle sue diverse versioni, applica modelli di calcolo del TL come Astral o Parabolic Equation, attingendo ad una database batimetrico per modellare le asperità del fondale marino.

#### ANDES (Ambient Noise Directionality Estimation System)

Approccio simile al DANM: modellizzazione accurata dell'ambiente marino che tiene conto dei dati di batimetria, dell'influenza dei profili di velocità del suono sulla propagazione, dell'impatto con differenti tipologie di fondali, dei dati marini (*Sea State - SS*), della densità navale e del livello sonoro delle navi.

Il TL viene calcolato tramite l'Astral Model, mentre per quello che riguarda i dati sulle velocità del vento devono essere inseriti dall'utilizzatore invece che ricavati da un database come succede per il DANM.

Entrambi i modelli ANDES e DANM attingono a dei database riservati della marina militare, come ad esempio l'*Historical Shipping Density* (HITS).

#### DUNES (Directional Underwater Noise Estimate)

È un modello che permette di stimare il grado di inquinamento acustico delle acque marine, in una banda spettrale che si estende tra i 20 ed i 200 Hz.

Il suo ambito di azione è nell'emisfero australe (Australia e Nuova Zelanda), aree in cui la densità navale è decisamente meno intensa rispetto all'emisfero nord.

#### RANDI (Research Ambient Noise Directionality)

Utilizza lunghezza e velocità delle navi per caratterizzare le loro emissioni di rumore.

Si basa anch'esso sulle informazioni contenute in vari database: densità navale (HITS), di vento (HWS), batimetria (ETOPO), profili di velocità (SWSS, HOP, GDEM) e caratteristiche acustiche del fondale (LFBL, BLUG).

#### BELLHOP

Questo modello permette di calcolare, via *ray tracing*, campi sonori all'interno di ambienti oceanici bidimensionali variabili (con superfici ad assorbimento variabile), dove il volume di propagazione consiste di un mezzo acustico caratterizzato da velocità del suono dipendenti sia dalla profondità che dal range.

Il mezzo di propagazione viene caratterizzato in maniera piuttosto dettagliata, dalla colonna d'acqua fino al fondale marino, e possono essere gestiti ambienti sia di tipo range-dependent che range-independent.

Bellhop genera una serie di output utili tra i quali: Transmission Loss (coerente, incoerente e semicoerente), coordinate dei raggi, *eigenrays*, ampiezza, etc.

### *3.3 - Scelta del modello: il BELLHOP*

La precedente analisi, sulle principali tipologie di modelli esistenti per descrivere la propagazione sonora negli ambienti marini, è stata finalizzata con la scelta del modello da impiegare all'interno del progetto GIONHA.

Dopo un'attenta valutazione delle opzioni analizzate la scelta è ricaduta sul Bellhop, per una serie di considerazioni che passeremo ad esporre.

Il Bellhop si presenta come un modello completo e flessibile, per descrivere compiutamente l'area

progettuale. La possibilità di lavorare all'interno di ambienti oceanici caratterizzabili nelle principali proprietà acusticamente sensibili, profili sonori, batimetria, etc, è uno tra i pregi più significativi.

La colonna d'acqua non viene, inoltre, semplificata eccessivamente riducendola ad un mezzo orizzontalmente omogeneo, in cui si va a perdere il contributo dato dalla presenza di molteplici profili di velocità, ma viene trattata come un vero e proprio ambienti *range-dependent*, con la possibilità di riprodurre con maggior precisione ed affidabilità quella che è la reale stratificazione orizzontale delle acque come conseguenza della varianza spazio-temporale.

Un altro punto di forza è la possibilità di modellare con dettaglio le due principali interfacce: aria-acqua ed acqua-fondale.

Le sezioni batimetriche che descrivono le asperità dei fondali sono integrate con i dati geoacustici dei sedimenti marini (velocità del suono, densità, attenuazione onde sonore, etc.) che assumono una rilevanza non trascurabile qualora ci si trovi in presenza di ambienti caratterizzati da una piattaforma continentale piuttosto sviluppata (coste della Toscana).

A queste peculiarità si aggiunge la possibilità di lavorare con codici liberamente disponibili ed aggiornati, all'interno di un pacchetto di algoritmi di sicura rilevanza scientifica.

La tipologia del modello scelto (*ray-tracing*) si coniuga bene con le esigenze progettuali, ovvero la descrizione acustica di un'area piuttosto grande come quella del Santuario dei Cetacei, da realizzarsi tramite una serie di simulazioni su sezioni molto lunghe (da pochi chilometri fino a centinaia di chilometri).

Il problema di dover caratterizzare un ambiente di **campo lontano**, con propagazione prettamente cilindrica, trova nei modelli di tipo *ray-tracing* una valida soluzione all'equazione dell'onda, senza la necessità di dover ricorrere all'impiego di modelli computazionalmente più pesanti, come *normal modes* (più adatti per problemi acustici in condizioni di **campo vicino**).

### 3.3.1 - Struttura dell'enviromental file

L'**enviromental file** (env file) è il file di input che viene utilizzato dai modelli dell'Acoustic Toolbox (Kraken, KrakenC, RamGeo, Scooter), per descrivere la propagazione in ambienti marini, implementati da Michael Porter.

La sua struttura è comune a gran parte di tali modelli, tranne per alcune parti che differiscono in funzione della tipologia di modello che viene scelta (*ray tracing*, *normal modes*, *parabolic equation*).

Da un punto di vista pratico consiste di un semplice file di testo organizzato in parti che seguono una sequenza ordinata e precisa, dove i vari mezzi del problema vengono descritti acusticamente.

Nel primo blocco vengono inserite le informazioni generali dell'env file, ovvero titolo e frequenza di simulazione. La frequenza (espressa in Hz) non è un parametro importante per la base della teoria del *ray-tracing*, dato che i raggi sono indipendenti dalla frequenza. Essa assume un impatto importante sul dimensionamento degli step dei raggi, in quanto il Bellhop assume che le alte frequenze debbano essere trattate con delle traiettorie più accurate di quelle alle basse frequenze.

Nella riga successiva si passa a descrivere in quanti mezzi viene suddiviso il problema. Per mezzo si intende la porzione della colonna d'acqua (e/o sedimento) all'interno del quale le proprietà (densità, etc) risultano essere pressoché costanti. Il numero totale di mezzi da inserire nel file env deve essere conteggiato escludendo le due interfacce di confine. In Bellhop il numero di mezzi è limitato solo ad uno.

Nel blocco successivo vengono inserite le **opzioni dell'interfaccia superiore** (*top-option*):

- tecnica di interpolazione dei profili (*cubic spline*, *C-linear*, *N2-linear*, approssimazione quadratica).

Per una modellizzazione più accurata dei profili di velocità è stata implementata la dipendenza tra la distanza del profilo e la sorgente tramite un'interpolazione di tipo

quadratico (Q), che ha richiesto la creazione di uno specifico file esterno, con estensione \*.ssp, nel quale sono stati inseriti i profili presenti lungo la sezione sorgente-ricevitore. Questo file si compone di una serie di colonne (tante quante sono i profili presenti lungo la sezione), dove, per ogni colonna, sono riportati, rispettivamente, la distanza del SSP dalla sorgente e i valori della velocità del suono che compongono il profilo.

Gulf_ray_rd.ssp								
1	8							
2	0.0	12.5	25.0	37.5	50.0	75.0	100.0	125.0
3	1536	1536	1536	1536	1536	1536	1536	1536
4	1506	1508.75	1511.5	1514.25	1517	1520	1524	1528
5	1503	1503	1503	1502.75	1502.5	1502	1502	1502
6	1508	1507	1506	1505	1504	1503	1501.5	1500

- l'unità di misura con cui esprimere i coefficienti di attenuazione: (dB/m)kHz, *loss parameter*, dB/m, Nepers/m, fattore Q, dB/lunghezza d'onda.
- tipo di interfaccia superiore: vuoto sopra la superficie, mezzo perfettamente rigido sopra la superficie, spazio acustico (*acoustic half-space*), lista di coefficienti di riflessione calcolati dal modulo BOUNCE.  
Per il caso in esame la scelta migliore è quella dello spazio acustico caratterizzato dalle seguenti proprietà: profondità (z), velocità onde compressionali (cp), velocità onde di taglio (cs), densità (d), attenuazione onde compressionali (as), attenuazione onde di taglio (ap).  
Da un punto di vista pratico il Bellhop non implementa le onde di taglio.
- L'assorbimento da parte dell'acqua tramite la formula di Thorpe.

Viene poi inserito il profilo di velocità (a distanza zero dalla sorgente), ovvero una sequenza di coppie di valori, profondità (m) e velocità del suono (m/s), che rappresentano l'andamento della velocità del suono in funzione della profondità della colonna d'acqua, per l'intera area di simulazione.

Successivamente si passa a modellare il fondale tramite le **opzioni del fondale** (*bottom-option*), in maniera analoga alla superficie, ovvero come un mezzo elastico con le corrispondenti proprietà geoacustiche (densità, velocità del suono ed attenuazione).

Nel bellhop esiste la possibilità di descrivere il fondale marino, tramite l'inserimento di un file, con estensione \*.bty, che rappresenta la batimetria della sezione lungo la quale viene condotta la simulazione. Il file bpy è un file di testo costituito da una sequenza di coppie di numeri, dove il primo numero rappresenta la distanza dalla sorgente (km) mentre il secondo la profondità della colonna d'acqua (m).

Il file enviromental viene infine terminato inserendo le ultime informazioni:

- Geometria del sistema sorgente-ricevitori: numero e profondità della sorgente/i e del ricevitore/i, il numero di range. Si può creare un array di ricevitori regolarmente equidistanziati inserendo semplicemente le profondità del primo e dell'ultimo ricevitore. Il programma creerà poi successivamente, per interpolazione, un set completo di ricevitori dividendo la distanza tra il primo e dell'ultimo ricevitore per il numero totale di ricevitori presenti.
- Output: ampiezza e tempi di viaggio, coordinate degli *eigenrays* e dei raggi, TL coerente, incoerente e semicoerente,
- Ray-tracing:
  - numero di raggi,
  - approssimazione utilizzata per calcolare la pressione acustica (raggi geometrici, raggi

- Cartesiani, *ray-centered beams* e fasci di raggi Gaussiani).
- ampiezza del fan angolare
- step per il *ray-tracing*: viene calcolato in termini di lunghezza d'onda. La lunghezza d'onda viene calcolata prendendo come velocità di riferimento il valore minimo del SSP. Bellhop integra l'equazione dei raggi e quella del trasporto con un processo poligonale a due passi (two-steps polygon method): per una data opzione richiesta dall'utente calcola le coordinate del raggio per ognuno degli angoli di lancio, e calcola progressivamente il tempo di trasmissione del suono, la pressione acustica e il TL su una griglia specificata dall'utente (definendo le profondità dei ricevitori, oltre a quella della sorgente).
- dimensioni dell'area (RBOX e ZBOX) di esercizio dei raggi. Le dimensioni del BOX devono essere leggermente maggiori (1%) a quelle della massima profondità del fondale e del massimo range dei ricevitori.

```

MunkB_ray.env
'Munk profile'      ! TITLE
50.0                ! FREQ (Hz)
1                  ! NMEDIA
'SVF'              ! SSPOPT (Analytic or C-linear interpolation)
51 0.0 5000.0      ! DEPTH of bottom (m)
    0.0 1548.52 /
    200.0 1530.29 /
    250.0 1526.69 /
    400.0 1517.78 /
    600.0 1509.49 /
    800.0 1504.30 /
    1000.0 1501.38 /
    5000.0 1551.91 /
'A' 0.0
5000.0 1600.00 0.0 1.0 /
1                  ! NSD
1000.0 /          ! SD(1:NSD) (m)
51               ! NRD
0.0 5000.0 /     ! RD(1:NRD) (m)
1001            ! NR
0.0 100.0 /      ! R(1:NR) (km)
'R'             ! 'R/C/I/S'
41             ! NBeams
-20.0 20.0 /     ! ALPHA1,2 (degrees)
0.0 5500.0 101.0 ! STEP (m), ZBOX (m), RBOX (km)

```

**Fig. 20** - Esempio di un environmental file.

## 4 - Determinazione dei parametri di input

Il Bellhop permette di modellare ambienti marini più o meno complessi, in base al dettaglio con cui vengono inseriti i dati di input.

Come visto in precedenza, nella descrizione dell'env file, i parametri che possono essere settati al fine di aumentare la precisione del modello sono:

- batimetria,
- gestione dei profili dei velocità con dipendenza dalla sorgente (*SSP range-dependent*),
- proprietà acustiche del fondale.



#### 4.1 - Batimetria

Per il database batimetrico è stata utilizzata l'informazione contenuta nell'ETOPO1 (<http://www.ngdc.noaa.gov/mgg/global/global.html>), un modello in rilievo dell'intera superficie terrestre, dal quale è stata opportunamente estratta la porzione di interesse, così da ottenere una griglia rettangolare (1 arc-minute) dei punti batimetrici.

#### 4.2 - Profili di Velocità del Suono (SSP)

La parte di selezione e trattamento dei dati sui profili di velocità è sicuramente la più sensibile ai fini della precisione con il quale il modello può trattare la propagazione del suono all'interno degli ambienti marini.

Come visto in precedenza differenti profili sono in grado di focalizzare più o meno efficientemente l'energia sonora, oppure di inabissarla subito in profondità creando di fatto delle zone d'ombra in cui i livelli sonori risultano molto bassi.

##### 4.2.1 - Origine dei dati

Analogamente alla batimetria per creare e popolare il database dei profili si è utilizzato il World Ocean Database (<http://www.nodc.noaa.gov/OC5/SELECT/dbsearch/dbsearch.html>): un servizio, fornito dal NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration).

Tramite un motore di ricerca si estraggono dai database del NOAA i dati di Temperatura, Profondità e Salinità (CTD) rilevati, all'interno dell'area di interesse, durante campagne di misure che coprono un periodo quasi trentennale.

I dati ottenuti dal sito del NOAA sono stati estratti e successivamente importati in un database, dove per ciascun punto di rilevazione di un profilo è associata una scansione della colonna d'acqua con la sonda multiparametrica per la misura dei parametri oceanografici di interesse.

L'area di interesse viene in questo modo rappresentata con una buona copertura sia da un punto di vista spaziale che temporale.

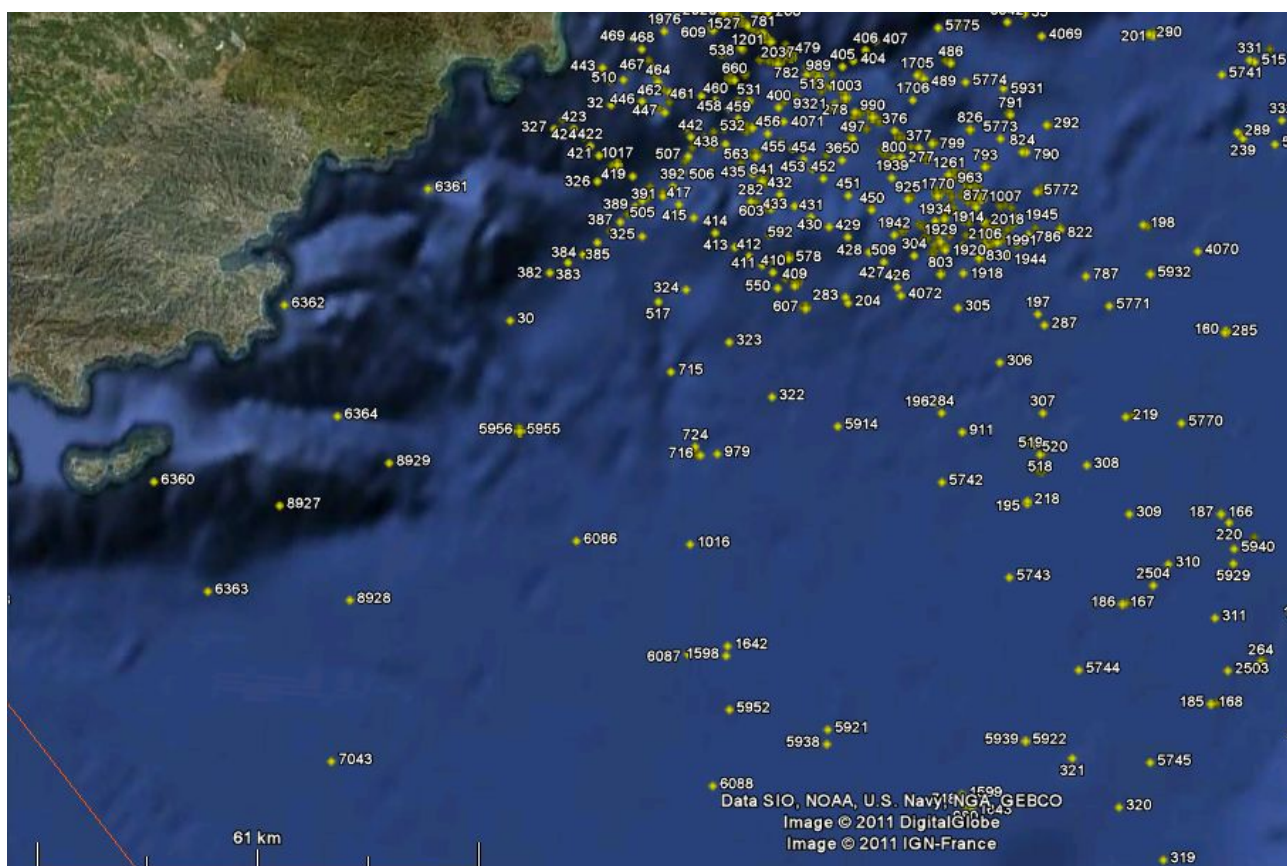
Dai dati parametrici ottenuti dalla sonda si estraggono quelli acusticamente sensibili, ovvero

temperatura, salinità e pressione (stima diretta della profondità).

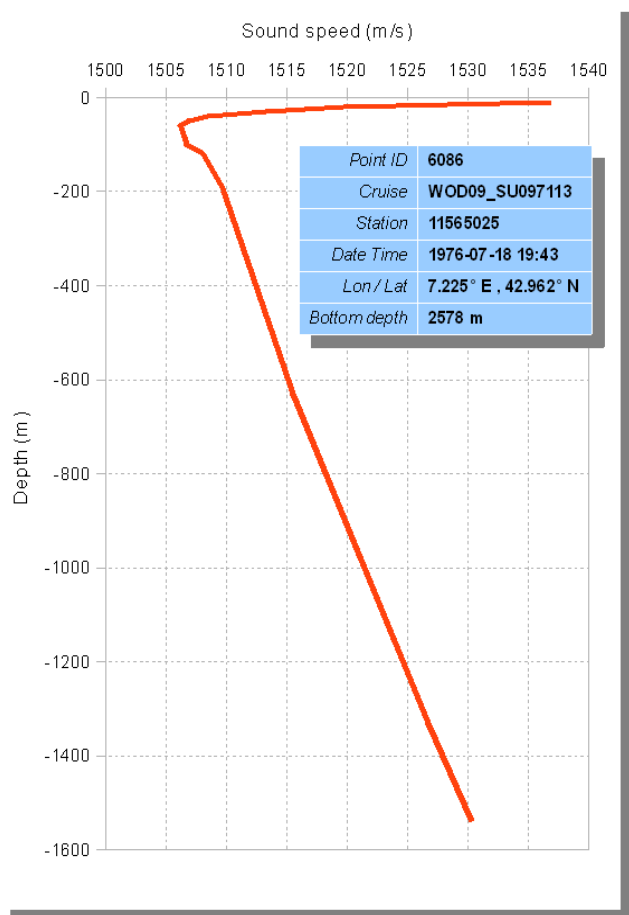
Prima di utilizzare questi dati per il calcolo della velocità del suono, si deve necessariamente prenderli in esame al fine di determinarne l'affidabilità e la relativa precisione.

L'area iniziale è stata successivamente aumentata per tenere conto dell'influenza dei profili sui suoni provenienti dal di fuori dei confini del santuario, che, a causa delle grandi distanze di propagazione, contribuivano ad innalzarne i livelli sonori. I vari punti del database dei profili sono riportati assieme al loro corrispondente codice identificativo (id).





**Fig. 22** - Dettaglio dell'area totale e particolare di un profilo sonoro.



Per ciascun profilo sono riportate le seguenti informazioni:

- identificativo (id) del profilo,
- codice della crociera di rilevazione,
- numero della stazione,
- data di misura,
- coordinate del punto di misura,
- profondità del fondale nel punto di misura.

#### 4.2.2 - Pulizia dei dati

I dati oceanografici raccolti tramite il World Ocean Database possiedono un attributo (Quality Code) che identifica la qualità del dato (con un numero progressivo compreso tra 0 e 9), secondo una serie di test che sono stati condotti prima della loro pubblicazione sul web.

A ciascun dato di temperatura, profondità e salinità è associato quindi un marcatore di qualità; mentre ai dati di velocità è associato un Quality Flag, poiché i dati di profilo non vengono calcolati direttamente, ma dedotti, tramite formule opportune, dai valori CTD.

L'applicazione del *flag* di per sé non pregiudica l'utilizzo dei dati, e inoltre, da una prima analisi, è stato osservato come alcuni errori non erano stati marcati dal corrispondente *flag*.

In base a questa analisi i dati raccolti sono stati ulteriormente controllati per eliminare valori mancanti e *outliers* (fuori dal range previsto per quel parametro).

I *Quality Codes* sono stati impiegati per verificare l'attendibilità dei dati all'interno di situazioni specifiche:

1. temperatura maggiore di 17 °C nei mesi invernali (Gennaio, Febbraio e Marzo),
2. temperatura inferiore ai 15 °C nei primi 20 metri di profondità durante i mesi estivi (Giugno, Luglio ed Agosto),
3. valori al di fuori dei range di accettabilità per temperatura, profondità e salinità,
4. *failed inversion* check per la temperatura,
5. profili coerenti alle alte profondità ( $d > 2500$  m),
6. dati mancanti per temperatura e salinità.

**Tabella 7** - World Ocean Database Quality Code.

World Ocean Database 2009 Quality Codes		Corresp. ODV Quality Flag	
	Individual observed level parameters		
0	Accepted value	0	Good
1	Range outlier (outside of broad range check)	4	Questionable
2	Failed inversion check	4	Questionable
3	Failed gradient check	4	Questionable
4	Observed level "bull's-eye" flag and zero gradient check	4	Questionable
5	Combined gradient and inversion checks	4	Questionable
6	Failed range and inversion checks	8	Bad
7	Failed range and gradient checks	8	Bad
8	Failed range and questionable data checks	8	Bad
9	Failed range and combined gradient and inversion checks	8	Bad

I dati che riscontravano delle discrepanze (ad esempio una temperatura superficiale di 5 °C a Luglio, etc.) sono stati scartati, in quanto non ritenuti attendibili.

Al termine della fase di pulizia sono stati esclusi circa 2500 dati, su un totale di 1.500.000.

#### 4.2.4 - Estensioni dei profili

L'analisi preliminare condotta con l'AcTUP ha evidenziato la necessità di avere a disposizione dei profili sonori completi, ovvero, dei profili di velocità che si estendano completamente tra le due superfici di confine.

I profili devono partire con un primo punto posto a profondità zero, ed un ultimo punto corrispondente alla massima profondità presente (i.e. valore di profondità che compare nel blocco iniziale del environmental file).

Profili incompleti, dove l'ultimo punto del profilo si trova ad una profondità inferiore rispetto al punto batimetrico più profondo, generano un errore che blocca la simulazione del modello lungo quella determinata sezione.

Per determinare i valori di velocità superficiali, in una porzione della colonna d'acqua soggetta a variazioni stagionali della temperatura piuttosto sensibili, si può impostare un approccio che suddivida il problema, essenzialmente, in due sezioni:

- profondità tra 0 e 5 metri,
- profondità superiori ai 5 metri.

Nel caso in cui il primo punto del profilo si trovi ad una profondità compresa tra 0 e 5 metri, assumendo che gli effetti legati ad una variazione di temperatura siano trascurabili, il valore di velocità a zero profondità viene estrapolato assumendolo uguale a quello del primo punto del profilo.

Se ci troviamo nel secondo caso, ovvero il primo punto di profilo è a una profondità maggiore di 5 metri, le variazioni della temperatura non possono essere più considerate trascurabili ed il valore di velocità a zero profondità deve essere estratto tramite dalle analisi statistiche, che tengano in debito conto della stagionalità dei parametri oceanografici.

Una volta selezionato il set di profili sui cui condurre l'analisi statistica, a partire dal giorno dell'anno (*doy* – *day of the year*), viene eseguita una media di tutti i valori di velocità compresi all'interno di uno strato superficiale molto sottile, tipicamente tra 0 e 1 metro.

In questo modo per ciascun periodo dell'anno, avremo un valore significativo di velocità sonora superficiale, che verrà inserita nei profili incompleti come valore del profilo a zero.

Con quest'approccio per tutti i profili del database, in rapporto al periodo dell'anno, viene introdotto il corrispondente valore di velocità sonora superficiale.

**Tabella 8** - Valori di velocità sonora superficiale in funzione del periodo dell'anno (doy).

doy	speed [m/s]	doy	speed [m/s]
59	1505.1	286	1524.7
133	1517.0	317	1518.6
164	1527.8	347	1509.3

Ora i vari profili sonori devono essere completati con il punto inferiore, ovvero estendendo tutti i profili del database ad una profondità almeno uguale alla massima profondità di simulazione.

In prima istanza è stato calcolato il massimo valore di velocità del suono alla massima profondità possibile, ovvero ad una profondità di circa 3100 metri.

Applicando la formula già esposta in precedenza si ottiene un valore di velocità massima di 1556 m/s, che corrisponderebbe al massimo valore di velocità che si avrebbe sul fondo di una colonna d'acqua alta 3100 metri.

Questi valori sono stati scelti con un approccio precauzionale: il valore di profondità è leggermente maggiore alla massima profondità reale del Santuario, mentre i dati oceanografici sono dei valori medi per le acque profonde nel bacino del Mediterraneo.

Il valore di velocità terminale di un qualsiasi profilo viene estratto tramite un'interpolazione lineare (fino a quando non intercetta la linea del fondale) tra l'ultimo punto del profilo ed il punto di massima velocità.



#### 4.2.5 - Profili sonori e *ray paths*

Da come visto in precedenza la propagazione del rumore in ambiente marino dipende fortemente dal profilo di velocità posseduto dal suono al variare della profondità e del range.

Come conferma delle analisi condotte (letteratura) su questo tema è stata realizzata un'indagine preliminare, all'interno dell'area di studio, per evidenziare la dipendenza tra profilo e percorso acustico dei raggi.

Questa analisi oltre a simulare un caso reale, con profili di velocità e rilievi batimetrici estratti dall'area del Santuario, aveva anche una seconda finalità, ovvero andare ad evidenziare criticità dei dati di input in seguito alle varie operazioni di verifica e filtraggio.

L'analisi è stata condotta gestendo il Bellhop tramite un'interfaccia grafica la AcTUP (V2.2L), sviluppata dalla Curtin University (<http://cmst.curtin.edu.au/products/actoolbox.cfm>), che permette di settare i vari parametri di input.

Per isolare l'effetto del profilo selezionato sul percorso dei raggi, escludendo quasi completamente l'influenza delle interazioni raggi-fondale, è stato simulato un ambiente profondo, ovvero con un fondale batimetricamente piatto alla profondità di 2000 metri.

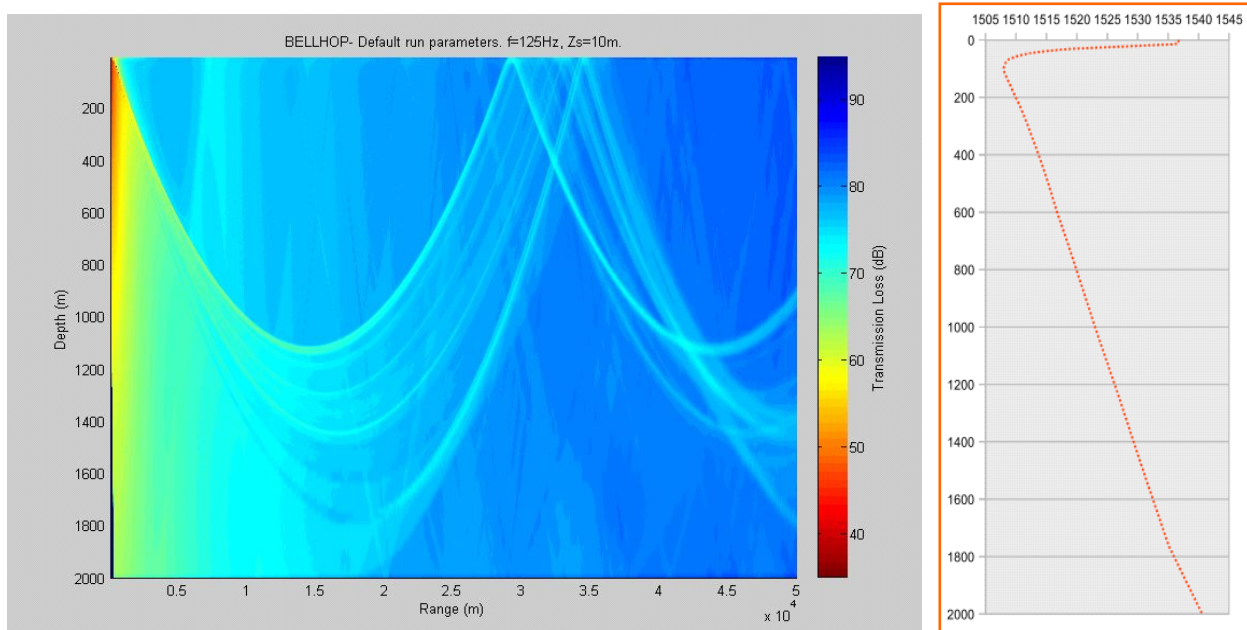
Per quanto riguarda le proprietà acustiche dei sedimenti, sono stati scelti i valori di default con una velocità di circa 1750 m/s ed una attenuazione nulla.

Per i profili ci si è dovuti inizialmente confrontare con una limitazione di questo sistema, ovvero l'impossibilità di gestire ambienti range-dependent, con la restrizione, quindi, di poter valutare l'effetto di un singolo profilo alla volta.

I dati sui profili, contenuti nel corrispondente database, sono stati per prima estratti secondo un criterio temporale di tipo mensile, e successivamente mediati al fine di restituire per ciascun mese il profilo medio che lo caratterizzasse.

Per ogni mese è stata eseguita una simulazione piuttosto accurata (alto numero di raggi, etc.) ed i risultati ottenuti sono stati visualizzati con il *plotting tools*: il trend del TL viene rappresentato contemporaneamente in funzione della distanza sorgente-ricevitore e della profondità della colonna d'acqua (TL vs depth and range).

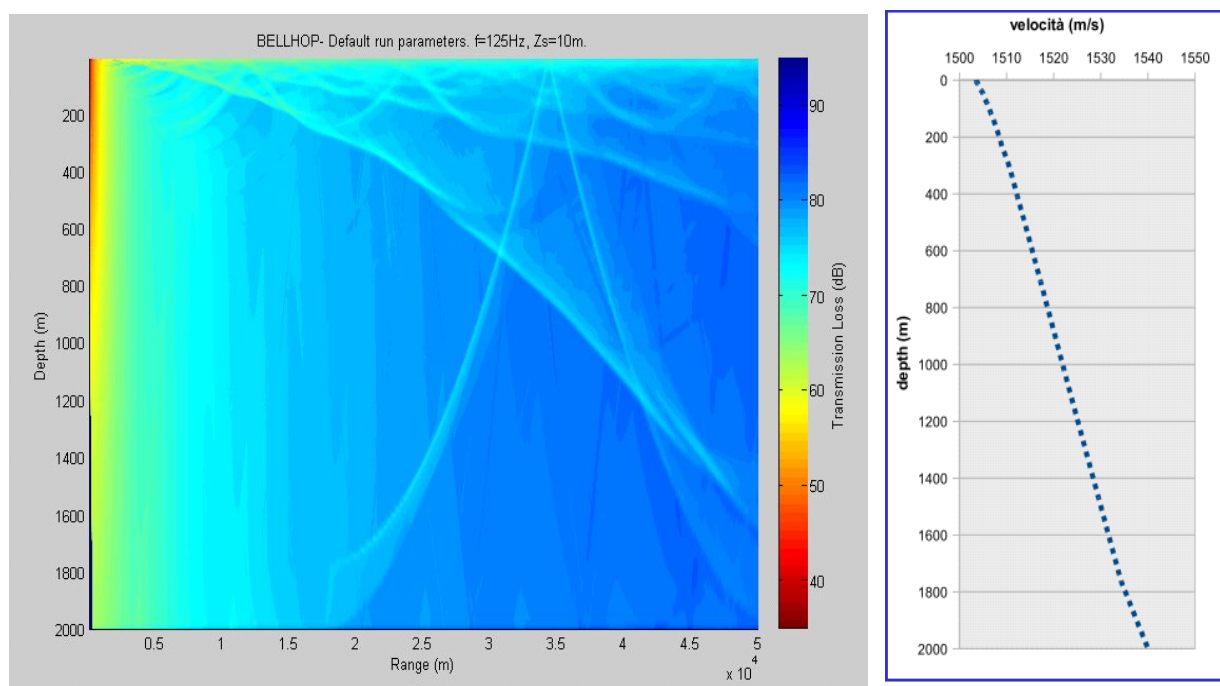
Per sintetizzare questa prima analisi sono state scelte due situazioni differenti: la prima in cui ci si trova in presenza di un profilo sonoro estivo ed una seconda con un profilo tipicamente invernale.



**Fig. 23** - Transmission Loss in funzione del range e della profondità per lo scenario estivo.  
Di lato il profilo sonoro associato.

Il profilo di velocità, in questo primo esempio, mostra un gradiente inizialmente negativo che contribuisce ad inabissare il suono verso gli strati profondi. Successivamente, quando il profilo cambia il suo gradiente i raggi vengono "richiamati" verso lo strato superficiale dal quale vengono riflessi. In questo modo le onde sonore, che descrivono ampi archi con concavità verso l'alto, formano zone d'ombra alternate ad aree di convergenza, all'interno di una porzione superficiale della colonna d'acqua che si estende, all'incirca, intorno ai 1000 metri.

Nel secondo caso, corrispondente al periodo invernale, il profilo ha un gradiente positivo dato che il contributo della pressione è predominante rispetto a quello della temperatura: questo fa sì che le onde restino confinate in uno strato superficiale della colonna d'acqua.



**Fig. 24** - Transmission Loss in funzione del range e della profondità per lo scenario estivo.  
Di lato il profilo sonoro associato.

Questa indagine preliminare ha confermato la bontà della parte che attiene alla fase preliminare di verifica e validazione dei dati di input da fornire al modello.

La verifica condotta sui profili alza al contempo un'importante problematica legata al fatto che difficilmente si avranno a disposizione profili di velocità posti esattamente sul tragitto a cui si è interessati, appartenenti inoltre al giorno dell'anno in cui si vuole effettuare la simulazione.

Si pone dunque il problema di definire dei criteri oggettivi sia per la selezione dei profili di velocità che per definire la relativa tecnica di segmentazione degli stessi lungo l'intero range di simulazione. Questa parte verrà analizzata in dettaglio nella parte relativa al sistema di simulazione (5° Parte).

#### 4.3 - Fondale marino

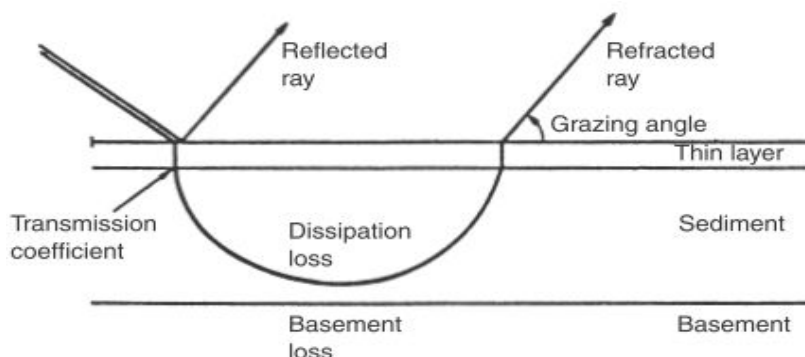
Il fondale marino si comporta come una superficie in grado di disperdere e riflettere le onde sonore che la vanno ad incidere tramite una serie di meccanismi strettamente correlati alla tipologia dei sedimenti che la compongono.

Da un punto di vista acustico il fondale può essere descritto come un mezzo disomogeneo: i parametri che maggiormente influiscono sulla propagazione delle onde sonore, ovvero densità e



velocità del suono, tendono ad avere una distribuzione verticale-orizzontale piuttosto incostante. Tra i principali processi che coinvolgono le interazioni tra onde sonore e fondale ci sono:

- riflessione e trasmissione di energia all'interfaccia sedimento-acqua;
- rifrazione dell'energia forzata da un gradiente sonoro positivo nei sedimenti;
- attenuazione (*dissipation loss*) all'interno dei sedimenti.



**Fig. 25** - Percorsi acustici nei fondali marini (Fonte: Etter 2003).

Da un punto di vista del modello teorico un ambiente così complesso può essere comunque descritto attraverso una serie di formule matematiche. Il grado di complessità del sistema che si andrà a descrivere se da una parte andrà a determinare un livello di precisione e accuratezza sempre più spinto, dall'altra richiederà dati in input e tempi di calcolo sempre maggiori.

Nella gestione delle interazioni acustiche con fondali dalla topografia e dalla composizione molto variabili spesso si necessita di considerare gli effetti, soprattutto alle basse frequenze, delle onde sia di tipo compressionale che di taglio.

Per una trattazione rigorosa i sedimenti saturi dei fondali vengono approssimati ad uno strato fluido nel quale la velocità del suono è leggermente maggiore di quella della colonna d'acqua sovrastante. In questo modo il contributo delle onde di taglio, nullo nel caso di un fluido ideale, può essere preso in considerazione, sia come valore della velocità che come coefficiente di attenuazione, analogamente alle onde di tipo compressionale.

Con il Bellhop è possibile andare a modellare i fondali come ambienti *range-independent*, con proprietà geoacustiche dipendenti dalla natura dei sedimenti presenti.

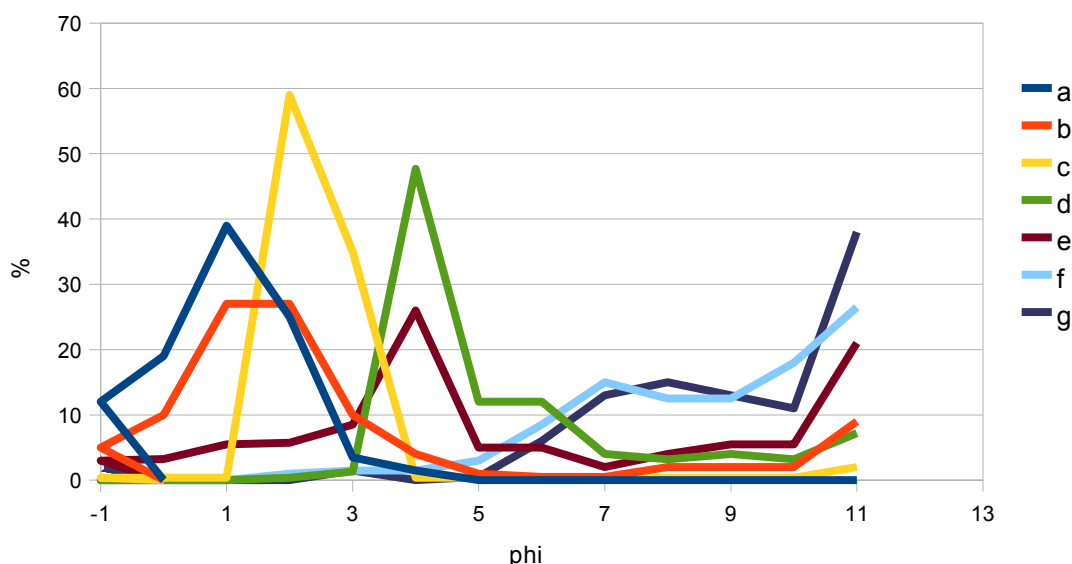
Ne segue l'impossibilità di lavorare con ambienti *range-dependent* diminuisce l'accuratezza del modello all'interno di ambienti di piattaforma, dove la vicinanza delle superfici provoca ripetute riflessioni delle onde sonore con il fondale.

I parametri acustici da fornire in ingresso al modello, presenti nella riga delle opzioni del fondale, sono:

- velocità del suono nel sedimento;
- densità;
- attenuazione delle onde.

Tra le varie fonti analizzate, è stata utilizzata una mappa sedimentologica dei mari Toscani (Ferretti et al. 1993) che suddivide l'area costiera della Toscana in sette differenti gruppi litologici (*facies* dalla **a** alla **g** - fig. 24), ognuno con una composizione percentuale granulometrica caratteristica.

In questa fase il lavoro è stato portato avanti al fine di correlare le varie *facies* con le corrispondenti proprietà acustiche richieste dal Bellhop. Da una successiva analisi bibliografica è stato individuato il parametro  $\phi$  ( $\Phi$ ) come legame tra proprietà granulometriche e caratteristiche acustiche di differente valore ( $\Phi = -\log_2 [D/D_0]$ , dove  $D$  è il diametro medio in mm delle particelle, e  $D_0$  il diametro di riferimento uguale a 1 mm).



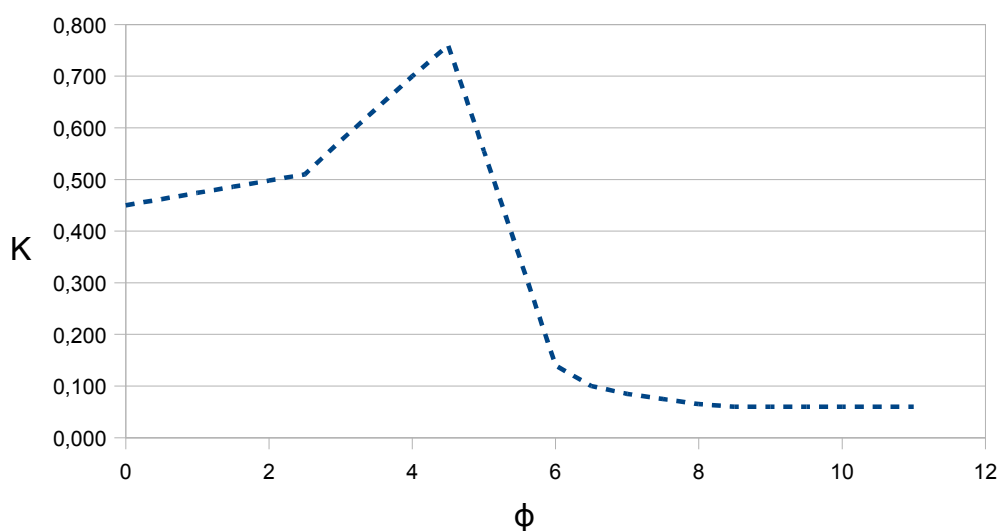
**Fig. 26** - Composizione granulometrica dei sedimenti marini Toscani (Fonte: Ferretti et al. 1993).  
I colori corrispondono alle varie *facies* litologiche (dalla a alla g) che caratterizzano le coste della Toscana.

Da ciascun grafico granulometrico è stato estrapolato, tramite una media pesata, il valore medio di phi, col quale sono stati poi calcolati i valori di velocità e densità (Hamilton & Bachman 1982).

$$\rho = 2.374 - 0.175 \Phi + 0.008 \Phi^2 \text{ (densità in g/cm}^3\text{)}$$

$$c = 1952.5 - 86.26 \Phi + 4.41 \Phi^2 \text{ (velocità in m/s)}$$

I valori di attenuazione delle onde sono stati invece estratti, partendo sempre dal valore medio di phi, dal grafico seguente.



**Fig. 27** - Relazione tra coefficiente di attenuazione K (dB/m/kHz) e phi (Fonte: Hamilton 1980).

Tramite queste operazioni è stato possibile assegnare a ciascuna classe sedimentologica i valori acustici richiesti dal modello come input.

La mappa dei sedimenti utilizzata non offriva una copertura molto vasta dell'area progettuale, motivo per cui è stata integrata con ulteriori informazioni reperite da carotaggi di piattaforma.

In questo modo l'informazione totale di cui si dispone permette di coprire, con un buon grado di affidabilità, la porzione di piattaforma che si estende all'incirca fino alla isobata dei 200 metri.

Come ultimo passo, per quanto attiene alla gestione del fondale, abbiamo proceduto nell'implementazione di un corrispondente database che correlasse le varie *facies* litologiche ed i punti di carotaggio (opportunamente georeferenziati) con le rispettive informazioni acustiche.

**Tabella 9** - Proprietà acustiche dei fondali.

Tipologia di Sedimento	$\phi$ medio	Velocità (m/s)	Densità (g/cm <sup>3</sup> )	Attenuazione (dB/m) a 1 kHz
(a) sabbia grossolana con sabbia	0,94	1875,1	2,22	0,47
(b) sabbia grossolana	2,87	1739,3	1,94	0,51
(c) sabbia media	2,65	1753,2	1,97	0,51
(d) sabbia medio-fine con silt	5,58	1600,0	1,65	0,32
(e) silt sabbioso	5,80	1591,5	1,63	0,23
(f) silt argilloso	8,68	1515,8	1,46	0,60
(g) argilla con silt	8,97	1511,9	1,45	0,60

Per la parte dell'area di indagine ad ovest dei quadrati arancio non è stato possibile raccogliere informazioni geoacustiche, date le grandi profondità che si raggiungono (oltre i 2000 metri), con i soli dati provenienti dalle campagne di carotaggio.



**Fig. 28** - Disponibilità dati acustici fondali marini. (Area bianca: mappa dei sedimenti, quadrati arancio: carotaggi sedimenti).

In questo caso sarebbero risultati molto più utili i dati ottenuti dalle analisi sismiche dei sedimenti, che risultano essere di difficile reperimento.

L'area, anche se scoperta, è da considerarsi non determinante nell'interazione onde-fondale, poiché proprio per le grandi profondità i raggi sonori difficilmente arrivano a compiere riflessioni multiple con i sedimenti marini.

## 5 - Procedure tecniche per l'implementazione del sistema di simulazione

In questa parte verrà descritto l'insieme dei criteri di cui tener conto, nella fase di gestione del modello, per simulare la rumorosità dell'area progettuale.

Il capitolo è stato organizzato tenendo conto degli aspetti che maggiormente influenzano la precisione del modello, andando dalla definizione dell'area di test fino ai parametri di input precedentemente analizzati.

### 5.1 - Definizione griglia sorgenti-ricevitori

Data la natura del Bellhop, che simula la propagazione delle onde sonore lungo sezioni bidimensionali tra sorgente e ricevitore, è necessario suddividere l'area del Santuario in una griglia di sezioni lungo le quali determinare gli schemi di propagazione delle onde sonore.

La griglia delle sezioni, lungo le quali lanciare il modello, viene implementata tramite la contemporanea sovrapposizione di una griglia dei ricevitori con una griglia dei punti sorgente.

Partendo da questo approccio il lavoro è proceduto nel dimensionamento delle due griglie:

- **griglia dei ricevitori:** griglia rettangolare con passo fisso;
- **griglia delle sorgenti:** una griglia radiale con passo crescente in progressione geometrica (intorno a ciascun punto ricevitore).



**Fig. 29** - Griglia radiale delle sorgenti lungo una sezione di simulazione tra sorgente (Source - SRC) e ricevitore (Receiver - RCV).

La griglia dei punti ricevitori rettangolare, comoda da utilizzare, si distribuisce uniformemente sul piano, permettendo di fatto di campionare l'intera area di indagine in maniera omogenea e completa. Il passo con cui viene dimensionata la griglia dei ricevitori può essere impostato in funzione del grado di precisione dei risultati ottenibili, ma anche del tempo a disposizione da destinare alla fase di computazione (dimezzando la dimensione massima delle celle, si disporrebbe di una griglia con un numero di punti ricevitori quattro volte maggiore).

Per quanto concerne la griglia delle sorgenti, una disposizione radiale dei vari punti permette di ottenere una differenza teorica della Transmission Loss tra un raggio e quello successivo pressoché costante.

Per descrivere acusticamente l'area progettuale si dovrebbe procedere all'implementazione di un sistema automatico che sovrapponga una griglia radiale delle sorgenti a ciascun punto ricevitore, in modo da determinare la propagazione lungo tutte le sezioni date dalle possibili combinazioni tra gli stessi.

Si disporrebbe così di una rappresentazione complessiva della propagazione sonora all'interno dell'ambiente marino indagato.

## 5.2 - Profili di velocità

La propagazione del rumore in ambiente marino dipende fortemente dal profilo di velocità posseduto dal suono al variare della profondità e del range. Una modellizzazione volta a descrivere i livelli di TL presenti col minimo grado di incertezza, dovrebbe avere come punto di partenza la completa conoscenza dei profili di velocità nel tratto di mare considerato.

Nel caso reale, tuttavia, difficilmente si avranno a disposizione tutte le informazioni teoricamente necessarie, e si dovranno quindi utilizzare, nel miglior modo possibile, i campionamenti dei profili di velocità disponibili nel database apposito.

Va inoltre fatta la seguente considerazione: il calcolo delle TL è mirato a descrivere una situazione media plausibilmente presente per un dato periodo dell'anno, in una determinata area geografica. Anche nel caso *ottimo* in cui si disponesse di un numero completo di profili nel tratto di mare considerato, si avrebbe comunque una forte componente di incertezza legata alle particolari condizioni ambientali presenti al momento del campionamento. Si avrebbe così una ottima descrizione dell'attenuazione sonora per un singolo giorno di un particolare anno, ma difficilmente questo risultato sarebbe un buon indicatore della TL presente mediamente nell'area nel *doy* di interesse.

Si capisce dunque come la scelta dei profili di velocità da utilizzare per la simulazione sia un argomento tanto delicato quanto di difficile soluzione.

La situazione tipo in cui ci si trova è quella di non avere profili posti esattamente sul tratto di mare interessato, nel giorno dell'anno scelto. Si devono dunque calcolare alcuni profili medi da poter utilizzare lungo il range (Bellhop è *range-dependent*) a partire da campioni che siano spazialmente e/o temporalmente differenti dalla situazione reale. Da un punto di vista statistico, si dovrà cercare di mediare il maggior numero possibile di profili, in modo da ridurre l'incertezza dovuta al campionamento.

Si pone però il problema di quanto un profilo possa essere ritenuto adatto alla situazione di interesse, e quindi utilizzabile.

Questo processo sarà affetto da una variabilità spaziale e da una temporale: la prima sarà connessa con le differenti condizioni geografiche presenti da sito a sito, la seconda con le differenti condizioni climatiche medie presenti durante l'anno.

Supponendo, ad esempio, di voler effettuare una modellizzazione tipica di un periodo invernale, e di avere lungo il range un profilo di velocità campionato il giorno 340 (inizio dicembre), è legittimo utilizzare questo profilo per la simulazione di interesse?

Per rispondere a questa domanda si dovrebbe essere in grado di stabilire quanto due profili siano *simili* tra loro.

### 5.2.1 - Impiego del modello propagativo come strumento di selezione dei profili

Da un punto di vista matematico, ciascun profilo di velocità può essere visto come un campionamento discreto di un funzionale continuo: in quanto tale, dovrebbe essere possibile

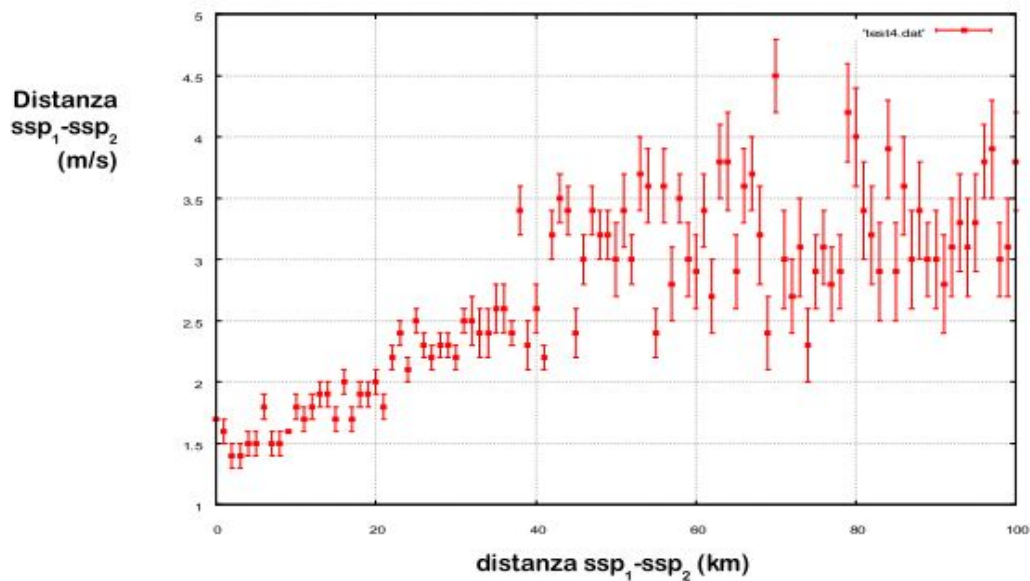
definire caratteristiche comuni tra funzionali diversi.

Fra tutti i possibili descrittori utilizzabili, tuttavia, devono essere scelti quelli che risultano essere maggiormente esaustivi della propagazione sonora in mare. Ad esempio, da un semplice confronto visuale tra una propagazione sonora invernale ed una estiva, emerge quanto sia importante la presenza di una inversione nel profilo di velocità ai fini del percorso compiuto dai raggi sonori. Questo tipo di analisi porta ad un descrittore che sia connesso con il concetto di derivata del profilo: profili monotoni, infatti, non presenteranno inversione nella velocità del suono e saranno tipici del periodo invernale. Viceversa nel caso di profili estivi.

Un approccio alternativo, invece, è quello di utilizzare una metrica che calcoli la differenza media tra i profili lungo l'intera colonna d'acqua. In questo modo si dà maggiore risalto alla differenza complessiva dei profili piuttosto che alle inversioni nella forma. Un descrittore che segue questa tipologia di analisi è riportato qui di seguito:

$$\frac{1}{N} \sqrt{\sum_i^N (ssp_{1i} - ssp_{2i})^2}$$

dove N è il numero di profondità discrete considerate ed  $ssp_{1i}$  e  $ssp_{2i}$  i due profili sonori a confronto. Maggiore è l'indicatore, maggiore sarà la differenza complessiva dei due profili di velocità confrontati. Ad esempio, per ogni coppia di profili presenti nel database, questo descrittore può essere messo in relazione con la distanza che intercorre tra i due profili. Nella figura sottostante è raffigurato il risultato di questa analisi.



**Fig. 30** - Distanza acustica (m/s) tra due profili ( $ssp_1$ ,  $ssp_2$ ) in funzione della loro relativa distanza geografica (km).

Si osserva come la differenza dei profili aumenti in modo diretto con il crescere della distanza, fino ad assumere un andamento caotico oltre i 50 Km.

Tuttavia, il difetto di queste metodologie emerge quando si cerchi di trovare una connessione con un parametro acustico direttamente misurabile. Non si è infatti interessati ad una similitudine basata sulla forma in quanto tale, ma, piuttosto, a stabilire se due profili appartenenti a situazioni temporali e spaziali diverse producano al ricevitore lo stesso scenario sonoro. In caso affermativo i due profili possono essere ritenuti *simili* ai fini dell'analisi acustica. Quantificare cosa comporti acusticamente una differenza media di qualche metro al secondo appare poco chiaro.

Alla luce di queste osservazioni, si è scelto di studiare le due variabilità principali (*temporali e spaziali*), utilizzando il modello propagativo stesso come strumento per mettere in relazione le



differenze morfologiche tra profili con un parametro prettamente acustico: la Transmission Loss. L'idea, comune in entrambi i casi, è quella di eseguire simulazioni per mezzo del modello Bellhop in ambienti artificiali, con range e profondità costanti, in cui la variabilità delle TL calcolate sia, il più possibile, associabile unicamente alla forma del profilo di velocità impiegato. Questo approccio si fonda sulla scelta di assumere come valori di riferimento quelli prodotti dal modello di calcolo, realizzando così un confronto in termini relativi tra i risultati ottenuti impiegando differenti valori di input per il modello.

### 5.2.2 - Variabilità temporale

Nello studio della variabilità temporale si vuole mettere in relazione la variazione di TL con una variazione del giorno di campionamento (DOY) del profilo di velocità del suono.

Un modo diretto per valutare questa dipendenza è quello di eseguire una simulazione *ray-tracing* utilizzando ogni profilo singolarmente. Si crea una vasca di simulazione artificiale (fondale piatto) e si osservano quali valori di TL sono prodotti al ricevitore. Profili acusticamente simili produrranno valori di attenuazione che si discosteranno leggermente gli uni dagli altri. Profili molto diversi produrranno scenari sonori completamente differenti. A ciascun singolo profilo, inoltre, sarà associata una chiave temporale, ossia il giorno dell'anno in cui è stato campionato.

In questa maniera ogni giorno dell'anno, di cui si abbia a disposizione almeno un profilo di velocità, sarà caratterizzato da un certo numero di TL a varie profondità.

Per evitare di trovarsi con giorni dell'anno che non sono rappresentati da nessun profilo, ma anche per aumentare la rappresentatività statistica, si è scelto di suddividere l'intero anno in classi di tre giorni. Nel seguito col termine DOY si intenderà dunque il giorno centrale della classe.

Il risultato dell'analisi porta ad una tabella come la seguente:

**Tabella 10** - Differenza massima in TL ( $\Delta TL_{MAX}$ ) e corrispondente errore (err  $\Delta TL_{MAX}$ ) in funzione della distanza tra due doy (Doy1-Doy2).

Doy 1	Doy 2	$\Delta TL_{MAX}$ [dB]	err $\Delta TL_{MAX}$ [dB]
8	8	3,76	0,28
8	11	3,44	0,14
8	14	3,32	0,09
...	...	...	...
11	8	3,44	0,27
11	11	2,31	0,13

Dove il primo valore (DOY 1) rappresenta il giorno di riferimento - ovvero quello per cui si vuole effettuare la simulazione - mentre DOY2 è il giorno del profilo da utilizzare. Il valore  $\Delta TL_{MAX}$  è il massimo errore atteso, valutato come il valore massimo della differenza tra il livello atteso dalla simulazione con i dati riferiti al DOY 1 e quelli della simulazione al DOY 2, ad ogni possibile profondità. L'ultima colonna rappresenta una stima della variabilità di tale stima.

Per ognuno dei 10.444 profili presenti nel database, si è ripetuta la procedura sopra descritta all'interno di ambienti a profondità costanti (200 e 2600 metri) e per vari range (5, 10, 50, 100, 200 km). Per ciascuna combinazione profondità-range si è valutata la TL presente al ricevitore a profondità predefinite: 10, 20, 50, 100, 190 metri nel caso di fondale basso; 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 2000 metri per il fondale profondo.

L'analisi fin qui fatta ha prodotto un totale di dieci tabelle, una per ciascuna combinazione

depth/range:

Depth	200 m	→	Range	5 Km	10 Km	50 Km	100 Km	200 Km
Depth	2600 m	→	Range	5 Km	10 Km	50 Km	100 Km	200 Km

Dall'analisi preliminare dei risultati ottenuti, si è ritenuto conveniente raggruppare i cinque range a disposizione in due macro-insiemi:

Corti range	5, 10, 50 Km
Lunghi range	100, 200 Km

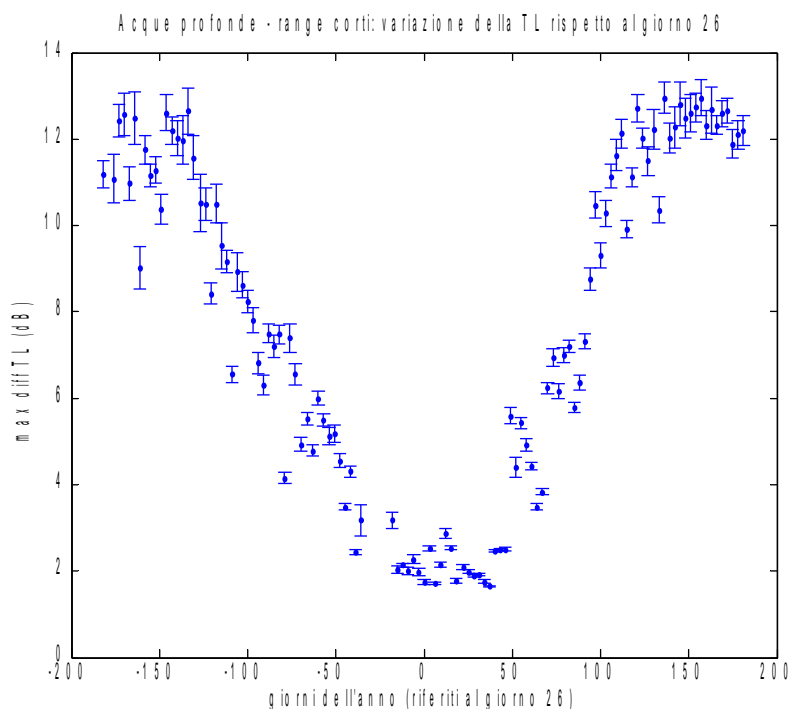
Il criterio che si è scelto per attribuire un unico valore di  $\Delta TL$  a ciascun macroinsieme è sempre quello cautelativo, privilegiando quindi il valore massimo tra quelli presenti. Ad esempio, nel caso di corti range, si è scelto il massimo valore presente nell'insieme  $\{ \Delta TL_{MAX-5Km}, \Delta TL_{MAX-10Km}, \Delta TL_{MAX-50Km} \}$ .

Il risultato finale di questa fase dell'analisi è rappresentato da quattro tabelle riassuntive di quattro scenari ambientali differenti:

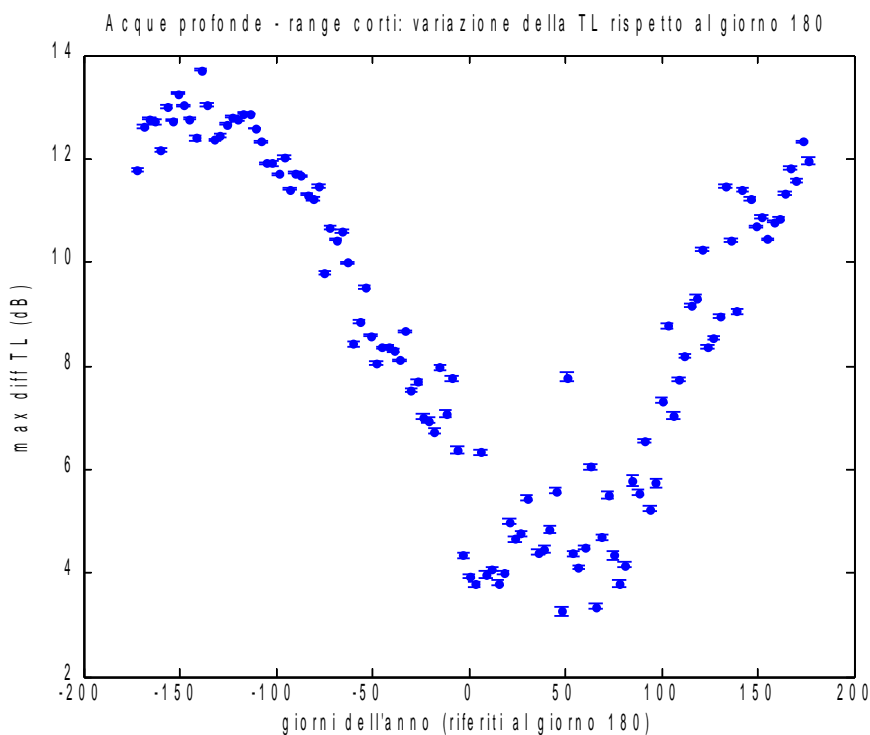
Scenari ambientali	
Corti range / fondale profondo	[5, 10, 50 Km] / [2600 m]
Lunghi range / fondale profondo	[100, 200 Km] / [2600 m]
Corti range / fondale basso	[5, 10, 50 Km] / [200 m]
Lunghi range / fondale basso	[100, 200 Km] / [200 m]

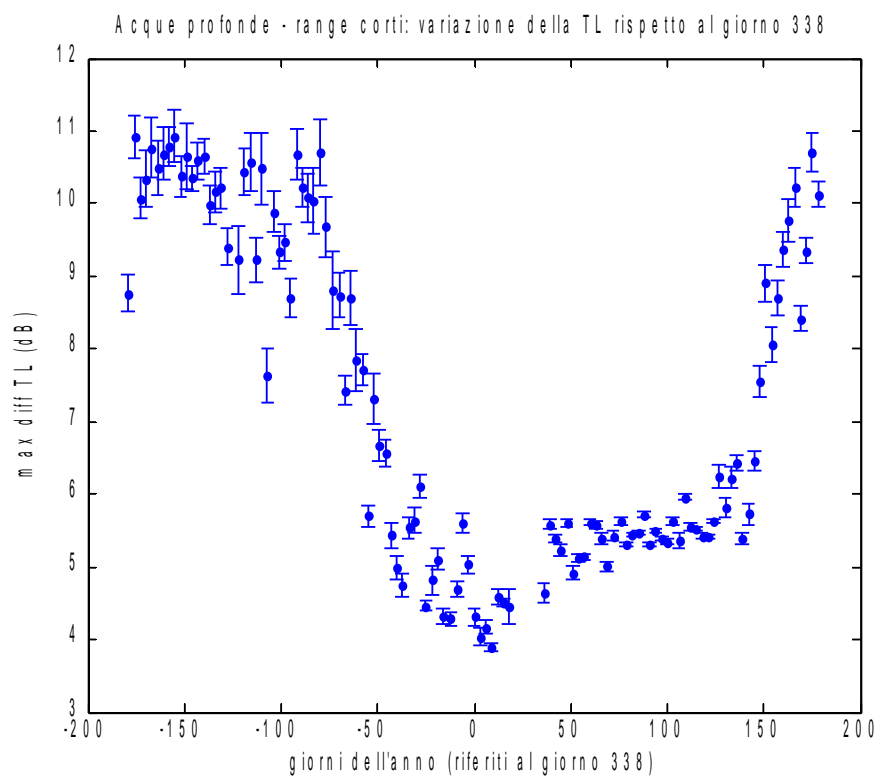
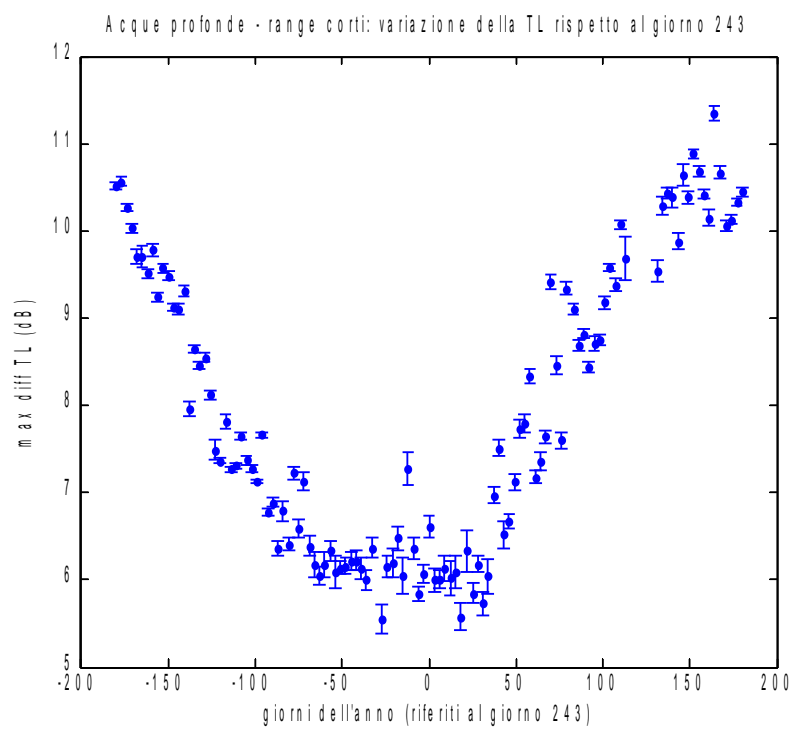
Così facendo, per ogni giorno dell'anno e per ognuno degli scenari ambientali ipotizzati, si ottengono dei grafici simili a quello presentato nella figura sottostante. Nel caso di lunghi range e fondale basso, tuttavia, l'assorbimento del fondale fa sì che in molti casi le TL al ricevitore siano oltre la soglia limite di interesse dei 150 dB. Si è scelto, quindi, di non considerare il quarto scenario ambientale (lunghi range / fondale basso).

L'esempio riportato nella figura che segue, descrive la situazione trovata per il giorno 26 nel caso di fondali profondi e range corti. Si è scelto di rinormalizzare la scala delle ascisse, mostrando la differenza in giorni rispetto al giorno 26. Si nota come attorno al day di interesse ci sia un arco di tempo in cui la massima differenza delle TL (asse delle ordinate) si mantiene minima. Questo genere di grafico fornisce una prima risposta al problema della scelta dei profili. Se, ad esempio, si utilizzasse un profilo di velocità appartenente al giorno 40 (ossia con valore 14 sull'asse delle ascisse), per una simulazione effettuata il giorno 26 nel caso di corti range e fondali profondi, si compierebbe, in media, un errore massimo assoluto di 2 dB. E' importante sottolineare che, comunque, la massima differenza delle TL non è mai inferiore ai 2 dB, anche confrontando profili provenienti da giorni temporalmente vicini, o, al limite, appartenenti alla stesso day.



Il periodo invernale rappresenta mediamente una situazione stabile, in cui i fenomeni caotici innescati dalle forzanti esterne (soprattutto la radiazione solare) sono minimi. In quanto tale, la soglia inferiore dei 2 dB, riscontrata nel grafico del doy 26, deve ritenersi un caso ottimale: la situazione negli altri periodi dell'anno, soprattutto durante il passaggio tra mesi freddi e caldi (e viceversa), è fortemente instabile ed aleatoria. In questi casi, l'errore massimo che si compie utilizzando profili di velocità temporalmente vicini al giorno di interesse può essere elevato come evidenziato da alcuni grafici di esempio che si riportano di seguito.

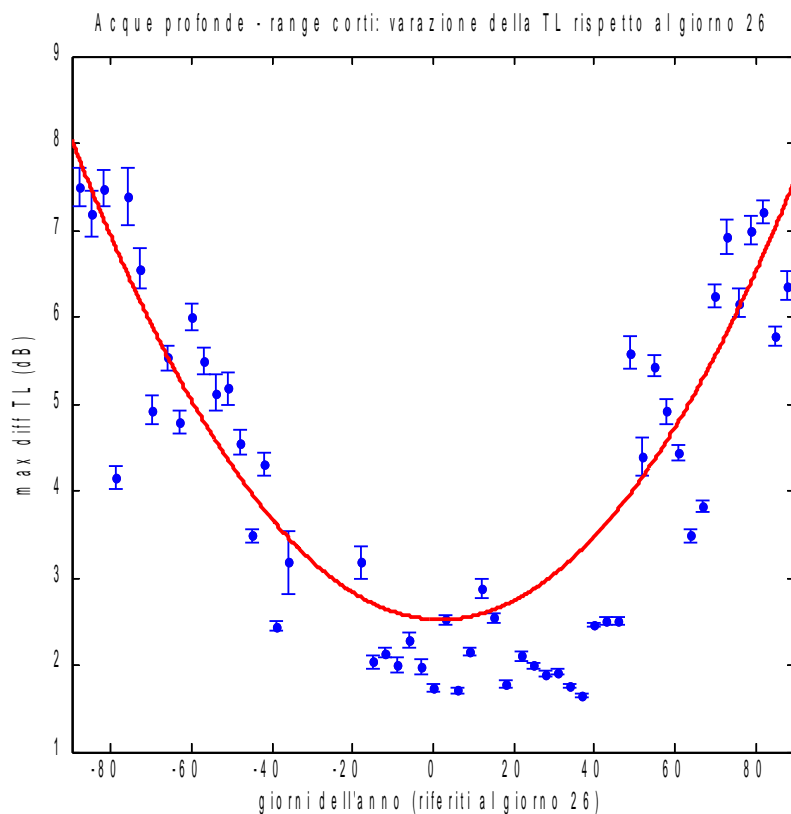




Questo genere di grafici fornisce una valutazione media dell'errore massimo che si commette utilizzando un profilo di velocità distante temporalmente dal giorno della simulazione. Tuttavia l'utilizzo concreto di queste informazioni, in questa forma, risulta piuttosto scomodo e laborioso.

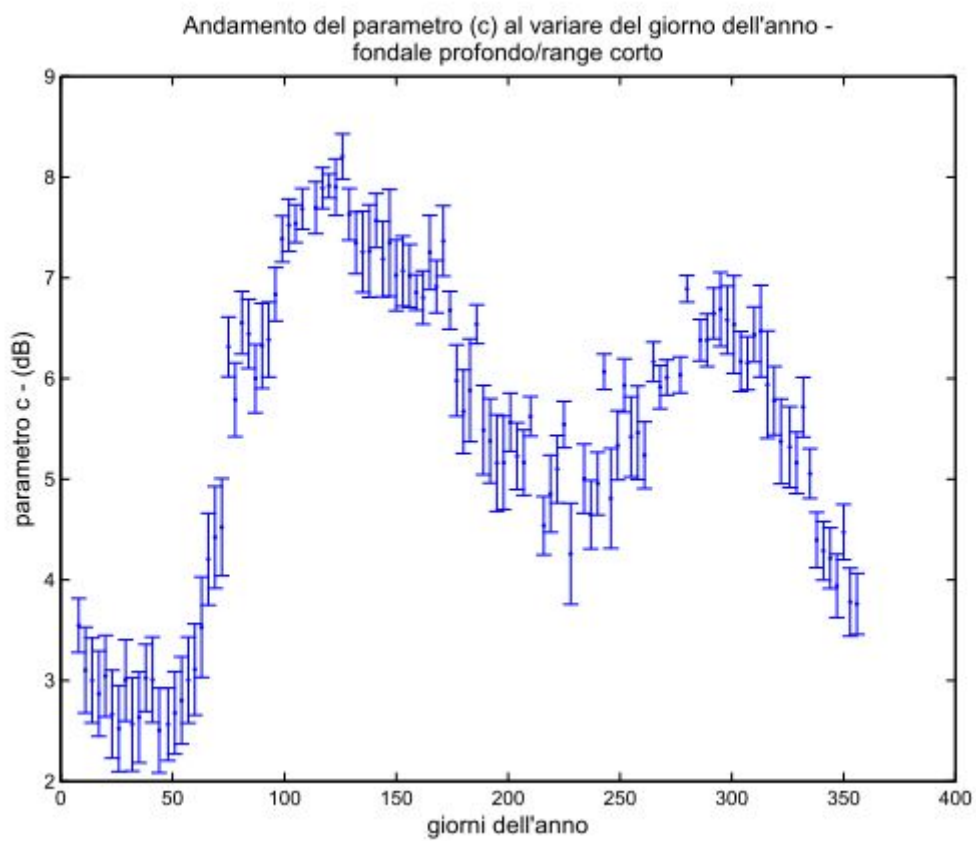
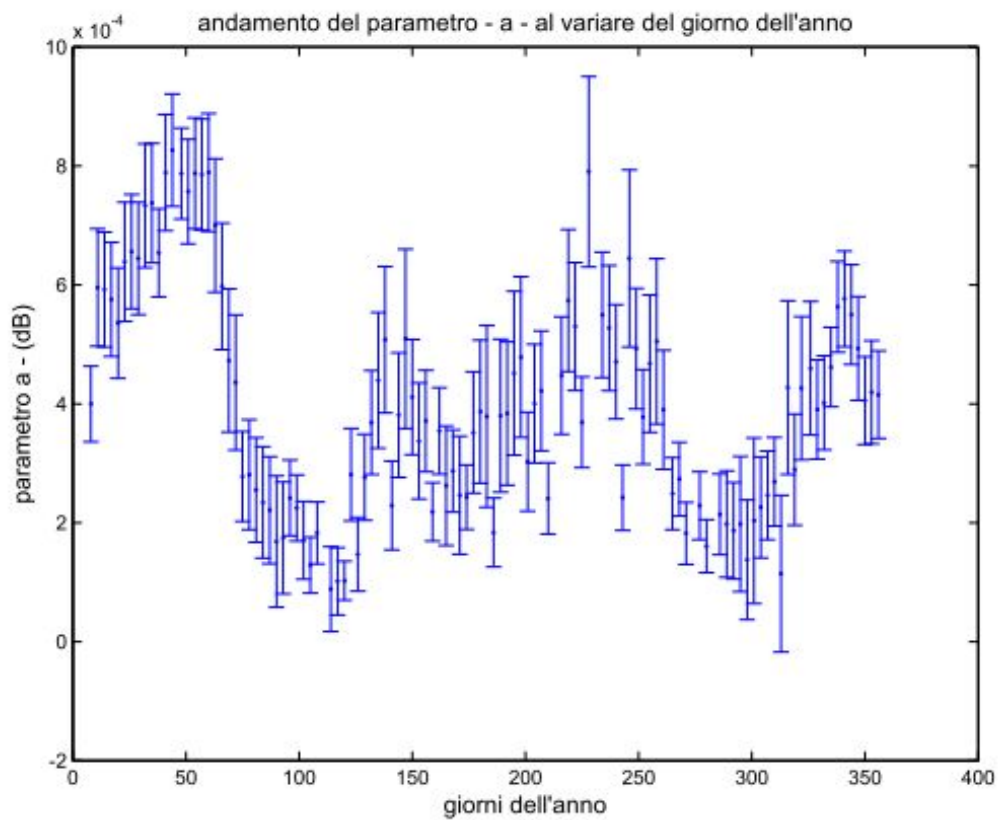
Va infatti ricordato che il sistema finale prevede migliaia di simulazioni: per ogni simulazione tra due punti, si deve poter sapere velocemente l'errore acustico massimo che si commette prendendo un determinato profilo. Inoltre si è interessati a valutare l'andamento generale dell'errore acustico massimo, e non il suo valore puntuale, afflitto da numerosi fattori di incertezza e di variabilità per lo più ignoti.

Alla luce di queste considerazioni si è scelto di approssimare i dati tramite opportuni funzionali matematici: l'idea di fondo è quella di eseguire dei fit per ogni doy in ogni situazione range/fondale, e di valutare se esistano delle funzioni che descrivano l'andamento dei singoli parametri dei fit al variare del giorno dell'anno considerato. Si considera un lasso temporale di  $\pm 90$  giorni attorno allo zero: questa scelta consente l'utilizzo di funzionali più semplici, mantenendo comunque un intervallo temporale ampio (6 mesi). L'andamento concavo dei dati, unita alla necessità di avere un numero limitato di parametri, ha suggerito di eseguire i fit con delle parabole:  $y = ax^2 + bx + c$ . A titolo di esempio si riporta di seguito il fit parabolico relativo al giorno 26, nello scenario ambientale corti range/fondali profondi.

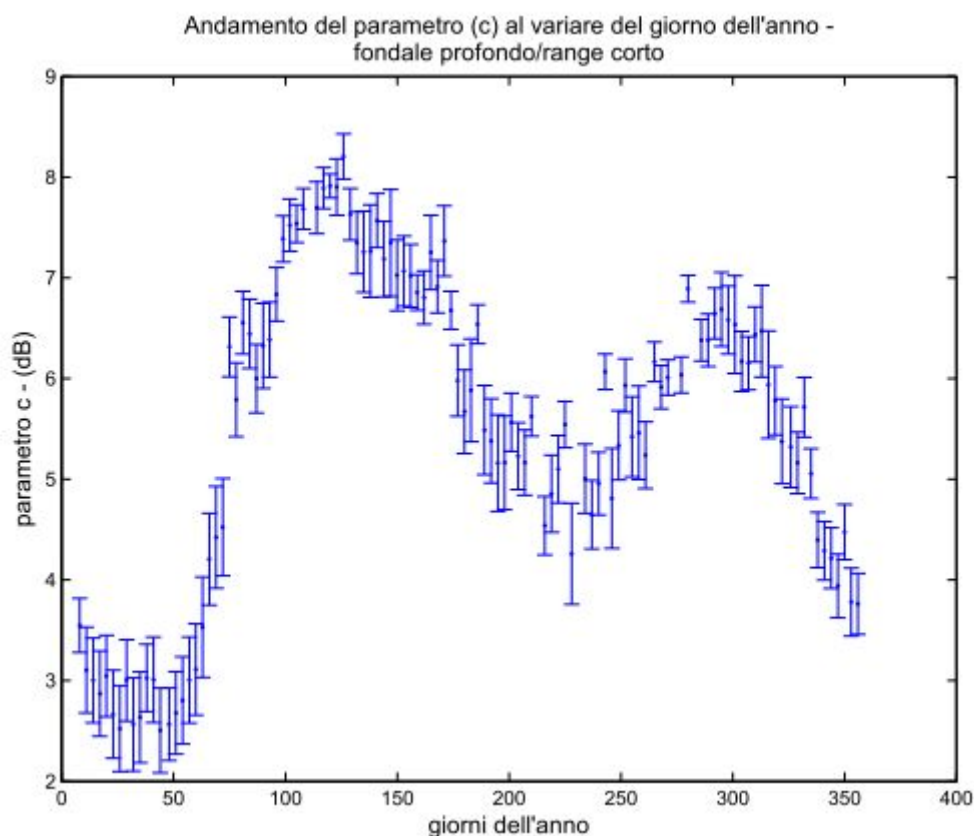


Per ognuno dei tre scenari ambientali ipotizzati si hanno all'incirca un centinaio di doy (113). Questo significa che, fissate le condizioni esterne (*range e fondale*), i fit forniscono in uscita un centinaio di valori per ognuno dei tre parametri  $a$ ,  $b$ ,  $c$ .

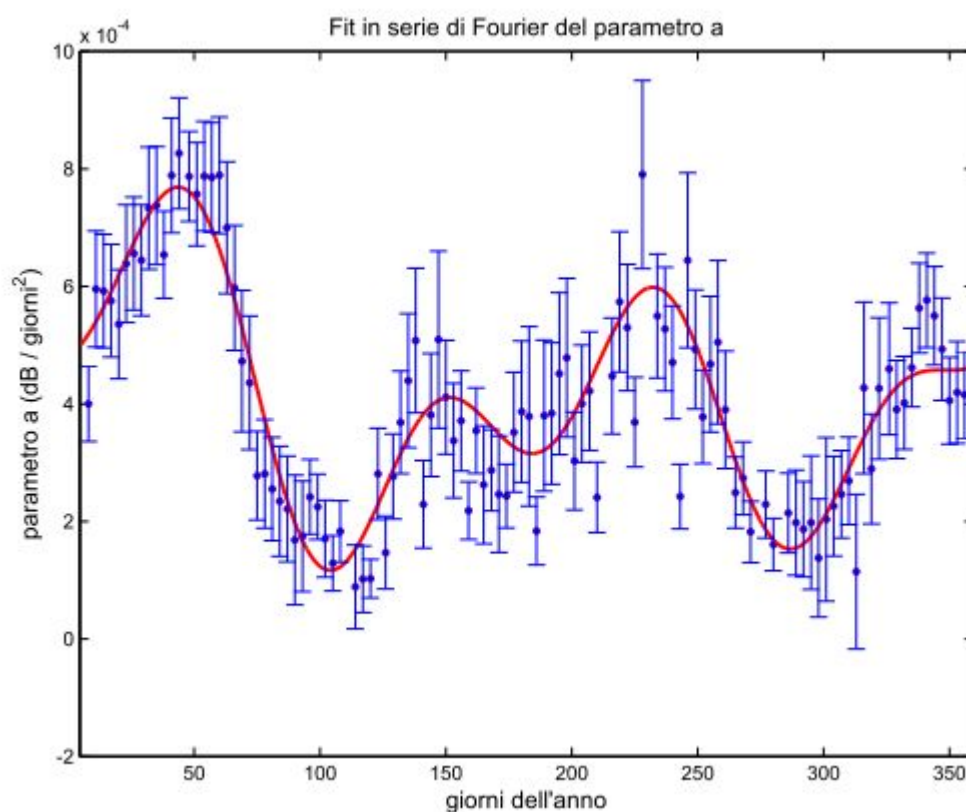
Ad esempio, nel caso di corti range e fondale profondo, i tre parametri hanno i seguenti andamenti:



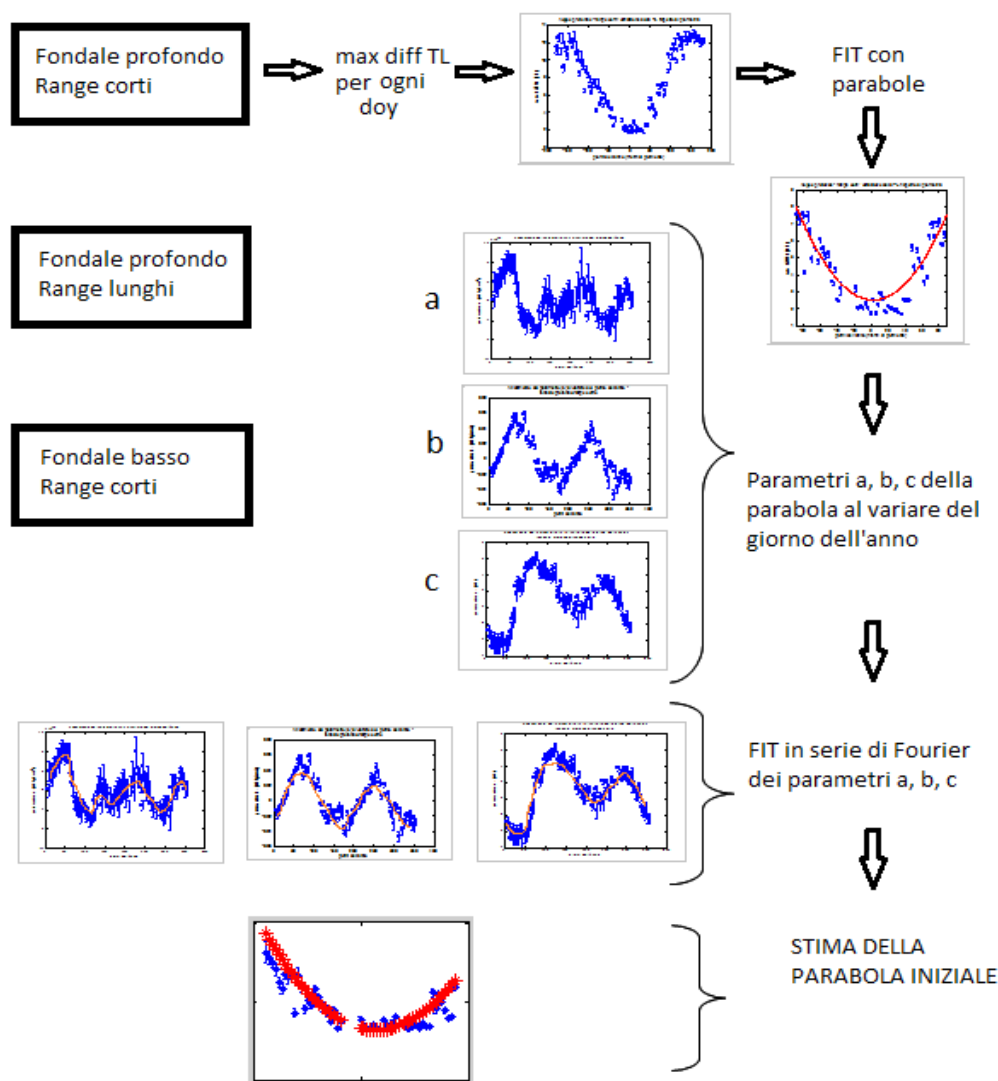




Gli andamenti dei parametri  $a$ ,  $b$ ,  $c$  sono stati espressi attraverso dei fit in serie di Fourier. Si riporta a titolo di esempio il fit eseguito sul parametro  $a$  nel caso di fondali profondi e corti range. I parametri dei funzionali sono riportati nell'Appendice A.



Al termine di questo processo, una volta fissato lo scenario ambientale, si è in grado di esprimere la parabola che descrive la curva della massima differenza di TL per il giorno di interesse.



Il doy, infatti, fissa univocamente la parabola che descrive l'andamento dell'indicatore *massima differenza di TL*.

La parabola che si ottiene, ovviamente, non è uguale a quella iniziale, ricavata con un fit diretto sui dati relativi al giorno in cui si effettua la simulazione. Generalmente si ha un problema per quanto riguarda il fondo (parametro c) in quanto la parabola stimata risulta generalmente spostata verso l'alto rispetto ai dati iniziali.

Di fatto questo aspetto non rappresenta un problema per lo scopo prefisso: trattandosi infatti di dover identificare i profili più adatti per il lavoro di simulazione, si è maggiormente interessati alla differenza tra il valore minimo della parabola e quello relativo al DOY della simulazione, annullando di fatto l'effetto di traslazione della curva.

Se, da un lato, lo schema implementato mostra un prevedibile peggioramento rispetto al fit diretto sui dati, dall'altro lato si ha una maggiore rapidità nell'attribuire un errore acustico a ciascun profilo di velocità: fissato l'ambiente di propagazione e dati in ingresso sia il giorno della simulazione che il giorno in cui è stato prelevato il profilo che si intende utilizzare, i funzionali permettono di stimare direttamente il valore massimo dell'errore acustico.

### 5.2.3 - Variabilità spaziale

Questa analisi ha mostrato come, grazie al modello propagativo, si riesca a caratterizzare la variabilità temporale attraverso un parametro acustico diretto. Tuttavia, per implementare la procedura vera e propria di scelta dei profili, si deve ancora studiare quanto influisca la diversa collocazione geografica dei profili di velocità.

Va infatti ricordato che la formula per il calcolo della velocità del suono in mare dipende da tre parametri: la temperatura, la salinità e la pressione. Ci può essere, quindi, una variabilità intrinseca delle prime due variabili, tale da poter produrre profili diversi pur appartenendo allo stesso giorno dell'anno.

Analogamente a quanto visto nel caso della variabilità temporale, anche per lo studio di quella spaziale si è fatto uso del modello propagativo *ray-tracing*. Tuttavia, rispetto al caso precedente, ci sono alcune differenze:

- Si considerano coppie di profili appartenenti alla stessa classe di *doy*, in modo da annullarne, per quanto possibile, la variabilità temporale
- Per ogni coppia di profili si effettua una simulazione in un fondale profondo (2600 metri), con il range pari alla distanza geografica che intercorre tra i punti di prelievo dei profili considerati.

Le profondità a cui si calcoleranno i valori di TL sono: 10, 20, 50, 100, 500, 1000, 2000 metri. Si è deciso di mettere un filtro sulle distanze: profili di velocità posti a distanze inferiori a 2 Km o superiori a 70 Km non saranno presi in considerazione. Questa scelta è un buon compromesso tra significatività dell'analisi e tempo di esecuzione. Si ricorda, infatti, che soltanto per studiare la variabilità spaziale si sono eseguite più di 50.000 simulazioni.

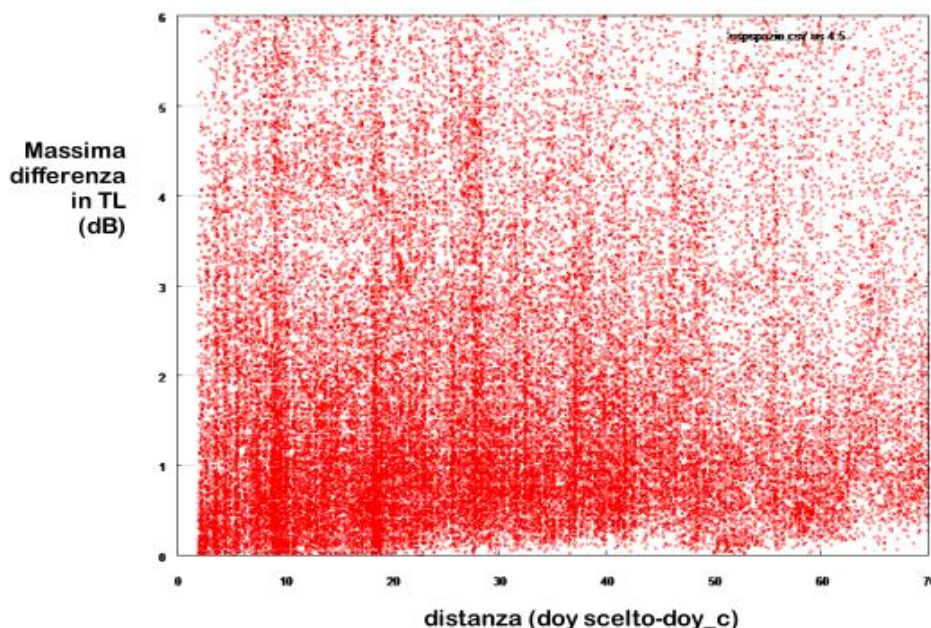
Analogamente a quanto fatto nello studio della variabilità temporale, l'anno è stato suddiviso in gruppi di tre giorni e nel seguito, col termine *doy*, ci si riferisce al giorno centrale di ogni singolo gruppo.

Tabella 11 - Massima differenza della TL in funzione della distanza del *doy* scelto (distanza) rispetto ad un *doy* di riferimento (*doy\_c*).

doy_c	Distanza	Massima differenza di TL
7	9.2	0.75
7	18.3	1.71
7	46.4	1.22
7	9.1	1.68
7	37.1	1.94
7	28	2.17
10	27.8	0.99
10	39.1	1.53
10	61.6	0.45

Le ultime due colonne possono essere utilizzate per analizzare la variabilità spaziale. Nella figura sottostante viene raffigurato il plot globale dei punti: sulle ascisse è riportata la distanza, sulle

ordinate la massima differenza delle TL (in dB).



**Fig. 31** - Massima differenza in Transmission Loss in funzione della distanza di doy.

Si è calcolato il coefficiente di correlazione lineare per tre set di dati: l'intero anno, i mesi invernali (doy [1,90]) e i mesi primaverili/estivi (doy [90,240]).

Periodo dell'anno	Coefficiente di correlazione lineare
Doy [1 , 365]	0,05
Doy [1 , 90]	0,13
Doy [90 , 240]	-0,07

Il valore prossimo allo zero del coefficiente di correlazione lineare indica una dipendenza pressoché nulla tra le due variabili.

Non si hanno quindi elementi per stabilire una connessione diretta tra la distanza dei profili e la differenza di TL prodotta al ricevitore.

#### 5.2.4 - Procedura implementata per la scelta dei profili

L'analisi fin qui svolta ha mostrato come sia possibile descrivere le differenze tra due profili di velocità in termini di un parametro acustico diretto (differenza di TL al ricevitore). Si è visto come la variabilità temporale sia descritta da opportuni funzionali matematici, e come quella spaziale, invece, non mostri alcun andamento evidente. Si tratta adesso di unire queste informazioni in un algoritmo di scelta dei profili, che, sulla base dell'indicatore acustico utilizzato, consenta di accettare o rigettare un determinato profilo di velocità.

A tale scopo, la distanza A-B (sezione di simulazione) viene suddivisa in tratti, ciascuno della lunghezza non superiore a 50 Km. Questa scelta si basa sul fatto che le analisi svolte con descrittori basati sulle differenze di velocità dei profili, mostrano comunque una dipendenza della differenza tra le forme dei profili con la distanza, sebbene le successive analisi a carattere acustico abbiano

invece evidenziato un'indipendenza tra errore acustico e distanza.

Per ciascuno dei punti così individuati, si andranno a cercare tutti i profili di velocità posti all'interno di una circonferenza di raggio 10 km, avente come centro il punto A stesso. L'insieme dei profili così ottenuto verrà vagliato, utilizzando dei specifici criteri, per determinare quali profili siano acusticamente validi.

Per prima cosa si procede a fissare il funzionale matematico che descrive l'errore acustico, che dipende dal giorno della simulazione, dalla distanza A-B e dalla profondità massima presente nel tratto considerato.

La variabilità temporale, preponderante rispetto a quella spaziale, viene assunta come strumento di selezione, ovvero saranno i funzionali che descrivono la variabilità temporale a fornire l'errore acustico associato ad ogni profilo. Nel caso in cui lo scenario ambientale effettivo non ricada fra quelli considerati nello studio della variabilità temporale, si effettueranno delle interpolazioni.

Una volta che il funzionale è stato fissato, si andranno a considerare validi solamente quei profili di velocità che abbiano un errore relativo, rispetto al minimo del funzionale, inferiore o uguale a 3 dB. Se il numero di profili trovati è uguale a dodici, si passa a manipolare il set di profili così ottenuto andando ad interpolare ciascun profilo valido per definire il valore della velocità del suono a profondità prefissate. I profili interpolati verranno successivamente mediati per ottenere un unico profilo medio da associare alla posizione geografica di partenza (A).

Nel caso in cui il numero di profili sia minore di 12, si cercheranno nuovi profili in settori circolari di raggio crescente (il passo con cui viene incrementato il raggio ad ogni iterazione è 10 km).

### 5.3 - Batimetria

Per quanto concerne la parte della batimetria la sezione batimetrica (sorgente-ricevitore), lungo la quale simulare la propagazione, viene generata interpolando con una tecnica bilineare a passo fisso (1 minuto di arco pari a circa 2 km) la griglia batimetrica di partenza (ETOPO1).

I dati così ottenuti dovranno poi essere inseriti all'interno di file specifico, dall'estensione \*.bty, organizzati in file dove il primo valore è la distanza dalla sorgente (km), mentre il secondo è la corrispondente profondità della colonna d'acqua (metri).

### 5.4 - Fondale marino

Tenendo conto della limitazione del Bellhop per quanto riguarda la gestione del fondale, si procede nel definire un criterio per la selezione dei parametri del fondale, con i quali andare a modellare ambienti *range-independent* (velocità del suono nel sedimento, densità ed attenuazione delle onde di tipo compressionale).

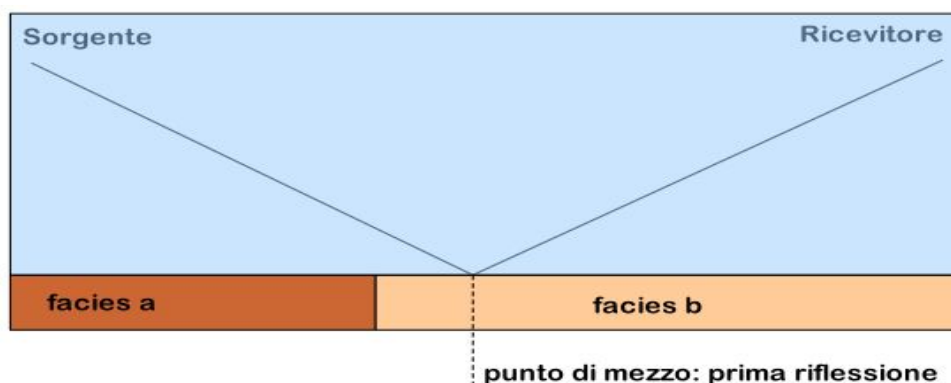
Considerando l'insieme di tutte le riflessioni che un generico raggio acustico compie nella sua propagazione, la più importante, da un punto di vista energetico, è sicuramente la prima. Le riflessioni successive alla prima risultano difatti, più povere energeticamente, in quanto l'onda ha ceduto parte della propria energia sia nella prima riflessione che nel tragitto percorso (attenuazione + divergenza geometrica).

Partendo da questa considerazione si tratta di modellare una situazione in cui, data una qualsiasi sezione di simulazione, vengano presi come dati acustici del fondale, da estendere a tutte le tipologie di sedimenti presenti lungo la sezione, quelli che caratterizzano la *facies* che si trova a metà tra sorgente e ricevitore.

La scelta della metà sezione come distanza di riferimento è derivata da considerazioni puramente geometriche: la maggior parte delle prime riflessioni tende a concentrarsi a tale distanza.

Questa parte del modello dovrebbe essere gestita tramite un algoritmo che, partendo dalle coordinate dei punti sorgente-ricevitore, calcola le coordinate del punto di mezzo e procede poi all'interpolazione lineare con i punti del fondale più vicini, assegnando al punto di mezzo un valore

opportunamente pesato tra le varie *facies* presenti.



**Fig. 32** - Implementazione della riflessione delle onde sonore sul fondale.

### 5.5 - Scelta delle profondità di simulazione

Le profondità a cui realizzare le simulazioni sono state selezionate basandosi sulle abitudini comportamentali delle principali specie di cetacei presenti nell'area del Santuario, che rappresentano di fatto i veri e propri ricevitori.

Da vari studi si nota come alcune specie di cetacei, dalla balenottera comune fino allo zifio, prediligano habitat vitali piuttosto estremi, dove le profondità possono raggiungere valori di 1500-2000 metri.

Altre specie, con particolare riferimento ai delfini, occupano acque più basse, che nel caso di tursiopi e stenelle si estendono tipicamente fino alla batimetrica dei 200 metri.

Utilizzando tre differenti profondità, 10 - 100 - 1000 metri, si ottiene un'adeguata copertura della colonna d'acqua: il dato a 10 metri dà una fotografia della propagazione nello strato più superficiale, mentre le altre due profondità permettono di indagare degli ambienti biologicamente rilevanti.

## 6 - Sperimentazione

In quest'ultima sezione verranno esposti alcuni casi studio, così da realizzare una prima verifica della validità delle scelte adottate durante le varie fasi lavorative: dalla selezione dei parametri di input fino all'esecuzione del Bellhop all'interno di scenari reali.

### 6.1 - Parametri di simulazione

All'interno dell'area di interesse è stato modellato un ambiente realistico, all'interno del quale andare a caratterizzare la propagazione acustica.

La sezione tra sorgente-ricevitore individua un ambiente a corto range, con una sezione batimetrica che evidenzia il graduale passaggio da una zona iniziale di acque relativamente basse (700 metri) ad una zona finale molto profonda (2000 metri).

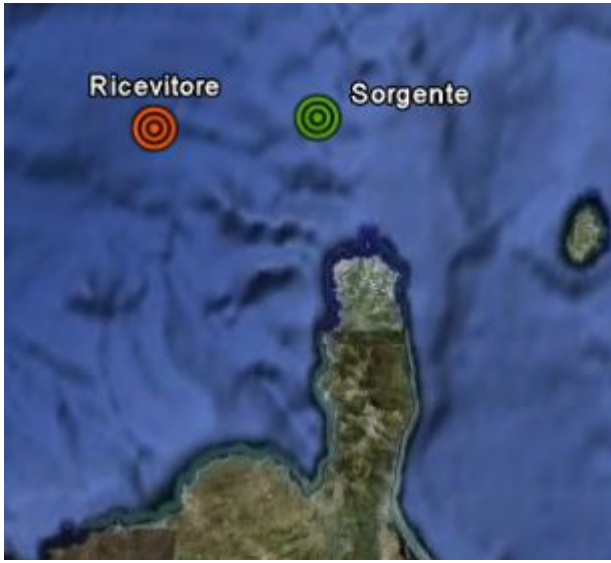
La propagazione è stata valutata all'interno di due scenari temporali molto diversi, un periodo invernale, corrispondente all'incirca alla fine di Gennaio (doy = 30), ed uno estivo che si pone all'incirca alla fine di Agosto (doy = 240). Il fondale è stato modellato impiegando dei dati geoacustici medi rispetto alle varie *facies* geologiche che caratterizzano i sedimenti dell'area del Santuario.

Il modello è stato configurato con una configurazione dettagliata dei dati di *ray-tracing*: il valore della densità di raggi impostato (150 raggi/angolo) permette di disporre di un set di raggi, oltre i 10.000, sufficiente per descrivere con un buon grado di accuratezza le variazioni della TL nei vari scenari ipotizzati.

Tutti i parametri impiegati per definire la simulazione sono riassunti nella tabella che segue.



**Tabella 12** - Parametri di simulazione.

Sezione di simulazione		
	Sorgente	43.201381 N, 9.311695 E
	Ricevitore	43.186343 N, 9.000347 E
	Range	26 km
	Profondità massima	2060 metri
Ray-tracing	Frequenza	1 kHz
	N° raggi	~ 10.000
Periodo dell'anno	Scenario invernale	Doy = 30
	Scenario estivo	Doy = 240
Proprietà fondale	Velocità suono sedimento	1718.5 m/s
	Densità	1.89 g/cm <sup>3</sup>
	Attenuazione onde sonore	0.352 dB/m

## 6.2 - Input modello

I file di testo necessari al modello come dati di input sono stati opportunamente generati (riportati per esteso nelle Appendici B):

- 1 file environmental (*Test.env*) che raccoglie tutte le informazioni principali.
- 1 file bty (*Test.bty*) con la rappresentazione della sezione batimetrica.
- 1 file del Sound Speed Profile (*Test.ssp*) con le informazioni *range-dependent* dei profili di velocità. I profili sono stati estratti dal database in base alla procedura descritta nella sezione precedente.

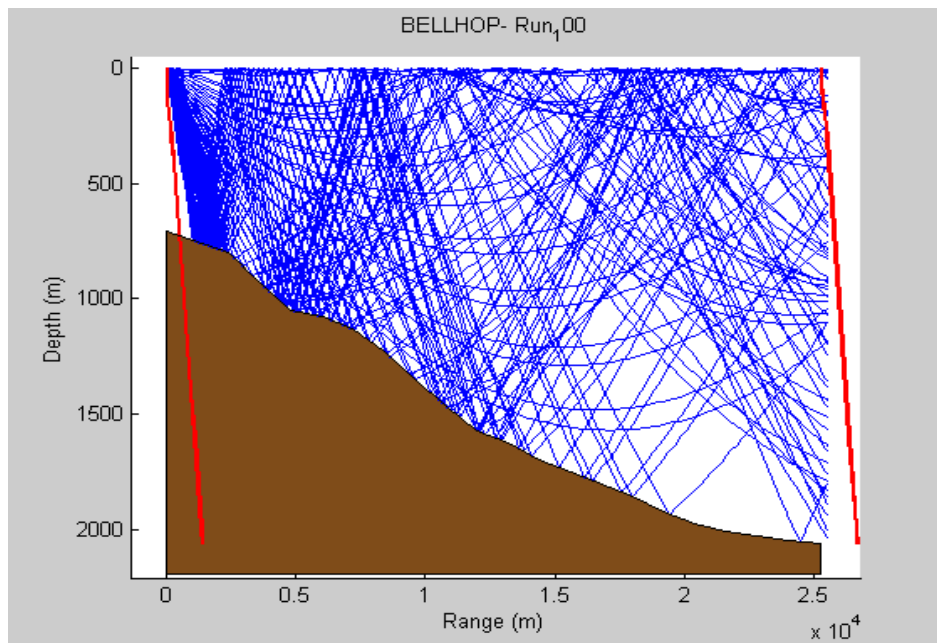
## 6.3 - Output

I risultati delle simulazioni sono riassunti nei grafici seguenti. I primi due rappresentano il plot dei raggi acustici per le due situazioni ambientali che sono state implementate (scenario invernale ed

estivo) e sono utili per raccogliere ulteriori informazioni sugli schemi di propagazione in funzione dei vari periodi dell'anno che si vanno a considerare di volta in volta.

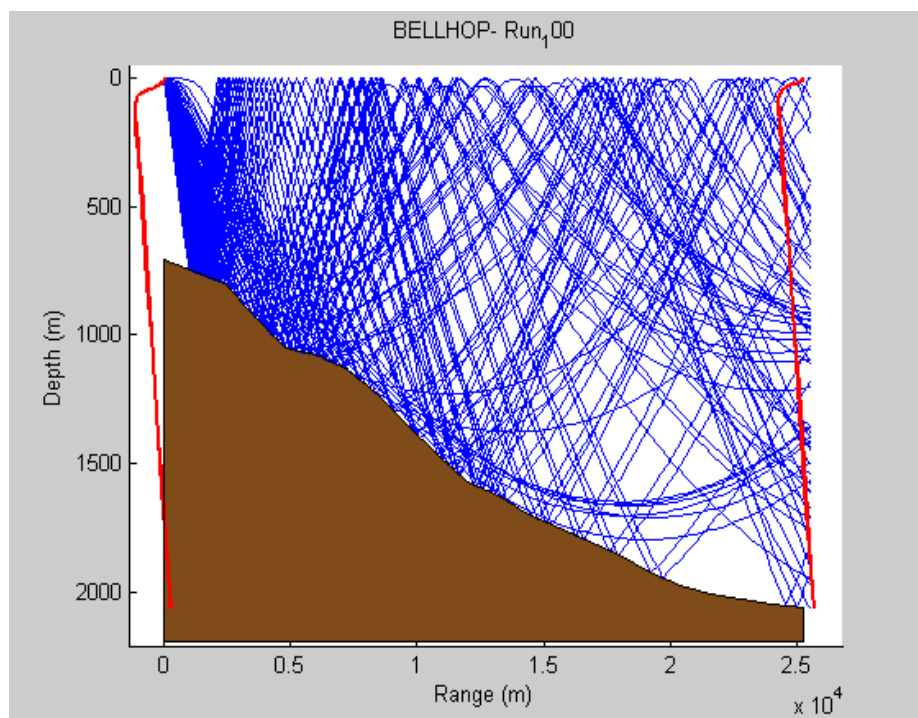
Un'analisi dei file di tipo \*.rays, ai fini modellistici, è utile anche per evidenziare eventuali scelte operative (ampiezza del fan angolare, etc.) che non permettano una rappresentazione significativa dell'area indagata.

Ad esempio nel caso si volessero avere delle informazioni sull'andamento della TL, in funzione della profondità, e in prossimità di un ricevitore posto al massimo range, si potrebbe agire andando a scegliere un fan molto ristretto che vada quindi a focalizzare i raggi solo nella parte terminale della sezione.



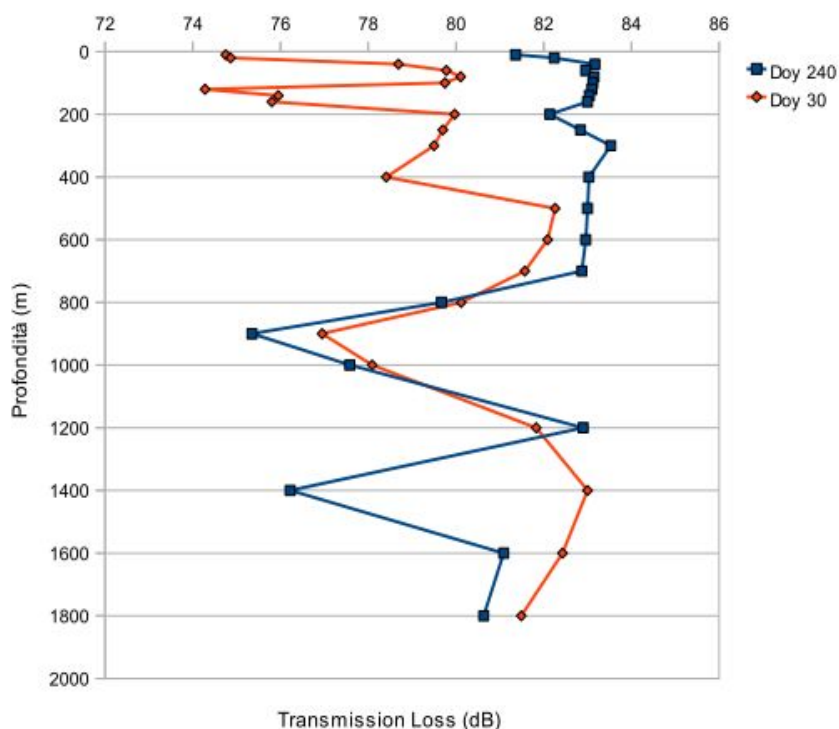
**Fig. 33** - Plot dei raggi acustici nello scenario invernale (doy = 30). Le linee rosse rappresentano i profili di velocità del suono che vengono estratti dal database e che vanno poi a formare il file Test.ssp.

Tramite un'analisi dei percorsi acustici dei raggi si può andare a controllare la corretta implementazione di questa procedura operativa.



**Fig. 34** - Plot dei raggi acustici nello scenario estivo (doy = 240).

Il grafico che segue sintetizza come varia la Transmission Loss all'interno dei due scenari temporali considerati. Il plot sottostante evidenzia per lo scenario estivo delle zone di “accumulo” di energia, intorno ai 1000 e 1400 metri, che corrispondono, se paragonate con il corrispondente diagramma dei raggi, a delle aree in cui le condizioni di propagazione forzano i raggi sonori a concentrarsi.



**Fig. 35** - Trend Transmission Loss in funzione della profondità negli scenari estivo ed invernale.

## Appendice A - Coefficienti dei funzionali parabolici nei vari scenari ambientali analizzati

Corti range / fondali profondi

Serie di Fourier per il parametro  $a$ :

$$a = \sum_{k=0}^4 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

Coefficienti della serie	Intervalli di confidenza 95%
$a_0 = 0.0004093$	(0.0003924, 0.0004261)
$a_1 = 7.384e-005$	(5.016e-005, 9.753e-005)
$a_2 = 9.984e-005$	(7.506e-005, 0.0001246)
$a_3 = 7.114e-006$	(-1.676e-005, 3.099e-005)
$a_4 = -0.000112$	(-0.0001363, -8.772e-005)
$b_1 = 2.175e-005$	(-1.946e-006, 4.545e-005)
$b_2 = 0.0001585$	(0.000136, 0.000181)
$b_3 = 3.494e-005$	(1.131e-005, 5.857e-005)
$b_4 = -5.871e-005$	(-8.189e-005, -3.554e-005)

Serie di Fourier per il parametro  $b$ :

$$b = \sum_{k=0}^2 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

Coefficienti della serie	Intervalli di confidenza 95%
$a_0 = 0.0001262$	(-0.00178, 0.002032)
$a_1 = 0.001806$	(-0.0009116, 0.004523)
$a_2 = -0.02679$	(-0.02961, -0.02397)
$b_1 = 0.01148$	(0.008777, 0.01418)
$b_2 = 0.01941$	(0.0168, 0.02201)

Serie di Fourier per il parametro  $c$ :

$$c = \sum_{k=0}^3 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

$a_0 = 5.383$	(5.307, 5.46)
$a_1 = -1.318$	(-1.424, -1.211)
$a_2 = -0.8145$	(-0.9275, -0.7014)
$a_3 = 0.03587$	(-0.07264, 0.1444)
$b_1 = 0.0622$	(-0.04744, 0.1718)
$b_2 = -1.441$	(-1.544, -1.338)
$b_3 = -0.1078$	(-0.2166, 0.0009987)

Lunghi range / fondali profondi

Serie di Fourier per il parametro  $a$ :

$$a = \sum_{k=0}^4 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

Coefficienti della serie	Intervalli di confidenza 95%
$a_0 = 0.0003765$	(0.0003633, 0.0003897)
$a_1 = 9.051\text{e-}005$	(7.186e-005, 0.0001092)
$a_2 = 0.0001026$	(8.336e-005, 0.0001218)
$a_3 = 5.371\text{e-}005$	(3.5e-005, 7.242e-005)
$a_4 = -6.263\text{e-}005$	(-8.213e-005, -4.314e-005)
$b_1 = 6.792\text{e-}005$	(4.925e-005, 8.658e-005)
$b_2 = 2.436\text{e-}005$	(6.419e-006, 4.229e-005)
$b_3 = -3.307\text{e-}005$	(-5.157e-005, -1.457e-005)
$b_4 = -3.882\text{e-}005$	(-5.664e-005, -2.101e-005)

Serie di Fourier del parametro  $b$ :

$$b = \sum_{k=0}^2 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

Coefficienti della serie	Intervalli di confidenza 95%
$a_0 = 4.765\text{e-}005$	(-0.001969, 0.002064)
$a_1 = -0.01392$	(-0.01677, -0.01108)
$a_2 = -0.01914$	(-0.02206, -0.01622)
$b_1 = 0.01538$	(0.01254, 0.01822)
$b_2 = 0.01525$	(0.01261, 0.01815)

Serie di Fourier del parametro  $c$ :

$$c = \sum_{k=0}^3 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

$a_0 = 4.596$	(4.526, 4.666)
$a_1 = -1.681$	(-1.779, -1.584)
$a_2 = -0.8401$	(-0.9423, -0.7379)
$a_3 = -0.1171$	(-0.2161, -0.01822)
$b_1 = -1.609$	(-1.709, -1.509)
$b_2 = -0.5331$	(-0.6282, -0.438)
$b_3 = 0.067$	(-0.0309, 0.1649)

Corti range / fondali bassi

Serie di Fourier per il parametro  $a$ :

$$a = \sum_{k=0}^4 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

Coefficienti della serie	Intervalli di confidenza 95%
$a_0 = 0.000494$	(0.0004722, 0.0005159)
$a_1 = 5.816\text{e-}005$	(2.67e-005, 8.961e-005)
$a_2 = 3.76\text{e-}007$	(-3.114e-005, 3.189e-005)
$a_3 = 1.508\text{e-}005$	(-1.627e-005, 4.642e-005)
$a_4 = 1.311\text{e-}006$	(-3.012e-005, 3.274e-005)
$b_1 = 5.641\text{e-}005$	(2.603e-005, 8.678e-005)
$b_2 = 5.015\text{e-}005$	(1.983e-005, 8.047e-005)
$b_3 = -0.0001171$	(-0.0001473, -8.676e-005)
$b_4 = 4.585\text{e-}005$	(1.609e-005, 7.56e-005)

Serie di Fourier del parametro  $b$ :

$$b = \sum_{k=0}^2 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

Coefficienti della serie	Intervalli di confidenza 95%
$a_0 = 0.0002672$	(-0.002462, 0.002996)
$a_1 = -0.01868$	(-0.02256, -0.01481)
$a_2 = -0.03248$	(-0.03626, -0.0287)
$b_1 = 0.02024$	(0.0165, 0.02397)
$b_2 = 0.003388$	(-0.0003691, 0.007145)

Serie di Fourier per il parametro  $c$ :

$$c = \sum_{k=0}^3 a_k \cdot \cos\left(\frac{2\pi k x}{365}\right) + b_k \cdot \sin\left(\frac{2\pi k x}{365}\right)$$

$a_0 = 4.481$	(4.409, 4.553)
$a_1 = -1.805$	(-1.909, -1.701)
$a_2 = -0.1136$	(-0.2176, -0.009624)
$a_3 = -0.07021$	(-0.1725, 0.03203)
$b_1 = -1.811$	(-1.911, -1.71)
$b_2 = -0.9191$	(-1.019, -0.8197)
$b_3 = 0.2985$	(0.1975, 0.3994)



## Appendice B1 - Enviromentale File

Nome File: *Test.env*

```
'Test'
1000
1
'QVFT'
0 0.0 2059
0.0 1534.4
1.0 1534.4
2.0 1534.4
3.0 1534.3
4.0 1534.2
6.0 1533.9
8.0 1533.7
10.0 1533.4
12.0 1533.0
15.0 1532.4
17.0 1532.1
20.0 1531.3
25.0 1529.6
30.0 1528.1
35.0 1525.9
40.0 1523.8
45.0 1521.6
50.0 1518.5
60.0 1513.2
70.0 1510.9
80.0 1509.7
90.0 1509.0
100.0 1508.5
120.0 1508.2
140.0 1508.4
160.0 1508.7
180.0 1509.1
200.0 1509.5
250.0 1510.6
300.0 1511.6
400.0 1513.3
500.0 1514.9
600.0 1516.4
800.0 1519.6
1000.0 1522.7
1200.0 1525.9
1400.0 1529.0
1600.0 1532.2
2000.0 1538.5
2059.0 1539.5
'A*' 0.0
2059 1718.5 0.0 1.89 0.352 0.0 /
```

```

1
10 /
23
10.0 20.0 40.0 60.0 80.0 100.0 120.0 140.0 160.0 200.0 250.0 300.0
400.0 500.0 600.0 700.0 800.0 900.0 1000.0 1200.0 1400.0 1600.0
1800.0 /
2
0.1 25.29 /
'IB'
10450
-33.47 36.2 /
0 2079.59 25.54

```

## Appendice B2 - File di batimetria

Nome File: *Test.bty*

```

'L'
20
0.0 708.6          13.2 1622.0
2.4 800.7          14.4 1696.1
3.6 931.9          15.6 1750.5
4.8 1050.9         18.0 1856.3
6.0 1079.0         19.2 1921.4
7.2 1130.8         20.4 1977.2
8.4 1230.5         21.6 2006.3
9.6 1350.0         22.8 2029.2
10.8 1465.6        24.0 2047.0
12.0 1570.5        25.3 2059.9

```

## Appendice B3 - File Sound Speed Profile

Nome File: *Test.ssp*

```

2          1528.1 1516.7
0.0      25.3    1525.9 1514.0
1534.4 1530.3    1523.8 1511.7
1534.4 1530.0    1521.6 1510.3
1534.4 1529.8    1518.5 1509.1
1534.3 1529.5    1513.2 1507.8
1534.2 1529.2    1510.9 1507.2
1533.9 1528.5    1509.7 1506.8
1533.7 1527.8    1509.0 1506.7
1533.4 1527.2    1508.5 1506.7
1533.0 1526.4    1508.2 1506.9
1532.4 1525.2    1508.4 1507.2
1532.1 1524.4    1508.7 1507.6
1531.3 1522.9    1509.1 1508.0
1529.6 1519.7    1509.5 1508.4

```

1510.6 1509.5  
1511.6 1510.4  
1513.3 1511.9  
1514.9 1513.4  
1516.4 1515.0  
1519.6 1518.1

1522.7 1521.3  
1525.9 1524.6  
1529.0 1527.9  
1532.2 1531.2  
1538.5 1537.8  
1539.5 1538.8

## Bibliografia

- Ainslie, M.A, De Jong, C.A.F., Dol, H.S., Blacqui re, G., Marasini, C. 2009. Assessment of natural and anthropogenic sound sources and acoustic propagation in the North Sea. TNO report [TNO-DV 2009 C085].
- Barbanti, R. & Poulain, P.M. 2007. Misure di temperatura e salinità nel Mar Mediterraneo mediante profilatori lagrangiani (2000-2006). [Report] Rel. 2007/21-OGA 6 SIRE.
- Bryant, P. J., C. M. Lafferty and S. K. Lafferty. 1984. Reoccupation of Laguna Guerrero Negro, Baja California, Mexico, by gray whales. In: M. L. Jones (ed.) *The Gray Whale Eschrichtius robustus*. Orlando (FL): Academic Press. Pp 375-386.
- Buck, B.M. & Chalfant, D.A. 1972. Deep water narrowband radiated noise measurement of merchant ships. Delco TR72-28. Santa Barbara, California: Delco Electronics. 30pp.
- Collier, R. D. 1998. Ship and platform noise, propeller noise. Handbook of acoustics. M. J. Crocker, John Wiley & Sons.
- Dos Santos M.E., Ferreira A.J., Ramos J., Ferreira J.F., Bento-Coelho J.L. 1995. The acoustic world of the bottlenose dolphins in the Sado Estuary. Proceedings of the ninth annual conference of the European Cetacean Society. Lugano, Switzerland, February 9-11, 1995:62-64.
- Dubrovsky, N.A., and S.V. Kosterin. 1993. Noise in the ocean caused by lightning strokes. In: B.R. Kerman (ed). *Natural Physical Sources of Underwater Sound*. Dordrecht, Holland: Kluwer Academic Publishing. pp 697-709.
- Etter, P.C. 2003. *Underwater Acoustic Modeling*, Spon Press.
- Evans, P.G.H. & Nice, H. 1996. Review of the effects of underwater sound generated by seismic surveys in cetaceans. Seawatch Foundation, Oxford, UK.
- Greene, C.R. 1985. Characteristics of waterborne industrial noise. In: Behaviour, Disturbance Responses and Distribution of Bowhead Whales, *Balaena mysticetus*, in the Eastern Beaufort Sea, 1980-84. In: W.J. Richardson (ed), pp.197-253. Report to U.S. Minerals Management Service, Reston, VA (Available from NTIS, Springfield, VA; PB87-124376).
- Green, D.M., DeFerrari, H.A., McFadden, D., Pearse, J.S., Popper, A.N., Richardson, W.J., Ridgway, S.H. & Tyack, P.L. 1994. Low-frequency sound and marine mammals: Current knowledge and research needs [Report] Washington (DC): National Academy Press.
- Green, M. L. 2005. Acoustic Impacts on Marine Life. Ocean Mammal Institute [Internet]. <<http://www.oceanmammalinst.org/pdfs/Acoustic-Impacts-on-Marine-Life.pdf>>
- Hamilton, E.L. 1980. Geoacoustic modeling of the seafloor. *Journal of the Acoustical Society of America* 65(5):1313-1340.
- Hamilton, E.L & Bachman, R.T. 1982. Sound velocity and related properties of marine sediments. *Journal of the Acoustical Society of America* 72(6):1891-1904.
- Hildebrand, J. A. 2005. Impacts of Anthropogenic Sound. In: J.E. Reynolds et al., (eds). *Marine Mammal Research: Conservation beyond Crisis*. Baltimore, Maryland: The Johns Hopkins University Press. pp. 101-124.
- International Fund for Animal Welfare (IFAW). 2003. Protecting the World's Whales [Internet]. <[http://www.ifaw.org/images\\_custom/publications/AnimalFactSheets/4ProtectWhales.pdf](http://www.ifaw.org/images_custom/publications/AnimalFactSheets/4ProtectWhales.pdf)>
- Kuperman, W.A., and Ferla, M.C. 1985. A shallow water experiment to determine the source spectrum level of wind-generated noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 7:2067-2073.
- Malme, C.I. Miles, P.R., Miller, G.W., Richardson, W.J., Roseneau, D.G., Thomson, D.H. and Greene Jr, C.R. 1989. Analysis and ranking of the acoustic disturbance potential of

- petroleum industry activities and other sources of noise in the environment of marine mammals in Alaska. BBN Rep. 6945, OCS Study MMS 89-0006. Cambridge, Massachusetts: BBN Systems & Technology Corporation.
- Marine Mammal Commission (MMC). 2007a. Marine Mammals and Noise: A Sound Approach to Research And Management. Report [Internet].  
<[www.mmc.gov/sound/fullsoundreport.pdf](http://www.mmc.gov/sound/fullsoundreport.pdf)>
- McDonald, M.A., Hildebrand, J.A. & Wiggins, S.M. 2006. Increases in the deep ocean ambient noise in the Northeast Pacific west of San Nicolas Island, California. *The Journal of the Acoustic Society of America* 120(2):711-718.
- Miles, P.R., Malme, C.I. & Richardson, W.J. 1989. Prediction of drilling site-specific interaction of industrial acoustic stimuli and endangered whales in the Alaskan Beaufort Sea. OCS Study MMS 87-0084. BBN Report No. 6509. BBN Inc., Cambridge, Massachusetts. 341pp.
- Perry, C. 1998. A Review of the Impact of Anthropogenic Noise on Cetaceans [Internet].  
<[http://www.repubblica.it/2003/h/sezioni/scienza\\_e\\_tecnologia/cacciabalene/sonar/sonar.html](http://www.repubblica.it/2003/h/sezioni/scienza_e_tecnologia/cacciabalene/sonar/sonar.html)>
- Portunato N., Principi fondamentali per la comprensione del SONAR, Corso di Bioacustica Terrestre e Marina, Università di Pavia, A.A. 2007/2008
- Richardson W.J., Greene, C.R. Jr, Malme, C.I. & Thompson, D.H. 1995. Marine mammals and noise. San Diego (CA): Academic Press. 576 pp.
- Ross, D. 1976. Mechanics of underwater noise. New York: Pergamon Press. 375pp.
- Roussel, E. 2002. Disturbance to Mediterranean cetaceans caused by noise. In: G. Notarbartolo di Sciara, editor. *Cetaceans of the Mediterranean and Black Seas: state of knowledge and conservation strategies*. A Report to the ACCOBAMS Secretariat, Monaco, February 2002. Section 13, p. 18. [Internet].  
<[www.wdcs-de.org/docs/OceansofNoise.pdf](http://www.wdcs-de.org/docs/OceansofNoise.pdf)>
- Schreiner, A. E., C. G. Fox and R. P. Dziak (1995). Spectra and magnitudes of t-waves from the 1993 earthquake swarm on the Juan de Fuca ridge. *Geophysical Research Letters* 22(2):139-142.
- Simmonds, M., Dolan, S. & Weilgart, L. 2004. Oceans of Noise. The Whale and Dolphin Conservation Society. Report [Internet].  
<[http://www.wdcs.org/submissions\\_bin/OceansofNoise.pdf](http://www.wdcs.org/submissions_bin/OceansofNoise.pdf)>
- Thiele, L. & Ødengaard, J. 1983. Underwater noise from the propellers of a triple screw container ship. Rep. 82.54. Copenhagen: Ødengaard and Danneskiold-Samsøe K/S. 51pp.
- Urlick, R. J. 1982. Sound propagation in the sea. Los Altos (CA): Peninsula.
- Wartzok, D., W. A. Watkins, B. Wursig & C. I. Malme. 1989. Movements and behaviors of bowhead whales in response to repeated exposures to noises associated with industrial activities in the Beaufort Sea. [Report] Purdue University for Amoco Production Company, Anchorage, AK 228 pp.
- Wenz, G.M. 1962. Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *Journal of the Acoustical Society of America* 34:1936-1956.