

Vol. 61 – Supplemento 1

Marzo 2020

Bollettino di Geofisica teorica ed applicata

An International Journal of Earth Sciences

A. Affatati

Rumore subacqueo in ambiente marino: fonti, effetti sulla fauna e misure di mitigazione

a cura di: A. Camerlenghi



Istituto Nazionale di Oceanografia
e di Geofisica Sperimentale

ISSN 0006-6729

Responsibility for all statements made in B.G.T.A. lies with the authors

Typesetting: Luglioprint, Trieste
Printing: Luglioprint, Trieste

Authorised by the Tribunale di Trieste, n. 242, September 17, 1960
Direttore responsabile: P. Giurco

La figura in copertina non è in scala.
Gli organismi viventi rappresentati sono puramente indicativi.
Disegno di Alice Affatati.

Introduzione

A. CAMERLENGHI

*Direttore della Sezione di Geofisica di OGS e Delegato MUR
al Management Board di JPI Oceans*

Il rumore antropico nell'ambiente sub-acquatico è considerato una forma di inquinamento, al pari di quello immesso nell'ambiente terrestre. L'impatto del rumore in ambiente terrestre è considerato principalmente sulle popolazioni umane, soprattutto nell'ambiente urbano, nelle vicinanze di infrastrutture come aeroporti e ferrovie, in certi ambienti lavorativi e in attività ricreative. L'impatto sulla salute umana è riconosciuto dalla World Health Organization che riconosce l'importanza del problema per la salute pubblica e promuove l'implementazione di linee guida a livello Europeo. Per lo scopo l'Unione Europea ha pubblicato la *European Union Directive 2002/49/EC Relating to the assessment and management of environmental noise (END)* e *Technical Guidance* elaborate dalla *European Environment Agency*.

Il progressivo incremento delle attività antropiche in ambiente marino, che sono contenute nel termine generico di *Blue Economy*, soggetta ad un rapido sviluppo come definito dall'altro termine adottato anche a livello europeo della *Blue Growth*, ha suggerito di inserire il rumore antropico tra gli inquinanti dell'ambiente marino all'interno della *European Union Directive 2008/56/EC Marine Strategy Framework Directive (MSFD)*. La MSFD ha lo scopo di raggiungere il *Good Environmental Status* (GES - definito nella revisione della Direttiva del 2017) attraverso il mantenimento della biodiversità dei mari europei entro il 2020. Il rumore è stato esplicitamente inserito nella Direttiva attraverso la definizione del Descrittore 11 che si riferisce all'introduzione di energia nell'ambiente marino, incluso il rumore sottomarino.

La rilevanza dell'argomento per l'Unione, che riconosce anche la difficoltà dell'implementazione, è data dall'istituzione di un gruppo tecnico ad hoc per il rumore sottomarino: *Technical Group on Underwater Noise (TG Noise)* che ha il compito di facilitare lo sviluppo da parte degli Stati Membri di proprie strategie e normative per la mitigazione degli impatti, sempre al fine di raggiungere il GES. Questo processo deve avvenire in modo coordinato all'interno delle regioni marine europee: Mar Baltico, Ocean Atlantico Nord-Orientale, Mar Mediterraneo, Mar Nero e relative sotto-regioni.

Il processo è indubbiamente molto complesso. A confronto con il processo di mitigazione degli impatti del rumore in ambiente terrestre, le popolazioni animali oggetto delle misure di mitigazione nell'ambiente marino non consentono paragonabili studi veterinari clinici, sperimentali, psicologici e di monitoraggio. La regionalità dell'approccio, inoltre, implica nel caso di Mediterraneo e Mar Nero in particolare, il confronto normativo tra stati comunitari e non. Una fiorente attività scientifica sta raccogliendo dati in supporto di una migliore definizione degli impatti, ma

questi sono principalmente rivolti agli individui, soprattutto specie di mammiferi marini. Vi sono ampie lacune di conoscenza sugli effetti del rumore su specie non solo di mammiferi, sugli effetti sulle popolazioni, sugli effetti cumulativi e sugli ecosistemi. Dal punto di vista pratico con il supporto di *TG Noise* si stanno definendo i valori di soglia e tutte i dettagli relativi alla metrica ed ai parametri utili per il monitoraggio.

Come per l'ambiente terrestre, vi sono varie emissioni di rumore, ognuna caratterizzata da propri parametri e impatti. Per l'ambiente marino si riconoscono cinque differenti emissioni dette "big five": Sonar militari, esplorazione geofisica offshore (per scopi scientifici o minerari), attività ingegneristiche offshore (costruzione ed uso di turbine eoliche, turbine tidali), traffico navale (compresa l'attività ricreativa e la pesca), esplosioni (esercitazioni militari e detonazione di ordigni bellici).

La comunità scientifica geofisica ed oceanografica di OGS si trova profondamente coinvolta nella questione, in quanto nell'espletamento della propria missione scientifica si trova a ricoprire il doppio ruolo di contributore all'inquinamento acustico dei mari e degli oceani, tramite l'esplorazione geofisica e l'utilizzo di navi oceanografiche, e di detentore della conoscenza scientifica utile al processo di supporto scientifico alle istituzioni del governo per l'implementazione delle misure di mitigazione.

Con questo documento si intende compiere un primo passo verso la presa di coscienza collettiva dell'importanza del rumore antropico nell'ambiente marino attraverso due contributi: Nel primo contributo, esteso, si presenta una revisione della letteratura scientifica sull'argomento, volutamente senza focalizzarla alle attività scientifiche prevalenti di OGS. La revisione è proposta come un documento propedeutico per chiunque, nella comunità scientifica, nelle organizzazioni non governative, nelle amministrazioni pubbliche o nella cittadinanza, voglia interessarsi al rumore nell'ambiente marino evitando i condizionamenti di certa informazione parziale, o non scientifica, spesso presente nei mezzi di comunicazione. La revisione è stata condotta come tirocinio non curricolare di 12 mesi di Alice Affatati, laurea magistrale in ingegneria all'Università di Trieste, sotto la supervisione dello scrivente all'interno del progetto "*Enhancing competencies in the Marine and Maritime sectors: an opportunity for the Mediterranean countries*", una piattaforma di conoscenze e competenze sulla "*Blue Economy*" al servizio dei Paesi del Mediterraneo per una crescita sostenibile e responsabile nel settore marino e marittimo, finanziato a OGS dal Ministero dell'Università e della Ricerca (MUR).

Il secondo contributo, è un breve documento di posizione di OGS a firma del Presidente dell'Ente, dei direttori delle strutture scientifiche e del responsabile della Cooperazione Internazionale, Comunicazione, Sviluppo delle professionalità e Promozione della Ricerca. È volto a sancire apertamente la consapevolezza da parte della comunità scientifica, l'intenzione di operare al fine minimizzare gli impatti del rumore emesso durante le proprie attività di ricerca secondo le conoscenze scientifiche per contribuire al raggiungimento del *Good Environmental Status* dei mari e degli oceani, ed infine la disponibilità della comunità di ricerca a collaborare con le istituzioni nella ricerca scientifica e nell'implementazione di linee guida e procedure di mitigazione degli impatti secondo la normativa Europa, le linee guida di *TG Noise* e l'attività promossa dalla *Joint Programming Initiative Healthy and Productive Seas and Oceans* (JPI Oceans) .

Si tratta di un primo passo che si auspica sarà seguito da documenti specifici sulle proprie attività di ricerca che interessano aree ambientalmente sensibili come quelle Mediterranee e polari.

Rumore subacqueo in ambiente marino: fonti, effetti sulla fauna e misure di mitigazione

A. AFFATATI

Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale, Trieste

(Ricevuto: 19 dicembre 2019; accettato: 5 febbraio 2020)

Prefazione

L'uomo dipende dai servizi ecosistemici forniti dall'oceano. Tuttavia, la presenza umana ha alterato, direttamente ed indirettamente, le caratteristiche di questi ambienti. La gestione e la conservazione dei mari e degli oceani richiede la valutazione della distribuzione spaziale dell'intensità delle attività antropiche e della sovrapposizione degli impatti sugli ecosistemi marini (Halpern *et al.*, 2008; Merchant *et al.*, 2016).

L'aumento degli inquinanti chimici, del traffico navale e dello sforzo di pesca sono alcune tra le principali cause del depauperamento delle risorse, a cui si aggiunge il rumore sottomarino prodotto da attività umane (Richardson *et al.*, 1995). Esso sembra essere in aumento – anche in correlazione alla crescita globale – e ciò è causa di problematiche che si riversano sugli organismi marini acusticamente sensibili e sul funzionamento degli ecosistemi. I *policy maker* stanno iniziando a considerare questo impatto ecologico, ma sono limitati da una mancanza di dati sui livelli di rumore attuali e storici (Halpern *et al.*, 2008; Merchant *et al.*, 2016). L'interesse scientifico relativo a questi fenomeni è aumentato significativamente negli ultimi decenni. A causa della sua ubiquità e della sua capacità di propagazione, il rumore marino è un argomento multidisciplinare sempre più studiato da scienziati con formazione differente: biologi, geofisici, ingegneri e matematici.

Le fonti antropogeniche possono essere categorizzate come impulsive (discontinue) o continue. Ognuna di queste tipologie è associata a effetti particolari sulla fauna marina e richiede un approccio gestionale fatto su misura per mitigare l'impatto potenziale. Propagandosi nei mari e negli oceani, e attraversando anche confini internazionali, la gestione del rumore richiede una risposta collettiva coordinata (Hildebrand, 2009; Merchant *et al.*, 2016). Uno dei maggiori limiti nella creazione di linee guida condivise è la mancanza di dati riguardanti i livelli di rumore attuali e storici. Questa carenza limita l'abilità dei legislatori di valutare l'impatto delle attività e ostacola la predisposizione di obiettivi. Un altro problema cardine nella valutazione del rumore antropogenico è la difficoltà nel promuovere programmi di monitoraggio che potrebbero stabilire livelli di rumore di base su cui misurare gli andamenti futuri (Halpern *et al.*, 2008). Inoltre, riscuote particolare preoccupazione l'impatto che il rumore marino può esercitare non solo a livello individuale, ma anche sulle reti trofiche, sugli ecosistemi, sull'alterazione delle dinamiche predatore-preda e sulle popolazioni.

Scopo e struttura del documento

Questo documento non può essere considerato una rassegna critica esaustiva di tutte le fonti che producono rumore, gli effetti che ne derivano e gli argomenti relativi all'oceanografia acustica. Il testo mira, piuttosto, a presentare una visione ampia, seppur divulgativa, del problema dell'inquinamento acustico, argomento di cui si sa ancora troppo poco a livello scientifico e che sta creando preoccupazione sempre maggiore nelle istituzioni, a livello europeo e mondiale. L'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS, con questo documento, vuole dimostrare la consapevolezza del problema del rumore sottomarino considerato sia come oggetto di ricerca scientifica che come impatto delle proprie attività nell'espletamento delle funzioni istituzionali con campagne scientifiche oceanografiche soprattutto nei mari italiani e polari, e dichiara di voler utilizzare ed implementare le adeguate misure di mitigazione, in collaborazione con le autorità competenti, che permettano la sostenibilità ambientale delle proprie attività.

Dopo un capitolo introduttivo che punta a stabilire il contesto di queste problematiche e l'importanza della ricerca in questo campo, si passa al capitolo 2 nel quale si presenta una panoramica delle sorgenti più comuni di rumore in ambiente sottomarino. Queste si possono sommariamente suddividere in fonti antropogeniche e naturali e, a loro volta, in continue e discontinue.

Nel capitolo 3 si discutono i sistemi uditivi di mammiferi marini e pesci e i principali impatti del rumore antropogenico sulla fauna.

Le misure di mitigazione sono necessarie per svolgere lavori di ricerca in modo sostenibile. Questo è l'argomento del capitolo 4 che racchiude le “migliori pratiche” generalmente usate.

Il capitolo 5, infine, funge da conclusione, fornendo un cenno agli studi futuri necessari.

Ognuno dei capitoli è essenzialmente indipendente e alcuni dei termini di acustica più usati sono proposti nell'Appendice A. In fondo al volume è raccolta la bibliografia suddivisa per capitolo.

1. Introduzione

L'oceano è, generalmente, considerato un luogo silenzioso. Ciò è largamente dovuto al fatto che l'uomo si sia adattato poco ai suoni sottomarini, i quali non vengono ben percepiti (Richardson *et al.*, 1995; Stocker, 2002). In anni recenti, la comunità scientifica è diventata più cosciente dei problemi riguardanti la conservazione delle risorse marine e i livelli di rumore antropogenico introdotti in questi ecosistemi stanno raggiungendo valori senza precedenti (National Research Council, 2003). Ad esempio, se consideriamo il rumore navale, vediamo che l'incremento sostanziale del numero di imbarcazioni commerciali durante gli ultimi 70 anni implica che ci sia stato un aumento graduale dei livelli medi del rumore diffuso dell'ordine dei 15 dB. Tuttavia, è necessario considerare che le navi costruite più recentemente sono più silenziose e la relazione tra il rumore prodotto e i parametri navali caratteristici non fornisce informazioni sufficienti da permettere di sviluppare una capacità predittiva (National Research Council, 2003).

Un impedimento alla valutazione degli effetti biologici del rumore marino è la scarsità di dati – soprattutto a lungo termine – riguardanti il comportamento delle specie marine libere in risposta alle fonti sonore. Inoltre, le problematiche legate al rumore vanno a sommarsi e ad interagire con altre pressioni antropiche, generando risultati ed impatti ancora non noti. Ulteriori studi sono necessari per indagare e valutare le complessità di queste interazioni distinguendo tra effetti cumulativi, moltiplicativi e sinergici. Per di più, lo studio degli effetti a livello della popolazione è complicato, anche perché le osservazioni devono essere condotte su grandi distanze e per lunghi periodi di tempo, rendendo molto difficile la correlazione causa-effetto (Hildebrand, 2005).

L'influenza che l'uomo esercita sull'oceano mostra una forte eterogeneità spaziale (Fig. 1): la maggior parte dell'impatto cumulativo si trova nelle aree delle piattaforme, mentre le zone meno

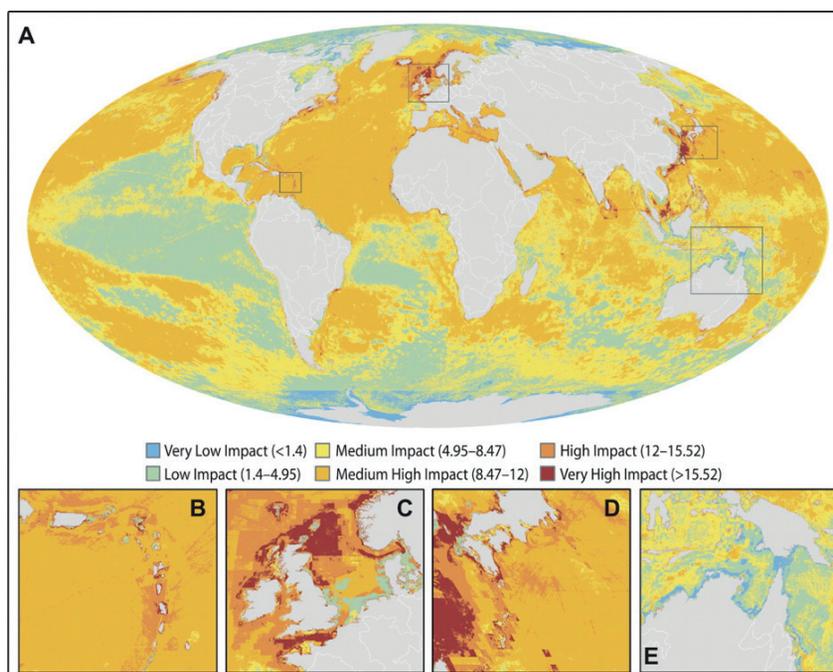


Fig.1 - Mappa globale degli impatti cumulativi (A): B) regioni dei Caraibi orientali; C) Mare del Nord; D) Giappone; E) Australia settentrionale (Halpern *et al.*, 2008).

contaminate (3,7% degli oceani) sono presenti alle latitudini polari elevate, dove il ghiaccio permanente e stagionale limita l'accesso umano (Halpern *et al.*, 2008).

Al fine di valutare i potenziali effetti del rumore sottomarino, devono essere considerate sia le fonti identificabili che quelle di *ambient noise*. Questo termine è utilizzato dalla comunità di oceanografia acustica per riferirsi al rumore di fondo emanato da una miriade di fonti non identificabili (National Research Council, 2003). Molte di esse esistono dalla formazione della terra e degli oceani ed è molto probabile che questi suoni abbiano avuto un impatto sull'evoluzione dei sistemi uditivi, sulla comunicazione tra gli animali e sull'ecologia (Fay e Popper, 2000). Le sorgenti sonore possono essere sommariamente suddivise tra naturali ed antropogeniche e differiscono sulla base delle loro caratteristiche fisiche. Vicino ad esse il livello di pressione sonora è determinato per la maggior parte dalle caratteristiche della sorgente, mentre, man mano che la distanza dalla fonte aumenta, i fattori ambientali sono sempre più importanti nella definizione del campo del suono (Hildebrand, 2009). La Tabella 1 riassume i valori medi del livello di pressione sonora in alcuni ambienti.

Tabella 1 - Valori medi del livello di pressione sonora in alcuni ambienti e condizioni (tabella modificata da Comini, 2005). In questi ambienti aerei la pressione in dB è riferita a 20 μ Pa, mentre nell'ambiente marino si fa riferimento a 1 μ Pa. Ciò implica una differenza di 26 dB per una stessa pressione.

Pressione Sonora [Pa]	Livello di Pressione sonora [dB]	Ambiente / condizione	Valutazione soggettiva media
200	140	Decollo aereo militare (30 m)	Non tollerabile
63	130	Rivettatura pneumatica (per l'operatore)	Non tollerabile
20	120	Sala macchine nave (piena velocità)	Non tollerabile
6.3	110	Pressa automatica (per l'operatore)	Molto rumoroso
2	100	Sala stampa	Molto rumoroso
$6,3 \cdot 10^{-1}$	90	Perforatrice automatica (cantiere)	Molto rumoroso
$2 \cdot 10^{-1}$	80	Marciapiede (traffico intenso)	Rumoroso
$6,3 \cdot 10^{-2}$	60	Ristorante	Rumoroso
$6,3 \cdot 10^{-3}$	50	Ufficio pubblico	Tranquillo
$2 \cdot 10^{-3}$	40	Conversazione (bisbiglio, 2 m)	Tranquillo
$6,3 \cdot 10^{-4} - 6,3 \cdot 10^{-5}$	10-30	Rumore di fondo in studi di registrazione	Molto tranquillo
$2 \cdot 10^{-5}$	0	Soglia di udibilità di un suono puro a 1000 Hz	

1.1. Importanza dello studio del rumore marino

L'acqua è un mezzo molto comodo per la propagazione del suono che viaggia al suo interno circa quattro volte più velocemente rispetto all'aria grazie al minor assorbimento. Di conseguenza, molti animali marini, soprattutto i mammiferi, si sono evoluti adattandosi alle caratteristiche del rumore ambientale naturale (Richardson *et al.*, 1995). Essi hanno adottato frequenze, strutture di segnali e schemi di comunicazione adatti a sfruttare il suono come mezzo primario di comunicazione, navigazione, ricerca di cibo e molto altro. Tuttavia, a partire dalla rivoluzione industriale, l'uomo ha prodotto fonti sonore subacquee che eccedono ampiamente i livelli del rumore ambientale e che possono interferire con queste funzioni (WODA Technical Guidance, 2013).

È possibile seguire una valutazione schematica del rischio (Tabella 2) (Boyd *et al.*, 2008).

I vocaboli “rumore” e “suono” non sono sempre chiaramente distinguibili. In genere, “suono” è considerato un termine molto ampio, mentre “rumore” denota la porzione dei suoni che non sono desiderabili. Tuttavia, non è sempre possibile sapere cosa gli animali percepiscano come “non voluto”, quindi sarebbe necessario specificare il contesto di volta in volta (WODA Technical Guidance, 2013).

1.2. Difficoltà e limiti

Il problema è multidisciplinare ed estremamente complesso; inoltre, ci sono ampie lacune nella conoscenza scientifica ancora da colmare. L’omogeneizzazione delle misure è un argomento

Tabella 2 - Caratterizzazione del rischio (tabella modificata da World Organisation of Dredging Associations, 2013).



Tabella 3 - Principali argomenti con le relative pubblicazioni (tabella modificata da Williams *et al.*, 2015). I termini utilizzati dagli autori per la ricerca bibliografica sono in inglese, quindi, per non falsare lo studio, vengono mantenuti nella lingua originale anche in questa tabella.

Termine per la ricerca	Argomento	N. pubblicazioni	Note
Airgun / seismic surveys noise	Airgun/ seismic surveys noise	60	Geophysical research, oil, gas explorations
Marine anthropogenic noise impact	Marine anthropogenic noise impact	61	Biological, ecological impacts of anthropogenic sources
Marine/ocean noise underwater noise	Marine /ocean / underwater noise	392	Ocean noise studies: natural and anthropogenic sources
Pile driving noise	Pile driving noise	52	Pile driving noise from construction
Shipping noise	Shipping noise	50	Noise from large ships
Sonar anthropogenic noise	Sonar anthropogenic noise	30	Noise generated from military, fish-finding
Wind farm	Wind farm noise	21	Noise associated with constructions and windfarms
Combined	Combined	576	Total number of scientific papers (no duplications)

da affrontare e, per il momento, non ci sono in Italia procedure universalmente riconosciute da seguire per la valutazione dell'inquinamento acustico marino (André *et al.*, 2009). C'è urgente bisogno di procedure di mitigazione non invasive che devono essere sviluppate ed implementate prima possibile (André e Nachtigall, 2007).

La Tabella 3 raggruppa i principali argomenti e le principali pubblicazioni sul rumore marino (Williams *et al.*, 2015).

1.3. Metriche per l'acustica sottomarina

I suoni possono essere suddivisi in tre categorie a seconda delle loro caratteristiche (Tabella 4): 1) a impulsi singoli, 2) a impulsi multipli e 3) a non impulsi (continui).

Tabella 4 - Tipi di suono e caratteristiche acustiche (tabella modificata da Southall *et al.*, 2007)

Tipo di suono	Caratteristiche acustiche (alla fonte)	Esempi
Impulso singolo	Evento acustico singolo; >3dB differenza tra il livello ricevuto usando un impulso ed un tempo costante equivalente continuo	Esplosione singola, palificazione...
Impulso multiplo	Eventi acustici multipli discreti entro 24h; >3dB differenza tra il livello ricevuto usando impulso e un tempo costante equivalente	Esplosioni in serie, sequenziali...
Non impulso (continui)	Eventi acustici multipli discreti entro 24h; <3dB differenza tra il livello ricevuto usando impulso e un tempo costante equivalente	Perforazioni, costruzioni, passaggio di imbarcazioni...

Il termine “impulso” è usato per descrivere transitori brevi, a banda larga ed atonali, che sono caratterizzati da rapidi tempi di insorgenza fino ad arrivare alla pressione massima. Successivamente, avviene una diminuzione che può includere anche pressioni oscillanti tra massimi e minimi (Southall *et al.*, 2007). Le metriche più opportune sono: *Sound Exposure Level* (SEL) per entrambi gli impulsi singoli e cumulativi (per una serie di impulsi), *peak sound pressure level*, *peak-to-peak sound pressure level* (Appendice A).

I “non impulsi” (intermittenti o continui) possono essere tonali, a banda larga o avere entrambe le caratteristiche. Come risultato della propagazione e della riverberazione, i suoni che possono essere considerati impulsivi alla fonte, possono perdere questa caratteristica ad una certa distanza (variabile) e possono essere definiti come “non impulsivi” da alcuni ricevitori (Greene e Richardson, 1988).

I suoni continui, invece, sono quelli in cui l'energia acustica è sparsa su un intervallo di tempo prolungato, tipicamente molti secondi, ma l'ampiezza non arriva a zero per tempi significativi. La metrica più adatta è il *Sound Pressure Level* (SPL) e la procedura standard è quella di misurare la pressione sonora come la radice della media dei quadrati del segnale (*Root Mean Square -RMS*) (Southall *et al.*, 2007).

Le misure quantitative dei suoni in ambiente sottomarino, ed in particolare, di quelli transitori, sono resi problematici da inconsistenze e mancanza di informazioni adeguate per riprodurre e confrontare misurazioni, e c'è necessità di chiarezza e standardizzazione (National Research Council, 2003).

2. Fonti naturali ed antropogeniche del rumore in ambiente sottomarino

2.1. Fonti naturali

Il rumore, proveniente da una varietà di fonti naturali ed antropogeniche, può essere prodotto in maniera intenzionale o involontaria, a seconda che esso venga utilizzato per uno scopo preciso o generato come sottoprodotto di alcune attività (National Research Council, 2003). Una stima accurata delle proprietà di una singola fonte, per molti tipi di rumore naturale, è, spesso, impossibile: ciò è dovuto alla mancanza di informazioni riguardanti i luoghi di provenienza, la distribuzione e la possibile sovrapposizione di suoni diversi (National Research Council, 2003).

2.1.1. Fonti intenzionali

2.1.1.1. Fonti biologiche (discontinue)

2.1.1.1.1. Suoni emessi dalla comunicazione non vocale

La comunicazione non vocale nei cetacei può includere: schiocchi di mandibola, digrignamento di denti, emissione di bolle, rumore prodotto da pinne caudali (*tail slapping*) o pettorali battute sulla superficie dell'acqua. Questi movimenti, assieme agli energici colpi dati alla superficie dell'acqua con il mento (*chin slapping*) ed ai salti fuori dall'acqua (*breaches, leaps*), producono suoni, sottomarini ed aerei, a bassa frequenza, che possono propagarsi per parecchi chilometri. Le esatte motivazioni che portano a questi comportamenti non sono chiare: si pensa che essi possano servire a segnalare problematiche - frustrazione, irritazione, necessità di liberarsi dai parassiti, desiderio di mantenere lo spazio individuale - inviti al gioco ed alla socializzazione, o avvertimenti riguardanti la presenza di cibo (National Research Council, 2003). Data la complessità di questi atteggiamenti, è necessario indagare maggiormente per chiarire e capire i contesti nei quali essi avvengono.

I lagenorinchi scuri (*Lagenorhynchus obscurus*), ad esempio, sono ben conosciuti per i tre tipi di salti che effettuano fuori dall'acqua in associazione a differenti stadi di foraggiamento: *head-first re-entry leap, noisy leap, e social/acrobatic leap*. Gli ultimi due creano suoni che fungono da segnale per gli altri individui, mentre i *noisy leap* possono agire come barriera acustica per disorientare le prede e tenerle in formazione serrata.

L'utilizzo delle pinne pettorali per produrre suoni è osservata in modo predominante nelle megattere (*Megaptera novaeangliae*), sebbene anche altri misticeti ed alcuni delfinidi esibiscano questo comportamento.

Il soffio, o i suoni, associati alla respirazione in superficie sono piuttosto distintivi nei misticeti e negli odontoceti.

I Pinnipedi, invece, non usano la comunicazione non vocale tanto quanto i cetacei: esibiscono meno *hind-flippers* o *fore-flipper slaps* o *breaches*. Tuttavia, ad esempio, le foche comuni (*Phoca vitulina*) e le foche dei Baikal (*Phoca siberica*) si colpiscono il corpo con le pinne anteriori, se disturbate. Inoltre, "schiaffeggiare" la superficie dell'acqua con la pinna caudale è tipico dei lamantini (*Trichechus manatus*). L'esempio più comune di comunicazione non vocale nei pinnipedi è il *teeth chattering*, comportamento che fornisce sia un segnale acustico che un segnale visivo aggressivo, assieme alla produzione di un forte sbuffo o sibilo al momento dell'espirazione, specialmente dopo tempi prolungati di immersione. Questi suoni potrebbero costituire una forma di comunicazione non vocale perché sono più intensi in alcune situazioni, soprattutto quando si avvicina un intruso.

Riedman e Estes (1990) descrissero i comportamenti delle lontre di mare (*Enhydra lutris*) e la loro produzione di suoni in superficie (*splashing* e *porpoising*) ed uno specifico suono “tap, tap, tap” prodotto rompendo i crostacei con una pietra sul petto. Non è chiaro, tuttavia, se questi comportamenti siano deliberati.

Si sa poco anche riguardo la comunicazione non vocale negli orsi polari (*Ursus maritimus*). Tuttavia, essendo essi predatori d’apice, potrebbero essersi adattati a minimizzare i suoni non vocali in modo da non spaventare le prede.

I pesci ossei (Osteichthyes) (Helfman *et al.*, 1997), alcune mobule (Marshall e Bennett, 2010), numerose specie di squali (Martin *et al.*, 2005) - tra cui lo squalo tissitore (*Carcharhinus brevipinna*), lo squalo orlato (*C. limbatus*), lo squalo volpe (*Alopias vulpinus*), lo squalo elefante (*Cetorhinus maximus*) ed il grande squalo bianco (*Carcharodon carcharias*) - producono comunicazione non acustica sotto forma di *breaching*. Si pensa che il *breaching* sia dovuto alle condizioni ambientali e sia connesso alla presenza di prede in alcuni particolari zone.

Nonostante gli studi, le motivazioni che causano questi comportamenti sono poco comprese a causa delle caratteristiche degli ambienti poco facili da raggiungere e delle relative difficoltà nell’osservarli (Hammerschlag *et al.*, 2006).

I grandi squali bianchi sono endotermi (Tricas e McCosker, 1984) e presentano temperature dello stomaco che superano quelle esterne anche di 14.3° C (Goldman, 1997). Le correlazioni tra l’attività di questi animali con la temperatura sono generalmente scarse, sebbene Pyle *et al.* (1996) abbiano osservato un aumento nella frequenza giornaliera del comportamento di *breaching* e *surfacing* con la temperatura superficiale dei mari alle Farallon Islands in California (Ferreira e Ferreira, 1996).

2.1.1.1.2. Sommario di modalità di produzione del suono

Usi attivi del suono:

- comunicazione sonora tra conspecifici,
- relazioni territoriali e sociali,
- ecolocalizzazione,
- stordimento e cattura della preda,
- *calls* di allarme,
- nuoto su grandi distanze,
- uso del suono per la difesa contro i predatori.

Metodi di produzione del suono:

- sbattimento dei denti o sfregamento delle ossa,
- oscillazioni del corpo e della vescica grazie a muscoli specifici,
- distribuzione dei fluidi nel corpo attraverso organi che producono il suono.

La comunicazione viene definita da Bradbury e Vehrencamp (1998) come: “*communication involves the provision of information (via a signal) by a sender to a receiver, and subsequent use of this information by the receiver in deciding how or whether to respond.*” Per capire la comunicazione in una data specie, è importante considerare la modalità del segnale (visivo, acustico, tattile, olfattivo, uditivo), il mezzo nel quale il suono è trasmesso (aria o acqua), il meccanismo di produzione del segnale (anatomico o fisiologico), la funzione del segnale (aggressione/sottomissione, cura della prole, difesa del territorio, foraggiamento) e la modalità (Tyack, 1998).

2.1.1.1.3. I mammiferi marini e la comunicazione acustica

Questo capitolo fa riferimento ai lavori scientifici: Schusterman, 1981; Watkins e Wartzok, 1985; Au, 1993; Wartzok e Ketten, 1999.

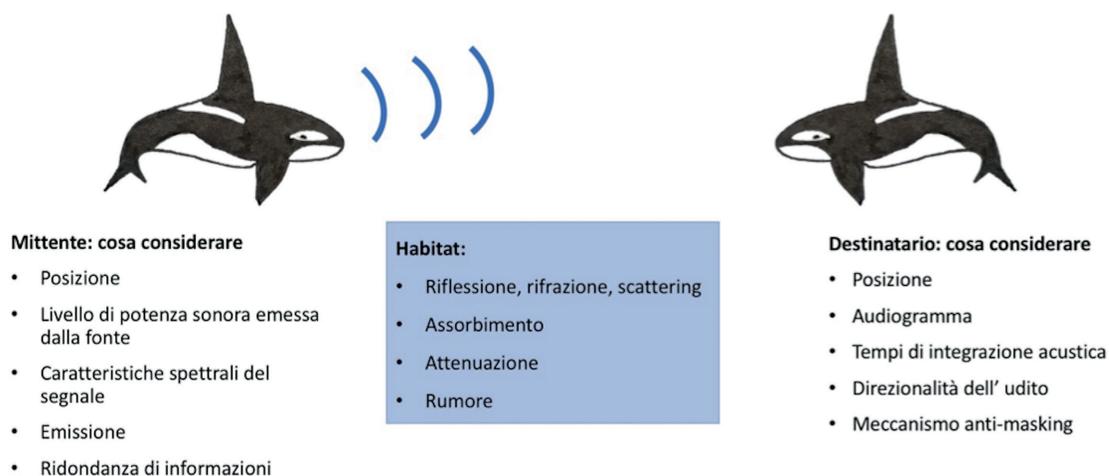


Fig. 2 - Caratteristiche fondamentali della comunicazione acustica [modificata da Erbe *et al.* (2016); disegno di Alice Affatati].

Uno schema sui fondamentali della comunicazione acustica è rappresentato in Fig. 2.

Mentre la maggior parte dei mammiferi terrestri ha sviluppato la propria capacità di usare i segnali visivi (Hauser, 1997), quelli marini non hanno potuto farlo, soprattutto a causa delle limitazioni e delle tipicità dell'ambiente in cui vivono. Nell'ecosistema marino la vista è usata come senso predominante solo nelle brevi distanze a causa della torbidità o del buio delle profondità. Invece, grazie alla facilità con cui il suono viaggia nell'acqua e la vasta area entro la quale esso può essere trasmesso, i segnali acustici sottomarini si sono evoluti fino a diventare il modo principale della trasmissione di informazione per gli animali marini (Miksis-Olds *et al.*, 2007; Southall *et al.*, 2007).

I mammiferi marini fanno affidamento sul suono per tutti gli aspetti fondamentali ecologici e biologici, inclusa la navigazione, la percezione dell'ambiente, la fuga dai predatori, e la comunicazione (Richardson *et al.*, 1995; National Research Council, 2003). Soprattutto lo studio del comportamento relativo alla comunicazione è essenziale per capire il ruolo che l'invio dei segnali acustici gioca nel regolare le interazioni sociali di queste specie. Le interferenze con queste funzioni comunicative sono considerate particolarmente nocive (Southall *et al.*, 2007) e c'è necessità di ulteriori studi in questo campo.

La scarsità di progetti di ricerca su questi argomenti riguarda, soprattutto: orsi polari, lontre marine, dugonghi (*Dugong dugon*) e lamantini (*Trichechus spp.*). La maggior parte della ricerca riguardante i metodi di comunicazione è stata condotta sui pinnipedi (foche di Weddell, *Leptonychotes weddellii*), sulle otarie della California (*Zalophus californianus*) e sui cetacei [soprattutto su tursiopi (*Tursiops spp.*)], sulle orche (*Orcinus orca*), sui capodogli (*Physeter macrocephalus*) e sulle megattere (*Megaptera novaeangliae*). In anni recenti, molte ricerche sono state effettuate sugli zifidi ed, in particolare, sullo zifio (*Ziphius cavirostris*) risultato molto sensibile ai sonar navali con numerosi spiaggiamenti di massa documentati (Frantzis, 1998; Podestà *et al.*, 2006).

2.1.1.1.4. Comunicazione vocale e comportamento animale

Sebbene il suono generato da molti mammiferi marini non venga originato nelle corde vocali, il termine “vocalizzazione” viene usato in modo generico per tutti i suoni prodotti.

Una caratterizzazione del comportamento animale relativo alla vocalizzazione ed alla sua distribuzione nel tempo e nello spazio potrebbe essere utile per fornire un riferimento su cui basare studi futuri: eventuali deviazioni sarebbero indicative di sintomi di stress causati dall’impatto antropogenico (Richardson *et al.*, 1995; Wartzok e Ketten, 1999).

Tutti i tetrapodi ereditano tre componenti dagli antenati (Fitch, 2006):

- 1) un sistema respiratorio con i polmoni;
- 2) una laringe con sistema di chiusura veloce che protegge i polmoni e produce il suono;
- 3) un tratto vocale sopralaringeo che filtra il suono prima di emetterlo nell’ambiente.

La maggior parte dei mammiferi, degli anfibi e dei rettili ha continuato ad usare questo sistema per la vocalizzazione, mentre uccelli e cetacei hanno sviluppato un meccanismo nuovo (Titze, 1994).

Le vocalizzazioni dei mammiferi terrestri sono prodotte dalle azioni della laringe, un insieme di tessuti localizzati nella gola; essa contiene le corde vocali che vibrano quando l’aria passa dai polmoni nella cavità orale. La forma e la tensione delle corde vocali possono cambiare per produrre suoni differenti che, a loro volta, possono essere modificati dalle variazioni della forma della cavità orale, che dipende dal movimento delle labbra e dei denti.

In Fig. 3 sono rappresentate le vocalizzazioni dei mammiferi marini per il peso medio di un animale adulto (National Research Council, 2003).

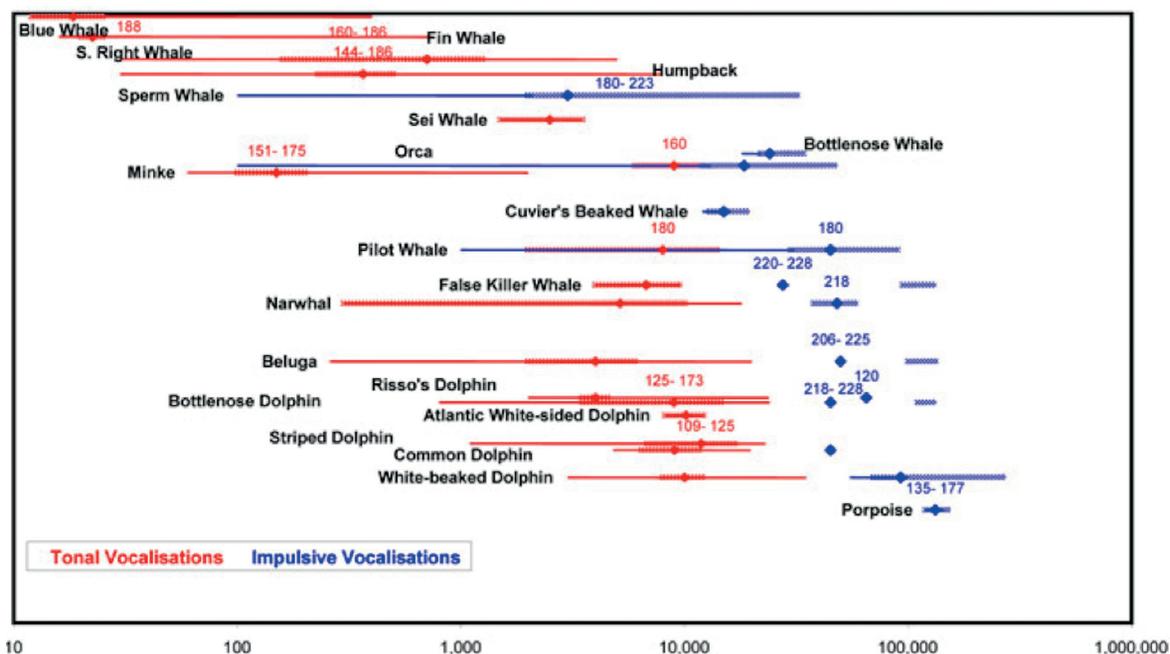


Fig. 3 - Vocalizzazioni dei mammiferi marini per peso medio di un animale adulto (National Research Council, 2003). Le linee in grassetto indicano le frequenze vicine all’energia massima e quelle sottili indicano il *range* totale delle frequenze nelle vocalizzazioni. I numeri sopra la linea indicano i livelli di sorgente misurati in dB re μ Pa a 1 m (modificata dal National Research Council, 2003).

2.1.1.1.5. Odontoceti

Tra i mammiferi marini, l'ecolocalizzazione è stata dimostrata negli odontoceti (Richardson *et al.*, 1995). Essa è il processo nel quale un animale riesce a valutare l'ambiente circostante emettendo dei suoni ad elevata frequenza ed ascoltando l'eco prodotto dalle onde sonore riflesse dai vari oggetti presenti. Viene utilizzata regolarmente da questi animali per foraggiarsi, per la navigazione e per evitare i predatori. Questo adattamento è stato continuamente affinato a causa delle pressioni evolutive. Spesso, gli odontoceti sono alla ricerca di organismi con dimensioni minori rispetto alle loro e devono, quindi, avere la capacità di distinguerli (Au, 2018).

I suoni impiegati nell'ecolocalizzazione consistono in brevi emissioni acustiche simili a dei *clicks* acuti ripetuti (Fig. 4). La frequenza dei suoni viene modulata attraverso il melone: un organo di tessuto adiposo che si trova nella parte anteriore del cranio e che svolge la funzione di lente acustica (Richardson *et al.*, 2013). I segnali sono emessi in un fascio che è diretto anteriormente e lievemente verso l'alto rispetto all'asse longitudinale dell'animale. Il riflesso viene recepito dalla mandibola. I dettagli dei sistemi di ecolocalizzazione variano tra le diverse famiglie tassonomiche (Au, 2018). Se consideriamo i delfini come esempio per questo fenomeno, l'ampiezza del fascio trasmesso a 3 dB può variare da 10°-16°.

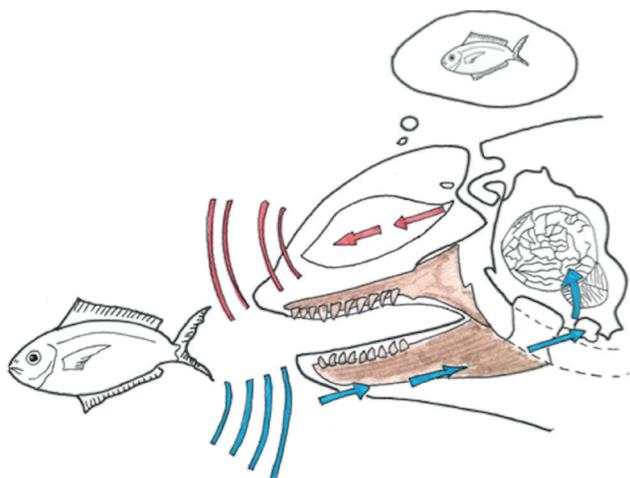


Fig. 4 - Meccanismo di ecolocalizzazione utilizzato negli odontoceti ed elementi del teschio (disegno di Alice Affatati).

La maggior parte delle informazioni che abbiamo riguardo i segnali di ecolocalizzazione usati dalle differenti specie di delfini deriva dalla ricerca svolta su animali in cattività.

Gli odontoceti producono *clicks* a banda larga con energie di picco a frequenze tra 1 e 200 kHz. È possibile suddividerli sommariamente in due gruppi acustici:

- tipo 1: con picchi di frequenze sopra i 100 kHz emessi da animali che vivono in sistemi acusticamente complessi (*Phocoena phocoena*), *Inia (Inia geoffrensis)*, ecc.;
- tipo 2: con picchi di frequenze al di sotto degli 80 kHz emessi da specie che comunicano di frequente con i conspecifici e che vivono in ambienti acustici a bassa densità (Au, 1993). Si va dalla sotalia (*Sotalia fluviatilis*), a specie costiere (*Tursiops truncatus*), fino alle specie *offshore* (*Stenella frontalis*).

Nei capodogli (*Physeter macrocephalus*), i *clicks* si chiamano *codas* e sono sequenze stereotipate di 3–30 kHz a banda larga che, in genere, durano meno di 3 s in totale (Watkins e Schevill,

1977; Rendell e Whitehead, 2003). Essi hanno raggi d'azione che coprono decine di chilometri, ma arrivano a distanze anche maggiori in ambienti silenziosi. Anche in questo caso possono essere considerate trasmissioni culturali, in quanto sono diverse tra le popolazioni e sono considerati *marker* territoriali. Il *pattern* tipico del Mediterraneo è 3+1 (Pavan *et al.*, 2000).

Le frequenze di picco variano molto tra le specie: dai 16,9 kHz nelle orche (*Orcinus orca*) (Reyes Reyes *et al.*, 2017) ai 100 kHz nei cefalorinchi di Commerson (*Cephalorhynchus commersonii*) (Popper e Fay, 1993). Diverse popolazioni di orche usano segnali acustici differenti e 'dialetti' tra i diversi gruppi della stessa popolazione. La struttura generale della vocalizzazione è spesso trasmessa da generazione in generazione. Nel loro caso, si parla anche di un tipo di trasmissione di cultura (Deecke *et al.*, 2000; Herzing, 2004; Blomqvist *et al.*, 2005).

La definizione di *whistle* è controversa perché nessuno studio mostra che questi suoni sono prodotti in modo uguale dalle diverse specie (Janik e Sayigh, 2013). Possiamo considerarli suoni tonali puri a banda stretta con modulazioni di frequenza, a volte con armoniche (Morisaka e Connor, 2007). Negli anni '80 e '90, Tyack (1986) e colleghi avanzarono l'ipotesi che i delfini producessero suoni distintivi o *signature whistles* per riferirsi a specifici membri del gruppo o a se stessi.

2.1.1.1.6. Mysticeti

I misticeti, invece, usano solo la laringe per la produzione del suono (Fig. 5). All'interno della laringe c'è un crinale di tessuto spesso e a forma di "U". Questi animali contraggono i muscoli nella gola e nel petto, causando un flusso di aria attraverso i polmoni ed il sacco laringeo che può propagarsi attraverso le pieghe ventrali della gola e nelle acque circostanti. Le variazioni nella forma del sacco laringeo possono alterare la frequenza e l'ampiezza dei suoni prodotti (National Research Council, 2003).

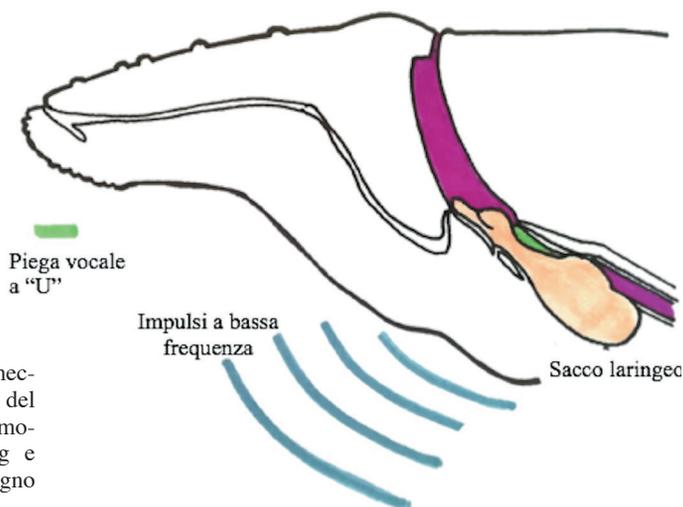


Fig. 5 - Disegno del meccanismo di produzione del suono nei misticeti [modificata da Reidenberg e Laitman (2007); disegno di Alice Affatati].

I suoni prodotti da queste balene includono *calls* per richieste di aggregazione, saluti, minacce di aggressione ed identificazione individuale; tuttavia, solo raramente, uno specifico suono è stato associato con un dato evento comportamentale.

La produzione acustica può essere suddivisa in quattro categorie base (National Research Council, 2003):

- a. *low-frequency moans* durano da 1 a 30 s, con frequenze dominanti tra 20 e 200 Hz. Questi suoni possono essere toni puri, come quelli prodotti dalla balenottera comune (*Balaenoptera physalus*) e dalla balenottera azzurra (*Balaenoptera musculus*), lunghi 1s e con una frequenza di 20 Hz, o toni più complessi con una forte struttura armonica. Quando hanno basse frequenze ed elevate lunghezze d'onda sono ideali per la comunicazione a lungo raggio (National Research Council, 2003);
- b. *short thumps* o *knocks* minori di 200 Hz, durano meno di un secondo, e sono prodotti da balene franche (*Eubalaena* spp.), balene della Groenlandia (*Balaena mysticetus*), balene grigie (*Eschrichtius robustus*), balenottere comuni, e balenottere rostrate (*Balaenoptera acutorostrata*). Clark (1983) registrò e studiò i suoni della balena franca australe (*Eubalaena australis*) e trovò che i vocalizzi prodotti da questa specie erano emessi in relazione al contesto sociale ed all'attività svolta. Animali in gruppi sociali producono una maggior quantità e varietà di suoni compresi *pulsive calls*, schiaffi con le pinne alla superficie dell'acqua e forti soffi;
- c. *chirps* e *whistles* tendono ad avere frequenze di 1 kHz, ma cambiano frequenza rapidamente e durano meno di 0.1 s. Questi suoni sono prodotti dalla maggior parte dei mysticeti;
- d. *songs*: i maschi di alcune specie producono quelle che sono considerate le vere “canzoni” perché usano elementi ripetuti in frasi e frasi ripetute in temi (Fig. 6). Le canzoni sono molto lunghe (fino a 30 minuti), variano tra le diverse zone di riproduzione e cambiano di anno in anno. Questi suoni vengono usati per comunicare la disponibilità all'accoppiamento e per la localizzazione degli altri individui (Marine Mammal Acoustics Sound Production, NOAA 3070).

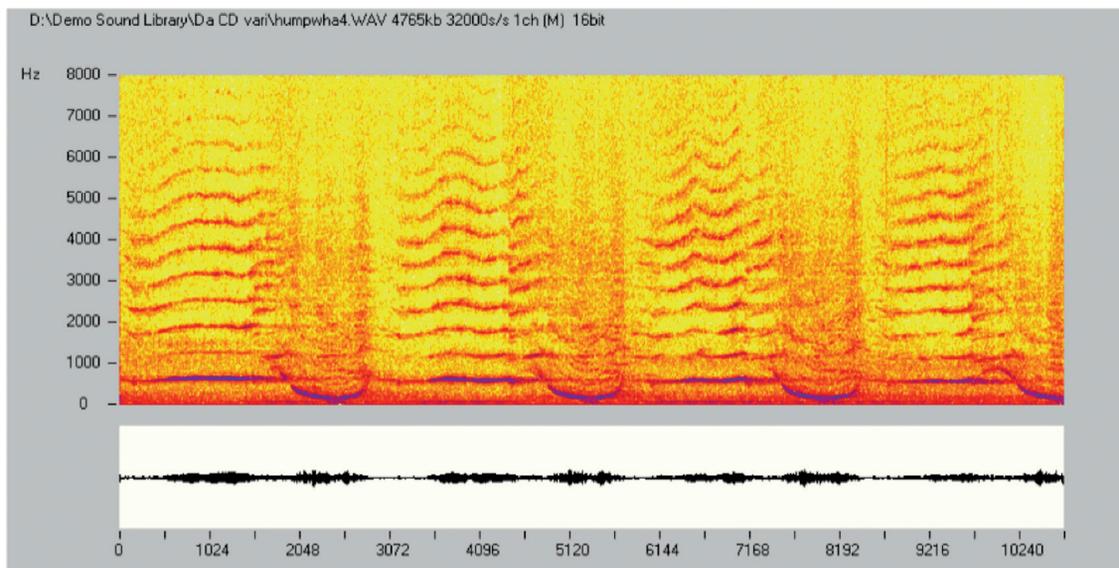


Fig. 6 - Spettrogramma di canzone – ‘song’ – di megattera (immagine tratta da CIBRA - Centro Interdisciplinare di Bioacustica e Ricerche Ambientali, <http://www-3.unipv.it/cibra>).

2.1.1.1.7. Pinnipedi

Se non consideriamo le vocalizzazioni delle balene, che possono essere rilevate per centinaia di chilometri, i contributi dei mammiferi marini all'ambiente sonoro oceanico sono localizzate nello spazio. Le vocalizzazioni hanno variazioni diurne e stagionali (Thompson e Friedl, 1982).

I pinnipedi passano tempo sia a terra che in acqua, perciò producono una diversità di suoni (da 100 Hz a varie decine di kHz) (Schusterman *et al.*, 2001). I richiami e le *calls* di allarme sono strutturalmente simili tra i sessi e tra le specie e sono usati soprattutto in interazioni sociali. I maschi emettono *calls* individualmente riconoscibili (impulsi a banda larga e ripetitivi con insorgenza rapida) che producono in un contesto di scambi aggressivi.

Ad esclusione dei maschi dei trichechi (*Odobenus rosmarus*), i pinnipedi non producono *whistles*. Recenti studi indicano che i maschi di tricheco hanno caratteristiche sonore proprie. Sott'acqua, infatti, emettono un suono peculiare simile ad una campana, oltre a *clicks* e *whistles*.

Le *calls* sono comunemente comprese tra 100 Hz e 15 kHz, con *peak spectra* <5 kHz. Tipici livelli sonori in acqua sono vicini ai 130 dB re 1 μ Pa (Richardson *et al.*, 1995).

I pinnipedi polari comunicano molto di più sott'acqua rispetto a quelli che vivono nelle zone temperate o tropicali, tuttavia, a causa del rischio di predazione da parte degli orsi polari, i pinnipedi artici sono praticamente silenziosi sulla terraferma, a differenza di quelli antartici. Confrontando la dimensione del repertorio vocale di tre specie di focidi antartiche, Stirling e Thomas (2003) trovarono differenze distintive.

La foca di Weddell, ad esempio, si riunisce in colonie che comprendono fino a 100 madri con i cuccioli mentre i maschi stabiliscono i propri territori sott'acqua al di sotto del ghiaccio marino. Queste foche hanno alcuni tra i repertori più elaborati (Terhune *et al.*, 2001): 34 tipi di suoni prodotti sott'acqua - tra cui *trills*, *chugs*, *chirps*, *guttural glugs* e *knocks* (Schusterman, 1981; Wartzok *et al.*, 1984). Esse producono dei *clicks*, ma non è stato dimostrato il loro utilizzo nell'ecolocalizzazione; questa capacità sembra essere più probabile nei pinnipedi polari che vivono nelle acque ricoperte di ghiaccio e totalmente al buio durante gli inverni (Thomas *et al.*, 2004).

Le foche leopardo (*Hydrurga leptonyx*), invece, producono un numero di vocalizzazioni sottomarine dipendente dalla regione, usate per stabilire territori sottomarini nella banchisa e attrarre le femmine. I livelli sonori dei segnali ultrasonici utilizzati, forse i suoni più probabili in relazione all'ecolocalizzazione, sono stati descritti a "bassa ampiezza" (Schusterman, 1981; Wartzok *et al.*, 1984; Richardson *et al.*, 1995). Alcuni di questi suoni, per esempio, *sweeps* di lunga durata sarebbero anche contaminati da riverberi di fondo soprattutto sotto il ghiaccio, rendendo difficile la rilevazione di piccoli oggetti o prede.

Le femmine di leone marino (*Zalophus*) lasciano che i loro cuccioli si procaccino il cibo da soli e si uniscono a loro dopo essersi scambiati vocalizzazioni a lungo raggio (Schusterman *et al.*, 2001). *Calls* che attraggono le femmine verso i loro cuccioli, e viceversa, sono diverse tra loro, ma sono caratterizzate da esordi bruschi e sono modulate in frequenza e in ampiezza. Come i leoni marini, anche le foche che si riproducono sulla terra in colonie affollate producono più vocalizzi in aria. Questi tipi di suoni utilizzati dalle otarie vanno da 1 a 4 kHz, con armoniche fino a 6 kHz. *Bark* in acqua hanno spettri di picco poco più elevati rispetto a quelli in aria, sebbene entrambi siano centrati vicino a 1,5 kHz. Schusterman *et al.* (1972), nel loro studio riguardante le femmine di leoni marini californiani (*Zalophus californianus*) trovarono importanti variazioni nella struttura delle *signature call* tra gli individui e mostrarono che le *calls* hanno caratteristiche consistenti con i picchi di sensibilità uditive in aria. I suoni degli odobenidi sono generalmente

nel campo sonoro basso (500 Hz; picco <2 kHz), e sono comunemente descritti come suoni simili alle campane, sebbene siano riportati anche *whistles* (Verboom e Kastelein, 1995). Come si vede in Fig. 7, molti di essi sono pulsanti e ripetitivi, quindi ricordano superficialmente i *click trains* dei delfini, mentre alcuni, come quelli delle foche leopardo, sono ultrasonici e devono produrre informazioni dettagliate riguardo piccoli obiettivi (Schusterman *et al.*, 2000).

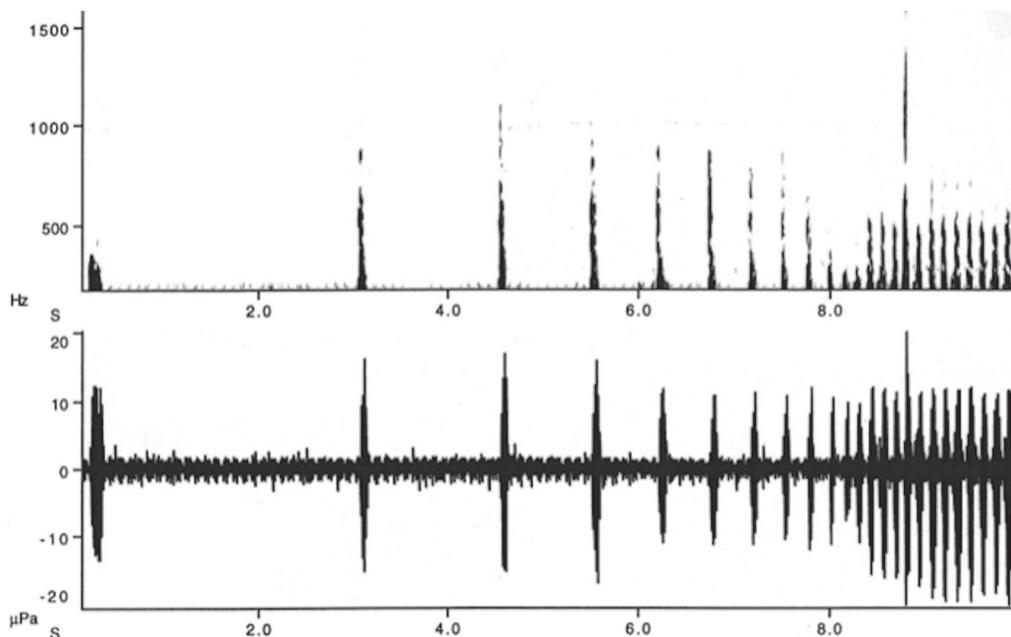


Fig. 7 - Spettrogramma ed oscillogramma delle vocalizzazioni della foca di Weddell mentre si avvicina ad un buco nel ghiaccio. L'idrofono è stato montato sulla schiena dell'animale (Schusterman *et al.*, 2000).

Ci sono pochi studi relativi alle vocalizzazioni sottomarine delle foche grigie (*Halichoerus grypus*) (Asselin *et al.*, 1993). Vengono identificati: *guttural rup*, *guttural rupe*, *growl*, *knock*, *click*, *roar* e *trrot*, soprattutto per quanto riguarda il repertorio in aria.

Undici tipi di *trill* sono usati esclusivamente dai maschi per avvisi territoriali e per la difesa (ad esempio, i segnali contro gli intrusi sono lunghi e forti trilli). Il repertorio utilizzato ai lati opposti dell'Antartide (Palmer Peninsula e Davis Station) mostra variazioni in base alla posizione geografica, includendo alcuni usi peculiari delle call *mirror-image*, cioè un *upsweep* seguito da un'immagine speculare, *downsweep*.

La scarsità di informazioni identifica le foche grigie come specie silenziosa, eccetto nel periodo di accoppiamento, quando le interazioni sociali sono molto comuni (Schneider, 1974).

2.1.1.1.8. Sirenidi

I suoni dei sirenidi sono a bassa ampiezza e si propagano solo su distanze corte. Dalle osservazioni sul campo delle coppie di lamantini madre-figlio, sembra che le vocalizzazioni giochino un ruolo chiave nel loro rapporto e nel rituale di accoppiamento (Reynolds e Odell, 1991).

I dugonghi sono altamente sociali, si ritrovano in gruppi che comprendono fino a parecchie centinaia di animali. Alcuni ricercatori descrivono i loro scambi vocali come *dueting* (Reynolds e Odell, 1991). I suoni dei lamantini vengono descritti come *chirps*, *whistles*, *squeals*, *barks*, *trills*, *squeaks* e *call frog-like*. Quelli prodotti dai lamantini dell'Oceano Indiano occidentale (*Trichechus manatus* spp.) hanno un *range* che va da 0,6 a 5 kHz, mentre i lamantini dell'Amazzonia (*Trichechus inunguis*) producono suoni che raggiungono i 10 kHz, con *calls* che preannunciano allarme e che hanno strutture armoniche fino a 35 kHz (Schevill e Watkins, 1965). Le vocalizzazioni prodotte da questi animali sembrano essere stereotipate, con poca variabilità tra gli individui e le sottospecie (Nowacek *et al.*, 2003).

2.1.1.1.9. Orsi polari (*Ursus maritimus*)

Gli orsi polari producono suoni in aria ed in acqua (Derocher *et al.*, 2010). Essendo il loro habitat largamente inaccessibile, si è scoperto relativamente poco riguardo il comportamento di questa specie con l'eccezione di pochi studi osservazionali (Latour, 1981).

Tra i mammiferi, i carnivori vocalizzano più spesso e hanno un *range* più vasto di suoni rispetto ad altri gruppi (Peters e Wozencraft, 1989). Ci sono poche pubblicazioni (tra cui Wemmer *et al.*, 1976; Elowson, 1989) che si occupano in modo tecnico dei tipi di vocalizzazioni specifiche di 7 specie di ursidi (Peters e Wozencraft, 1989).

Gli orsi polari, infatti, hanno una varietà di suoni usati in diversi contesti. I *growls* servono come allarme per i conspecifici e come difesa delle fonti di cibo. *Hissing*, *snorting*, *loud roars*, e *groans o grunts* sono suoni aggressivi. *Chuffing* viene documentato come risposta allo stress, mentre le madri degli orsi polari producono lievi *chuffs* o *growls* quando sgridano i cuccioli (Ovsyanikov, 1996).

Per evitare confusione con altri tipi di vocalizzazioni (Peters *et al.*, 2007) è stato introdotto il termine *humming*, che evita ampiamente la confusione con gli altri tipi di vocalizzazioni dei carnivori terrestri e non implica altre connotazioni funzionali. L'*humming* è un tipo di vocalizzazione sinapomorfa: si tratta di una rapida sequenza di suoni corti e singoli con lunghe esalazioni interrotte da fasi inalatorie molto brevi senza suoni.

2.1.1.1.10. Lontra di mare (*Enhydra lutris*)

Le descrizioni dei suoni emessi dalle lontre di mare sono simili a quelle dei pinnipedi e dei carnivori terrestri e cioè *growls*, *whines*, *snarls*, e *chuckles* (Kenyon, 1981).

Sebbene le lontre di mare seguano dei *pattern* acustici più corrispondenti alle specie terrestri, le differenze possono darci delle indicazioni riguardo l'evoluzione della vita nel mare. Per la lontra marina, le interazioni sociali e la cura dei cuccioli avvengono in superficie; tuttavia, poco si sa rispetto al loro comportamento vocale in queste situazioni e non ci sono dati riguardo il comportamento vocale sottomarino. Uno studio di McShane *et al.* (1995) indica che questi animali usano una varietà di segnali che probabilmente aumentano l'abilità di condividere informazioni altamente variabili e dettagliate tra individui noti. Inoltre, le caratteristiche strutturali delle *calls* potrebbero facilmente permettere il riconoscimento individuale. La zona intertidale dove questi animali vivono è un ambiente rumoroso che non potrebbe essere adatto agli scambi di suoni e che ne renderebbe difficile la registrazione. Inoltre, le lontre di mare si nutrono individualmente e si crede non abbiano necessità di comunicare in questo ambito. Tuttavia, quest'ipotesi non è stata provata.

2.1.1.1.11. Uccelli marini

Vivere in gruppo fornisce molti benefici, compresa la riduzione del rischio da predazione, l'aumento dell'efficienza di foraggiamento e la tolleranza agli ambienti difficili (Evans *et al.*, 2015; Clode *et al.*, 2000). Gli individui usano diversi repertori. Le *calls* possono permettere agli uccelli di scambiare le informazioni e di coordinare i movimenti del gruppo (Marler, 2004). Marler (2004) divide questi suoni in quattro categorie funzionali:

- 1) *calls* coinvolte nel mantenimento dell'unità del gruppo,
- 2) *calls* coinvolte nella condivisione del cibo,
- 3) *calls* coinvolte nelle interazioni che dimostrano ostilità,
- 4) *calls* di allarme.

Variazioni comportamentali concomitanti con una *call* possono fornire informazioni sulla comprensione della funzione del comportamento di gruppo (Radford e Ridley, 2006; Hollén *et al.*, 2008).

I pinguini possono costituire un buon modello per studiare i comportamenti vocali perché vivono in colonie e sono fortemente dipendenti dalla necessità di comunicazione. I repertori vocali sono usati in vari contesti tra cui il riconoscimento tra i genitori e la prole – ad esempio per quanto riguarda i pinguini reali (*Aptenodytes patagonicus*), i pigoscelidi di Adelia (*Pygoscelis adeliae*) e i pinguini Papua (*Pygoscelis papua*) - e la difesa del territorio per i Pinguini del Capo (*Pheniscus demersus*).

Nelle colonie di uccelli marini, la difficoltà che i partner sperimentano nel trovarsi è estrema: i loro nidi sono fitti ed i loro luoghi di foraggiamento sono distanti (Aubin *et al.*, 2000). Conoscere la topografia del luogo è utile a questi animali: il nido è usato come luogo d'incontro anche quando i pulcini iniziano a muoversi (Jouventin, 1982). Il genere *Aptenodytes* è unico negli uccelli marini: comprende due grandi specie che non nidificano, ma che portano l'uovo sui loro piedi. Il pinguino reale (*Aptenodytes patagonicus*) si riproduce sulle spiagge delle isole sub-antartiche e centinaia di pulcini devono identificare il verso dei loro genitori in mezzo al rumore di fondo della colonia [problema descritto negli umani come “*the cocktail party effect*” da Cherry (1966) ed identificato nei pinguini imperatori dagli studi di Aubin e Jouventin (1998) e Lengagne *et al.* 2000)]. Unico animale che si riproduce durante i rigidi inverni antartici, il pinguino imperatore (*Aptenodytes forsteri*) non ha un habitat fisso, ma cammina sul ghiaccio marino assieme a molte altre migliaia di esemplari che trasportano le loro uova o i loro giovani pulcini (Prevost, 1961). Non essendo capace di riconoscere indizi topografici e identificare i propri partner in modo visivo, questo uccello dovrebbe essere il modello acustico migliore per studiare il riconoscimento individuale. La *display call* consiste di una serie di sillabe con una struttura spettrale complessa altamente stereotipata ed altamente variabile tra gli individui: il *pattern* temporale di sillabe e silenzi permette il riconoscimento di uno specifico individuo (Jouventin, 1982). Si può paragonare ad un codice a barre contenente l'identità, se la struttura sillabica non è degradata (Bremond *et al.*, 1990).

Agonistic calls sono presentate con comportamenti aggressivi, ed i *moans* sono prodotti dai pulcini per indurre i genitori a rigurgitare il cibo. Gli uccelli producono *offshore calls* nell'oceano aperto durante i viaggi intrapresi per il foraggiamento. Al contrario dei mammiferi, la maggior parte degli uccelli riesce a produrre due voci simultaneamente: la loro siringe, che è un organo a due parti, ha un insieme di muscoli e membrane coinvolte nella fonazione ed è controllato separatamente dai rami tracheo-siringeali alla destra ed alla sinistra dal nervo ipoglosso. L'evidenza del fenomeno delle due voci è anatomica (Gaunt *et al.*, 1982; Goller e Larsen 1997), fisiologica (Nowicki e Capranica, 1986; Suthers, 1990) ed acustica (Aubin, 1986).

2.1.1.1.12. Rettili

Alcune rane producono *calls* e comunicano acusticamente sott'acqua. I pipidi emettono segnali tipo *click* che ricordano quelli di numerose specie di pesci (Ladich e Bas, 2003). Questi segnali sono prodotti da una laringe modificata: pare che i pesci e le rane abbiano evoluto meccanismi simili per la produzione del suono e la sua rilevazione in risposta alle limitazioni fisiche del loro ambiente.

Si pensa che tutte le tartarughe siano silenziose e sorde (Ferrara *et al.*, 2012) e che tutti i suoni siano solo rumori prodotti durante l'allestimento del nido (Cook e Forrest, 2005). Tuttavia, 47 specie di tartarughe sono state studiate mentre emettono suoni in contesti differenti e molti ricercatori hanno dimostrato che i segnali acustici giocano un ruolo importante nel comportamento sociale di questi rettili e nella loro riproduzione (Giles *et al.*, 2009; Ferrara *et al.*, 2012). Alcune tartarughe marine producono suoni mentre nidificano. Inoltre, si ipotizzano segnali provenienti da uova o alcune forme di comunicazione acustica tra gli embrioni (Spencer e Janzen, 2011). Inoltre, questi animali hanno dimostrato l'abilità di percepire suoni sottomarini a bassa frequenza (Bartol *et al.*, 1999; Christensen-Dalsgaard *et al.*, 2012).

Le seguenti ipotesi sono state formulate da Ferrara *et al.* (2012) per spiegare le motivazioni che spingono gli embrioni delle tartarughe a produrre suoni:

- 1) per sincronizzare la cova e spostare i piccoli fuori dal nido;
- 2) per diluire il rischio di predazione durante la cova;
- 3) per sollecitare gli adulti ad accompagnare le femmine durante la migrazione.

Cook e Forrest (2005) descrivono 3 tipi di suoni che vengono prodotti dalla nidificazione della *Dermochelys coriacea*: 2 di questi vengono considerati legati alla respirazione e l'altro è un *grunt*. Morton (1977) suggerisce che le tartarughe liuto siano capaci di interazioni sociali molto complesse. Il repertorio di suoni degli embrioni può essere prodotto nelle uova come risultato della frizione delle parti del corpo (stridulazione), vibrazione di una parte del corpo in contatto con una camera risonante all'interno dell'uovo (percussione), o rilascio delle bolle di gas. I suoni registrati dai nidi hanno valori di frequenza più bassi, come osservato nelle *Podocnemis expansa* (Ferrara *et al.*, 2012) e nei crocodylli; si suggerisce che i gusci delle uova funzionino come un filtro amplificando le frequenze più basse ed attenuando quelle più alte (Vergne *et al.*, 2009). I suoni ad alta frequenza possono essersi evoluti come strategia per evitare il rilevamento da parte di potenziali predatori. Si osserva che gli embrioni nelle uova di *D. coriacea* hanno una densità più elevata nella struttura del suono rispetto a quando le uova sono nel nido; ciò avviene in maniera opposta nella *P. expansa* (Ferrara *et al.*, 2012). Negli individui di *P. expansa* la maggior diversità nei tipi di suono - bande di frequenze armoniche e non armoniche e suoni ibridi (Giles *et al.*, 2009; Ferrara *et al.*, 2014) - e nella struttura acustica potrebbe essere in relazione ad una maggiore necessità di scambio di informazioni ed una maggiore complessità di informazioni scambiate all'interno del nido tra i piccoli (Ferrara *et al.*, 2012).

Il rilevamento dei suoni dalle uova di *D. coriacea* dopo 51 giorni di incubazione a temperature naturali mostra che gli embrioni comunicano quando sono vicini al completo sviluppo.

2.1.1.1.13. Pesci

Esistono oggi ben più di 25.000 specie di pesci, molte di più di tutte le altre specie di vertebrati. Si conosce in modo non completo il comportamento acustico di circa 100 specie (Stocker, 2002).

I suoni sono usati in una varietà di contesti comportamentali, inclusi: riproduzione e comportamenti legati alla difesa del territorio ed alle interazioni con conspecifici (Zelick *et al.*, 1999). Dati in letteratura dimostrano che i pesci non rispondono solo alla presenza o all'assenza del suono, ma alle sue variazioni nel tempo o ad una specifica componente della frequenza. In questo modo, questi animali possono distinguere tra suoni rilevanti e irrilevanti dal punto di vista comportamentale (Winn, 1964). C'è anche evidenza che almeno una specie di pescegatto (*Arius felis*) usi una forma di ecolocalizzazione per identificare gli oggetti nell'ambiente producendo suoni a bassa frequenza e percependo il loro riflesso (Zelick *et al.*, 1999).

Gli elasmobranchi non sono noti per produrre suoni, sebbene rispondano ai suoni delle potenziali prede (Myrberg *et al.*, 1972) e localizzino oggetti usando il suono in distanze maggiori di 1 km (Myrberg *et al.*, 1976).

Il contributo totale al rumore oceanico dei suoni prodotti dai pesci non è stato quantificato: il grado con il quale questi suoni sono presenti varia da un ecosistema ad un altro e su scale temporali giornaliere e stagionali (Tavolga, 1964). I maggiori contributi provengono da quelle specie che partecipano ai comportamenti corali. È noto che i cori di pesci possano aumentare i livelli di rumore ambientale in certi luoghi ed in certi orari.

Sulla base del metodo di produzione del suono e della complessità degli organi di produzione, questi animali possono essere classificati come *sound specialists* e *sound generalists*. Tuttavia, questa divisione è poco utilizzata. Più recentemente è stato considerato che il rumore ambientale possa servire come fonte di 'illuminazione acustica': gli oggetti e le caratteristiche dell'ambiente producono ombre e riflessi che i pesci possono percepire ed usare per capire cosa stia succedendo attorno a loro.

In ambienti con strutture complesse, le oscillazioni acustiche a bassa frequenza sono caratterizzate da una ristretta zona di distribuzione, ed il *background* acustico è estremamente complesso a causa di numerose riflessioni del suono prodotte da oggetti sottomarini (Kasumyan, 2003).

Le condizioni utili alla comunicazione acustica sono molto più favorevoli nell'oceano aperto. Nonostante ciò, i pesci con capacità vocali si trovano raramente in acque aperte: la massima attività acustica avviene durante le migrazioni o in acque basse (p. es. Batrachoididae e Sciaenidae). Questa contraddizione può essere spiegata da scarsa conoscenza della biologia dei pesci che vivono nelle profondità (p. es. Cichlidae, Centrarchidae, Gobiidae e Haemulidae). In molti di questi pesci, lo scarso sviluppo della sensibilità acustica è compensato dalla forza dei loro suoni o dalle ridotte distanze tra i partner che si scambiano segnali uditivi (Ladich e Popper, 2004).

I pesci hanno sviluppato diversi meccanismi per generare suoni (Ladich e Bas, 2003):

- meccanismo di stridulazione: produce impulsi sonori a banda larga emessi tramite lo sfregamento dei denti, ossa del teschio, apparato della mascella, apparato branchiale, *fin rays* e vertebre. Suoni specializzati sono prodotti dai rappresentanti di Siluriformes, Haemulidae, Centrarchidae, Cichlidae, Theraponida e altri taxa (Ladich e Bass, 2003). Suoni non specializzati di stridulazione sono generati da quasi tutti i pesci;
- suoni di stridulazione: sono segnali ad impulso non armonici con un ampio spettro di frequenze fino a 8–12 kHz (Ballantyne e Colgan, 1978) e durata estremamente variabile (Ladich e Yan, 1998). Questi suoni sono simili a *creaking*, *grinding*, *sizzling*, *shuffling*, *grunting*, *cawing*, *chirping*, *squeaking*, *croaking*, *strong blow*, ecc. La loro forza diminuisce durante la deflazione della vescica natatoria, ma le frequenze rimangono le stesse (Tavolga, 1962). Que-

- sti suoni possono essere specializzati o non specializzati; questi ultimi hanno diversi effetti in certe situazioni nei predatori sono associati con il foraggiamento (Moulton, 1958);
- denti: lo sfregamento dei denti può sembrare un suono prodotto durante il foraggiamento, la masticazione ed il movimento del cibo verso la faringe. Questi suoni non specializzati possono essere prodotti dalla maggioranza dei pesci, specialmente se la loro preda è molto grande e deve essere sminuzzata. Ritroviamo questo meccanismo nella famiglia Sparidae, ma anche nei Tetradontiformes, Balistidae e Monacanthidae (Burkenroad, 1931);
 - ossa del teschio: la produzione del suono come risultato dello sfregamento delle ossa del teschio l'uno contro l'altro avviene solo raramente. Questo meccanismo è stato trovato nei cavallucci marini (*Hippocampus*) (Bergert e Wainwright, 1997);
 - *fin rays*: i suoni di stridulazione prodotti dalle *fin ray* sono osservati spesso nei rappresentanti dell'ordine dei Siluriformi. Nella maggior parte dei casi, il primo raggio della pinna pettorale è usata per la produzione del suono. I suoni prodotti in questo caso possono essere associati a *grunting*, *cawing*, *croaking*, *strong blowing*, *chirping*, *cracking*, ecc., e le loro frequenze non superano i 1000 Hz;
 - *drumming mechanism*: è un complesso che include i muscoli sonici e la vescica natatoria. La velocità di contrazione e di rilassamento dei muscoli sonici con alte frequenze portano a rapidi cambiamenti del volume della vescica natatoria. I muscoli sonici sono rappresentati da una struttura localizzata in modo simmetrico in relazione all'asse lungo del corpo del pesce e della vescica natatoria. La loro origine è connessa con la modificazione dei muscoli occipitali, epiassiali, ipoassiali. Le specie con muscoli sonori intrinseci appartengono alla famiglia Batrachoididae, Triglidae, Dactylopteridae, Gadidae, Scorpaenidae, Zeidae, Macrouridae, ecc. (Onuki e Somiya, 2007). L'immobilizzazione dei muscoli sonici tramite anestesia locale porta a fermare la capacità di produzione di segnali uditivi.
 - La vescica natatoria: è una struttura multifunzionale, localizzata nella cavità addominale di molti pesci, che possiede una diretta relazione con la produzione del suono, regola il galleggiamento del pesce, il respiro, i ricettori uditivi (Zelick *et al.*, 1999; Hastings e Popper, 2005). La vescica è di densità differente dall'acqua di mare e rappresenta una discontinuità di impedenza che risponderrebbe all'energia acustica incidente. Si crede che se i pesci non avessero la vescica natatoria, i suoni passerebbero direttamente attraverso i loro corpi senza poter essere percepiti. Nei pesci elefanti (*Pollimyrus adspersus*) la sua proporzione è circa il 5% del volume del corpo, e la dimensione relativa di questo organo è simile nei maschi e nelle femmine nonostante ci siano differenze sostanziali tra i sessi ed il grado di sviluppo dei muscoli sonici. La vibrazione della vescica natatoria e della guaina pettorale avvengono tramite rapida contrazione dei muscoli e torcendo tendini delle pinne pettorali produce segnali tonali, spesso armonici a basse frequenze (<1 kHz). Il volume relativo della vescica resta lo stesso nel processo della crescita del pesce (Crawford e Huang, 1999), ma cambia a causa della contrazione dei muscoli sonici. Dopo il rilassamento, i muscoli sonici estrinseci raggiungono lo stato iniziale grazie all'elasticità delle pareti della vescica natatoria (Myrberg *et al.*, 1993);
 - *lateral trunk duct*: le oscillazioni acustiche che si originano come risultato delle vibrazioni delle pareti della vescica natatoria sono trasmesse nell'acqua attraverso il corpo del pesce. In molte specie di pesci, la riduzione delle perdite di energia emessa è raggiunta a causa della trasmissione delle oscillazioni lungo due dotte laterali con speciali proprietà acustiche. I dotte

rappresentano delle finestre sonore per il trasferimento facilitato delle oscillazioni acustiche nel mezzo esterno che circonda il pesce;

- *drumming sound*: questi suoni sono più connessi con fattori ambientali rispetto alle strutture o caratteristiche della vescica natatoria (Tavolga, 1962);
- *stringed mechanism*: questo raro meccanismo di produzione del suono è usuale per i pesci della famiglia Osphronemidae e per la generazione del suono delle specie del genere *Trichopsis* (*T. vittata*, *T. pumilla* e *T. schalleri*). I suoni dei gourami differiscono nella durata dell'intervallo tra gli impulsi e nell'ampiezza come nel numero delle serie e nella loro durata (Ladich *et al.*, 1992);
- meccanismo di cavitazione: suoni di cavitazione sono prodotti durante il foraggiamento del pesce e sono dovuti alla pressione negativa all'interno della bocca causata dalla cattura repentina della preda. Il rapido crollo della pressione può portare alla comparsa di piccole bolle per un tempo breve ed è accompagnato da un impulso sonoro (Lauder, 1985). I suoni prodotti in questo modo sono suoni non specializzati;
- meccanismo idrodinamico: i suoni idrodinamici appaiono durante il nuoto dei pesci. La loro origine è connessa al movimento dell'acqua contro la superficie esterna del pesce (Moulton, 1963; Demski *et al.*, 1973). Le caratteristiche di ampiezza e frequenza dei suoni idrodinamici dipendono dalla forma del corpo del pesce, dalla velocità e dalla traiettoria del suo movimento e da altre caratteristiche del nuoto. I suoni idrodinamici raggiungono un'elevata intensità durante le accelerazioni del nuoto ed i cambi improvvisi di direzione. Durante i cambiamenti sincroni di direzione o di velocità di molte decine o centinaia di individui, i suoni si sommano (Moulton, 1963). I banchi di pesce che nuotano rapidamente producono un suono simile a *howl*, *rumble*, o *rustle*. Questi suoni sono rappresentati soprattutto da oscillazioni non armoniche con frequenze minori di 100 Hz – prodotti dai grandi predatori - anche se possono venir registrati componenti di elevata frequenza (fino a 1–2 kHz) (Demski *et al.*, 1973). I suoni connessi con il nuoto sembrano essere dovuti al movimento del pesce nella colonna d'acqua e soprattutto alla pinna caudale che, muovendosi, provoca le ondulazioni del corpo. Basandoci su questa ipotesi, il modo di nuotare della maggior parte dei pelagici usa oscillazioni nel piano orizzontale; le oscillazioni di molti pesci nel piano verticale non sono accidentali, ma rappresentano un adattamento evolutivo che diminuisce il livello acustico e, quindi, diminuisce la dimensione del campo acustico;
- meccanismo pneumatico: i suoni pneumatici possono apparire durante la transizione del gas dalla vescica natatoria all'intestino o durante il rilascio di gas dal tratto digestivo al mezzo esterno. Questo modo di produzione del suono è rappresentativo dei gruppi Clupeidae, Anguillidae, Siluriformes e Cypriniformes;
- meccanismo di respirazione: i suoni che appaiono durante i movimenti dei piatti opercolari nel processo della respirazione dei pesci sono poco investigati. Questi suoni sono simili ai *clap e knock*. Nella maggior parte dei casi sono suoni non specializzati (Valinsky e Rigley, 1981);
- meccanismo di percussione: soprattutto i pesci che vivono sul fondale possono usare i suoni adatti alla comunicazione. Il repertorio del comportamento di molti di questi pesci include elementi che portano a suoni di percussione: *blow*, *slap upon the substratum* (Ladich, 1990).

2.1.1.1.13.1. Organi di suono nei pesci

Molte specie di pesci hanno sviluppato meccanismi che permettono loro di emettere suoni per la comunicazione sociale (Ladich e Fine, 2006). I suoni sono più frequentemente prodotti da un'azione di muscoli striati specializzati e a contrazione veloce. I muscoli sonici intrinseci si attaccano completamente alla parete della vescica natatoria come nei Batracoidi [*Opsanus* sp. (Fine *et al.*, 1990), *Porichthys notatus* (Bass e Marchaterre, 1989)] e nei Triglidi [*Prionotus* sp., *Bellator* sp. (Evans, 1973), *Eutrigla* sp. (Hawkins e Rasmussen, 1978; Connaughton, 2004)]. I muscoli sonici estrinseci hanno varie origini ed inserzioni (Demski *et al.*, 1973) tra cui la vescica natatoria. Essi sono presenti in diversi taxa, tra cui: Ophidiiformes (Howes, 1982), Holocentridae (Carlson e Bass, 2000) e Sciaenidae (Sprague, 2000).

I suoni della vescica natatoria (Fig. 8) hanno una frequenza fondamentale, che varia da 75 a 300 Hz, che corrisponde al *rate* di contrazione muscolare. I muscoli sonici sono tra i più veloci nei vertebrati (Connaughton *et al.*, 2000; Fine *et al.*, 2001). Quelli della vescica natatoria nell'*Opsanus tau* possono generare una frequenza massima fino a 10 volte superiore rispetto ai muscoli bianchi epiassiali (Young e Rome, 2001). Quelli più veloci nella contrazione si trovano nei *Cynoscion regalis* (Sciaenidae), *Prionotus scitulus* (Triglidae), *Arius felis* (Ariidae), *Bagre marinus* (Ariidae) e *Terapon jarbua* (Terapontidae) (Sprague, 2000). Questa caratteristica è dovuta in parte alla loro estrema rapidità di rilassamento (Rome e Lindstedt, 1998).

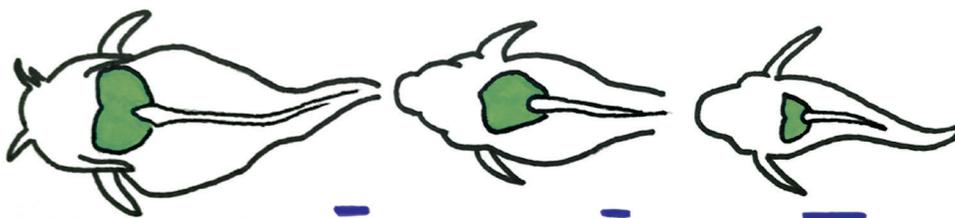


Fig. 8 - Esempi di muscoli collegati alla vescica natatoria; scala 1 cm. Vescica natatoria in verde. Da sinistra a destra: *Acanthodoras cataphractus*, *Agamyxis pectinifrons*, *Platydoras hancockii* [figura modificata da Boyle *et al.* (2015); disegno di Alice Affatati].

Nell'*Opsanus tau*, un *rate* di contrazione di 250 Hz genera un suono con una frequenza fondamentale di 250 Hz, e i movimenti lenti della vescica natatoria non emettono suoni (Fine *et al.*, 2001). I muscoli sonici di *Bagre marinus*, *Galeichthys felis*, *Prionotus scitulus*, *Prionotus carolinus*, *Epinephalus guttatus* e *Holocentrus* sp. hanno tetanizzazioni tra 150 e 400 Hz (Connaughton, 2004). Nelle trote di mare (*Salmo trutta*) che producono ogni pulsazione sonora con un singolo scatto muscolare, la frequenza del suono sembra in relazione al tempo del movimento della vescica forzato dal ciclo di contrazione-rilassamento del muscolo sonico.

Hoots e pops sono suoni che si possono sentire solo in interazioni aggressive. *Hoots* sono prodotti da *P. isidori*, *P. ballayi*, e *P. adspersus*, e consistono in suoni relativamente corti (circa 30 ms), con frequenze al di sotto di 1 kHz, composte da forme d'onda che sono quasi sinusoidali. *Pops* sono prodotti da entrambi le specie di *Pollimyrus* (Crawford *et al.*, 1997) e dal *Gnathone-mus petersii* e consistono di una serie di emissioni di impulsi con energie fondamentali fino a 2-3

kHz. L'intervallo tra i *pops* è di circa 65 ms in *P. isidori* (Crawford *et al.*, 1997). *Grunts*, *moans* e *growls* sono suoni che possono essere collegati al corteggiamento e sono prodotti soprattutto dai *Pollimyrus* spp. I *Growls* sono suoni a impulso a banda larga (100 Hz – 2 kHz), variabili in durata, con *rate* di ripetizione di impulsi tipici di 25 pps. Una sequenza tipica di suoni nel *P. adspersus* consiste di 10-15 s di *grunt-moan* seguita da 5 s, o più, di *growling* continuo (Crawford *et al.*, 1997). I *Grunts* sono suoni ad impulso a banda larga (fino a 3 kHz), che durano circa 300 ms, mentre i *moans* sono *bursts* con due armoniche principali.

Gadidae e altri Gadiformi. Il gruppo dei merluzzi contiene un gran numero di specie vocali che emettono suoni in contesti agonistici e di riproduzione (Fig. 9). Suoni agonistici sono stati descritti per il merluzzo (*Gadus morhua*), l'eglefino (*Melanogrammus aeglefinus*), il merlano (*Pollachius pollachius*), la motella (*Gaidropsarus mediterraneus*) ed i girini (*Raniceps raninus*). Il merlano e la motella emettono *grunts*, il merluzzo e l'eglefino producono *knocks* e *grunts*, e la motella fa suoni tipo *thump* in situazione di allarme (Hawkins e Rasmussen, 1978; Almada *et al.*, 1996; Amorim, 1996). Hawkins e Rasmussen (1978) ritengono che tutte le emissioni acustiche consistono di impulsi a bassa frequenza e possono essere descritti a seconda della loro struttura temporale e distinti tra le varie specie. Molti *grunts* emessi dall'eglefino durano meno di 75 ms e comprendono 3-4 impulsi mentre gli stessi suoni prodotti dal merluzzo hanno durata tipicamente più corta e consistono di circa 9 impulsi. Entrambi hanno simile velocità di ripetizione dell'impulso, più lenta rispetto a quella del merlano.

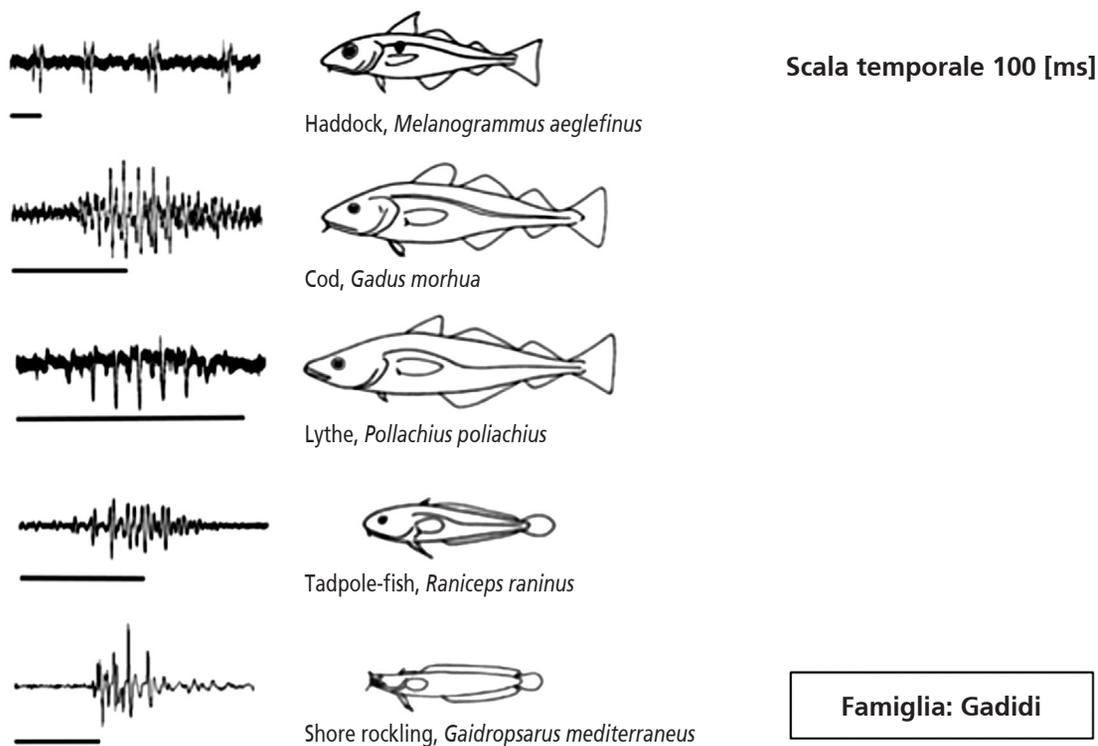


Fig. 9 - Suoni agonistici prodotti da differenti membri della famiglia (modificata da Amorim, 2006).

La motella emette suoni tipo *thump* mentre caccia con frequenze dominanti vicino a 200 Hz (Almada *et al.*, 1996). Serie di *knocks* sono emessi partendo da ripetizioni lente fino a molto veloci, finché i suoni sono percepiti come degli *hum*. L'*hum* è un suono molto distinto che può presentare forte modulazione di ampiezza e dura da 3 a 15 s (Hawkins e Rasmussen, 1978). Le vocalizzazioni di corteggiamento dell'eglefino possono essere classificate, a seconda della durata degli intervalli, in cinque categorie: *short slow knocks*, *short fast knocks*, *long slow knocks*, *long fast knocks* e *humming*.

Batracoidi. I maschi di batraco difendono i nidi nella stagione dell'accoppiamento ed emettono un lungo *boatwhistle* tonale di avvertimento che è usato anche nella competizione tra maschi (Gray e Winn, 1961; Fish, 1972). La produzione del suono è stata documentata, oltre che nel batraco (*Opsanus tau*) (Gray e Winn, 1961; Winn, 1964), nel batraco del Golfo del Messico (*O. beta*) (Tavolga, 1958; Thorson e Fine, 2002), nel pesce rospo (*Halobatrachus didactylus*) e nel *Porichthys notatus* (Ibara *et al.*, 1983). In tutte le specie, entrambi i generi producono *grunts* agonistici - suoni a banda larga composti da impulsi di breve durata - ma solo i maschi producono *boatwhistles* o *hums* tramite la veloce contrazione dei muscoli sonici intrinseci della vescica natatoria (Fine *et al.*, 2001).

Il *boatwhistle* di *Opsanus tau* e *O. beta* dura per centinaia di ms e consiste di una sola nota (Fine, 1978; Thorson e Fine, 2002). *Opsanus beta* emette un suono complesso di corteggiamento che inizia con dei *grunts* tipicamente singolo, ma variabile da zero a tre, seguiti da una lunga nota tonale - *boop* - e fino a tre *boops* più corti che durano fino ad un secondo (Thorson e Fine, 2002). I maschi del *Porichthys notatus* producono *grunts* corti (50-200 ms) ed a banda larga che sono emessi singolarmente o in lunghi treni a 1-2 Hz (Brantley e Bass, 1994). All'inizio della stagione di accoppiamento, quando vengono stabiliti i territori, questi pesci emettono anche *growls*, intermedi tra *hums* e *grunts*, di lunga durata e presentano molte armoniche con modulazioni di frequenza nel range fondamentale (Bass *et al.*, 1999). *Halobatrachus didactylus* emette un *boatwhistle* simile a *O. tau* e *grunts*, *croaks* e *double croaks*.

Triglidi. I triglidi producono forti suoni tamburellando i loro muscoli sonici sulle pareti della vescica natatoria, sia durante la stagione riproduttiva che in altri periodi (Amorim e Hawkins, 2000; Amorim *et al.*, 2004). I suoni di questa famiglia sono agonistici, soprattutto quelli associati con il foraggiamento. Connaughton (2004) descrive i richiami di allarme del *northern searobin* (*Prionotus carolinus*) e suggerisce la somiglianza tra questi suoni e quelli prodotti da questa specie durante i foraggiamenti in cattività (Fish, 1954). I suoni di stress emessi dal capone cocchio (*Aspitrigla cuculus*) dopo esser stato catturato dalla pesca a strascico (Amorim, 1996) sono confrontabili con quelli del cappone (*Eutrigla gurnardus*) registrati durante il foraggiamento (Amorim *et al.*, 2004).

Il numero di suoni diversi emessi dalla gallinella (*Eutrigla gurnardus*, *Chelidonichthys cuculus*, *Chelidonichthys lucerna*, *Trigloporus lastoviza*) varia tra le specie (Amorim, 1996; Amorim e Hawkins, 2000; Amorim *et al.*, 2004). I capponi emettono tre tipi di suono (*knocks*, *grunts* e *growls*) con valori tipici tra 10-12 ms (Fig. 10).

La frequenza dominante del suono nei triglidi dipende dalla dimensione del pesce ma ci sono anche variazioni tra le specie (Amorim, 2006). In generale, i suoni prodotti dai triglidi vanno da 40 Hz a 4 kHz, ma specie presenti in acque americane (*searobins*) e giapponesi sembrano produrre un range di frequenze molte ampie rispetto alle specie europee. Secondo Bass e Baker (1991), questo può essere parzialmente espresso dalle vibrazioni asincrone dei muscoli sonici.

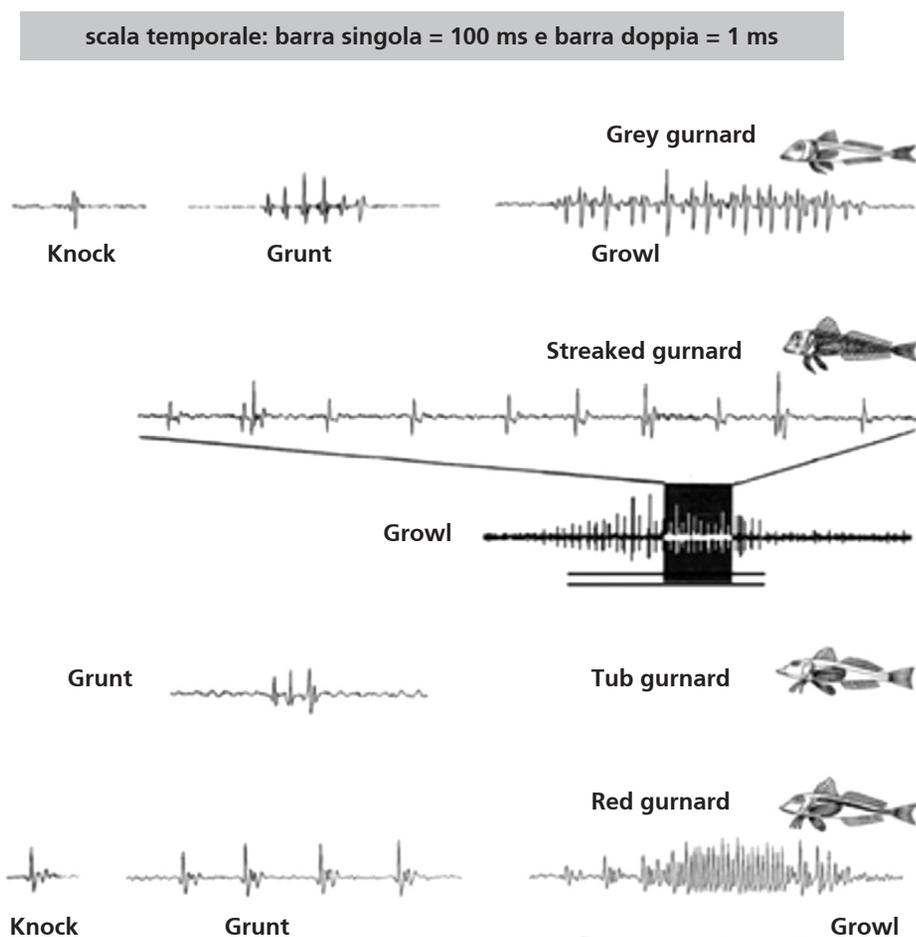


Fig. 10 - Suoni prodotti dai trigliidi classificati in *knock*, *grunt*, *growl*. Sono evidenti le differenze tra le specie rispetto al numero di impulsi, velocità di ripetizione e raggruppamenti (modificata da Amorim, 2006).

Cicliidi. Emettono frequentemente suoni durante il corteggiamento e durante le interazioni agonistiche, spesso associate con la difesa del territorio (Myrberg *et al.*, 1965). I suoni agonistici possono essere spesso prodotti da entrambi i generi e possono essere ampiamente classificati in 3 classi, probabilmente associate con i meccanismi di produzione. Una classe tipica è una serie di impulsi a bassa frequenza spesso chiamati *br-r-r* o *growls*; si ipotizza che questi possano essere prodotti dall'apparato faringeale e poi amplificati dalla vescica natatoria (Lobel, 2001). Le velocità degli impulsi variano da una media di 8 pps in *H. multispinosa* a circa 40 pps in *Hemichromis bimaculatus*, e la variazione della durata del suono da un range di 100 ms (*H. multispinosa*) a 4 s (*Cichlasoma centrarchus*). I suoni tipo *growl* o *br-r-r* sono gli unici suoni usati durante il corteggiamento nella famiglia dei pesci Cicliidi (Amorim *et al.*, 2004).

Pomacentridi. Le castagnole sono specie vocali che vivono nelle barriere coralline. *Pops*, *chirps* o *grunts* sono suoni ad impulsi a banda larga emessi durante gli inseguimenti e le dimostrazioni di allarme tra conspecifici (Amorim, 1996). *Amphiprion* spp. emettono soprattutto sequenze di *pops* durante comportamenti agonistici in sequenza di 1-15, che sono spesso accompagnati da movimenti della testa (Amorim, 1996). *Amphiprion clarkii* e *A. frenatus* emettono anche *chirps*

(1-17 impulsi con un periodo di 52-62 ms contro 1-7 impulsi con un periodo di 83 ms) (Chen e Mok, 1988). *Stegastes (Pomacentrus) partitus* emette *pops* singoli e *Dascyllus trimaculatus* emette *pops*, *chirps* e *grunts* durante gli incontri agonistici (Luh e Mok, 1986). I *pops* di quest'ultima specie sono impulsi singoli, mentre *chirps* e *grunts* consistono di 3-6 impulsi con periodi distinti 8-16 ms (*chirps*) e 100-200 ms (*grunts*).

Osphronemidae (Gouramis). I *Croaking gouramis* (genere *Trichopsis*) emettono *croaks* ad alta intensità generati dalle pinne pettorali e modificati durante gli incontri agonistici e il corteggiamento (Ladich *et al.*, 1992). Tra gli anabantoidi, solo i membri del genere *Trichopsis* vocalizzano regolarmente durante le interazioni agonistiche (Ladich e Yan, 1998). Vocalizzazioni nel genere consistono di *croaks*, ognuno di una serie di 2 fino a 30 doppi impulsi, (Ladich *et al.*, 1992). Ladich *et al.* (1992) fecero uno studio comparato delle *calls* agonistiche prodotte da tre specie di *Trichopsis* (*T. vittata*, *T. schalleri* e *T. pumila*): i *croaks* differiscono nei numeri di doppi impulsi, periodi di impulsi e livelli di pressione sonora (Ladich *et al.*, 1992).

Altre famiglie. I pescegatto emettono entrambi i suoni, tamburellando sulla vescica natatoria (*low pitch frequency modulated pulsed sounds*) e sfregando tra loro le pinne pettorali (*high frequency broadband pulsed sounds*). I suoni pettorali assenti nei pimelodidi, differiscono nella durata e nell'intensità tra i doradidi e la famiglia dei Mochokidae. Tre specie dei carapidi da due generi (*Carapus* e *Encheliophis*) emettono suoni che consistono di una serie di *knocks* e differiscono tra le specie per durata e raggruppamento (Parmentier *et al.*, 2003). Viene emesso un lungo suono (25-30 s) con ripetizione veloce ed altri suoni brevi (3-5 s) con lunghi *knocks*, mentre *Encheliophis* sp. emette *knock* singoli o sequenze di meno di 1 s in durata (Parmentier *et al.*, 2003).

2.1.1.1.14. Molluschi

Si pensa che questi animali siano troppo primitivi per avere un sistema di comunicazione significativo. Tuttavia, animali come i calamari, hanno dimostrato risposta al suono, anche se la ricerca in questo campo è scarsa. Si pensa che sentano per statocisti o per propriocezione, con tempo di reazione della risposta al suono molto diverso rispetto alla scala temporale umana. I ricercatori notano una risposta dovuta all'impatto di rumore istantaneo, aumento nella velocità di nuoto e presunti slittamenti nei *rate* metabolici (Stocker, 2002).

Le cozze (*Mytilus edulis*) producono suoni attraverso il bisso, che è usato per aderire alle superfici rigide. A temperature superiori ai 10° C possono essere prodotti rumori tipo *clicking* di cui non è verificata l'intenzionalità.

I ricci di mare tropicali (*Diadema setosum*), invece, producono suoni simili a piccoli scoppi (*sparking*) sfregando le spine durante i loro movimenti, ma anche durante la masticazione degli scarti tra la 'Lanterna di Aristotele' e l'esoscheletro.

2.1.1.1.15. Crostacei

Alcuni invertebrati acquatici comunicano con i conspecifici tramite vibrazioni (Staaterman *et al.*, 2011). C'è una chiara necessità, quindi, di esaminare l'importanza relativa della vibrazione del fondale e la trasmissione delle onde d'interfaccia in relazione al moto delle particelle all'interno dell'acqua (Budelmann, 1992; Mooney *et al.*, 2012).

I gamberi schioccatori - varietà di specie del genere *Alpheus* e *Synalpheus* - generano elevati livelli di rumore quando chiudono di scatto la loro chela frontale maggiore, creando un getto di acqua che esce dalla chela così velocemente da produrre cavitazione (UC Division of War Re-

search, 1946). Lo schiocco prodotto viene utilizzato per combattere e per difendersi (Versluis *et al.*, 2000). Questo suono appare solo come sottoprodotto; non c'è evidenza che venga usato per la comunicazione (Au, 1993). Gli spettri delle misurazioni acustiche sottomarine raccolte nella vicinanza delle colonie mostrano picchi nella banda 2-15 kHz (Cato, 1992; Cato e Bell, 1992).

Le aragoste strusciano tra loro le antenne per produrre suoni durante la riproduzione (600 e 2400 Hz). Le modalità sono simili nel granchio violinista (*Uca pugilator*), sebbene il meccanismo di generazione del suono provenga dalla chela; in questo caso, i suoni sono compresi tra 300 e 600 Hz.

2.1.2. Fonti involontarie

La Fig. 11 fornisce una panoramica del rumore ambientale nell'oceano.

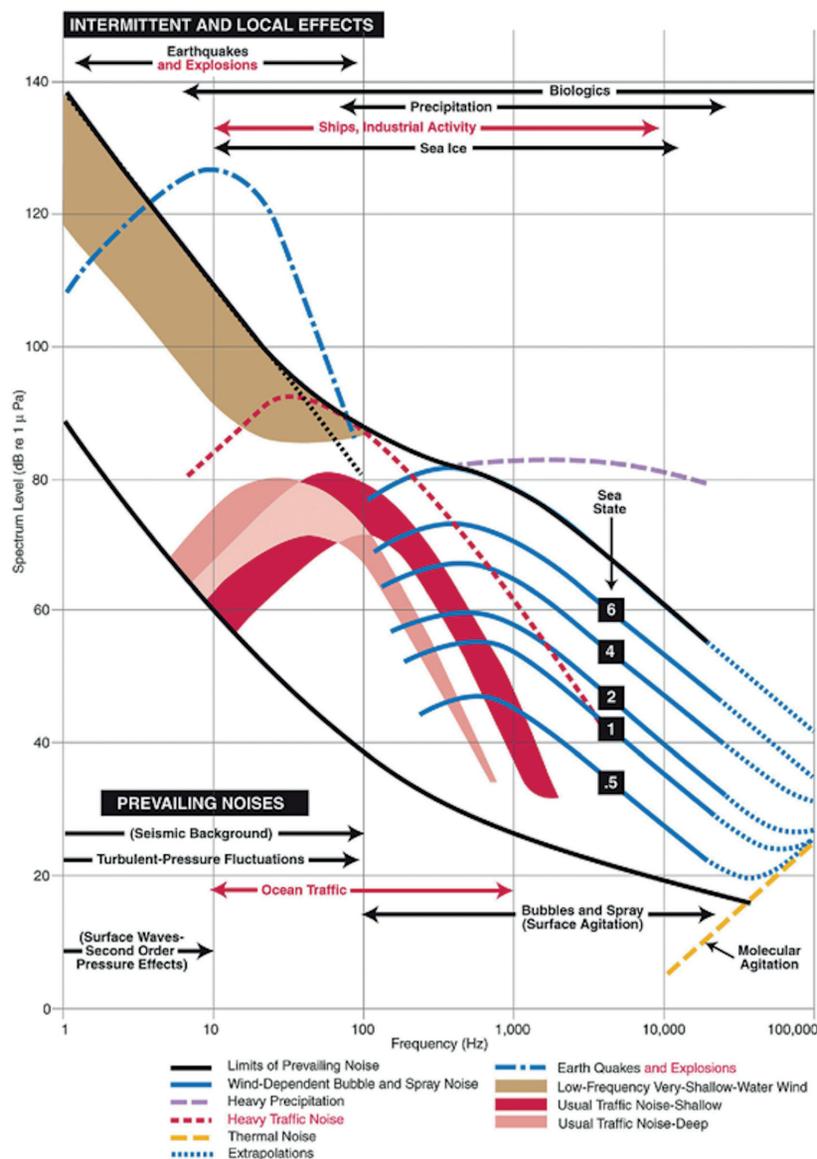


Fig. 11 - Curve di Wenz (Miksis-Olds e Bradley, 2013).

La porzione a bassa frequenza (1-10 Hz) comprende soprattutto fluttuazioni di pressione turbolenta prodotta da onde superficiali e dal moto dell'acqua, terremoti ed esplosioni. Questi fenomeni dipendono dalla forza del vento e dalle correnti, soprattutto nelle zone di acqua bassa. Tra 10 e 100 Hz inizia a dominare il rumore antropogenico, con il suo maggior contributo tra 20 Hz e 80 Hz. Il rumore in questo intervallo non è attribuibile ad una fonte specifica, ma ad un insieme di fonti distanti dal ricevitore: il traffico navale è il maggior contributo con livelli fino a 55 dB re 1 μ Pa per il traffico usuale e 65 dB re 1 μ Pa per il traffico pesante. Sopra i 100 Hz, il livello di rumore dipende dalle condizioni ambientali, con effetti sonori creati dal vento e dalle onde. Il livello del picco di questa banda è in relazione alla velocità del vento misurato usando la scala Beaufort (diminuisce la frequenza fino a circa 500 Hz, con una *slope* tra 5 e 6 dB per ottava), con valori da 20 dB re 1 μ Pa a 55 dB re 1 μ Pa. A frequenze superiori a 20 kHz, i livelli sonori misurati possono essere influenzati dal rumore termico. Questo aumenta da un livello di -10 dB re 1 μ Pa a 35 kHz con un grado di 6 dB per ottava.

Altri contributi sono: il ghiaccio marino, le fonti biologiche e le attività industriali marine.

2.1.2.1. Fonti biologiche (discontinue)

I suoni biologici sono molto vari e possono essere emessi in modo involontario da numerosi organismi. Suoni involontari comprendono, ad esempio, quelli prodotti dai banchi di pesci durante il nuoto o durante il rilascio di aria prodotto per aggiustare la galleggiabilità (Moulton, 1963).

Gli squali, ad esempio, non producono segnali acustici per la comunicazione, ma suoni accidentali associati al nuoto o al foraggiamento che possono allertare i pinnipedi (Schusterman *et al.*, 2000). Gli stessi rumori sono prodotti anche da altri animali marini e possono attrarre i predatori (National Research Council, 2003).

2.1.2.1.1. Rumore proveniente dalle barriere coralline

Le barriere coralline sono particolarmente rumorose a causa dell'elevata densità degli organismi che le popolano. Queste acque temperate ospitano comunità di diversi tipi di organismi, ed il *soundscape* in acque basse è influenzato dalla batimetria locale e dalle condizioni superficiali. Questi fattori si combinano per determinare la distanza sulla quale il rumore della barriera si propaga al di sopra dei livelli del rumore ambientale (Simpson *et al.*, 2004).

2.1.2.1.2. *Sardine run*

Il termine *sardine run* è parte dell'eredità culturale del Sud Africa [costa KwaZulu-Natal (KZN)]. Gli aspetti ecologici rimangono poco compresi. È spesso associato con il foraggiamento dei predatori d'apice, compresi gli uccelli marini, i mammiferi (O'Donoghue *et al.*, 2010) e gli squali (Dudley e Cliff, 2010). Tutte queste specie si avvicinano ai banchi di sardine per cibarsene, generando suoni prodotti dalla caccia e dal nuoto (Fréon *et al.*, 2010).

2.1.2.2. Fonti atmosferiche ed oceanografiche

Anche privato della vita che ospita, l'oceano non è un luogo silenzioso: l'ambiente acustico è altamente variabile. In un certo luogo, in un preciso momento, ci può essere la combinazione di un'ampia varietà di fonti. L'oceano è connesso alla terra ed all'atmosfera; infatti, molti processi fisici avvengono all'interfaccia di questi ambienti ed i suoni che si originano in uno di essi possono trasferirsi nel campo sonoro sottomarino. A causa della grande differenza tra la velocità del

suono in aria ed in acqua, i livelli acustici sottomarini sono altamente dipendenti dalla posizione dell'ascoltatore rispetto alla fonte atmosferica (Stocker, 2002).

2.1.2.2.1. Onde generate da vento, stato del mare, correnti e maree (fonti continue)

L'azione delle onde, il vento e la pioggia sulla superficie marina creano un rumore di fondo compreso tra 40 dB e 70 dB (Sound Pressure Level- SPL) re 1 μ Pa in acque profonde e fino a 90 dB in aree costiere poco profonde. Le fonti sonore in una particolare zona includono i suoni delle maree e delle correnti che interagiscono con le caratteristiche del fondale marino, i delta dei fiumi e gli estuari creano panorami sonori (*soundscape*) unici e specifici per quella regione geografica. In questo contesto, è possibile riconoscere fonti più periodiche, come i flussi delle maree, e fonti più costanti, come le correnti (Stocker, 2002).

I moti della superficie marina dovuti al vento e alle onde sono i meccanismi fisici dominanti del suono naturale nell'ambiente marino ed in quello oceanico. In assenza dei suoni antropogenici e biologici il rumore ambientale è dipendente dal vento su una banda di frequenza estremamente ampia da 1 Hz ad almeno 100 kHz. A frequenze inferiori ai 10 Hz, le interazioni delle onde di gravità superficiali sono il meccanismo dominante per la generazione del suono. Attraverso la parte restante della banda da 10 Hz a 100 kHz, le bolle oscillanti nella colonna d'acqua sono la fonte di rumore primaria. Alcuni lavori hanno suggerito che il rumore è correlato più facilmente alla velocità del vento rispetto allo stato del mare o all'altezza delle onde. Ciò permette previsioni più accurate perché, gli stati marini sono più difficilmente stimabili rispetto alle velocità del vento (Wilson *et al.*, 1985).

2.1.2.2.2. Precipitazioni (fonti discontinue)

I suoni che si originano nell'atmosfera possono passare nel campo sonoro sottomarino: essi sono variabili e transitori. Tuttavia, a causa della grande differenza tra la velocità del suono in aria ed in acqua, i livelli acustici sottomarini sono altamente dipendenti dalla posizione del ricevitore rispetto alla fonte atmosferica.

Anche le precipitazioni sulla superficie oceanica contribuiscono al rumore dell'oceano. L'alta frequenza del rumore dipende dalle caratteristiche associate a pioggia, bolle e spruzzi che possono aumentare i livelli del rumore ambientale naturale fino a 35 dB attraverso un *range* ampio di frequenze (200 Hz - 2 kHz). Per pioggerelle e venti deboli, un picco spettrale ampio di 10-20 dB al di sopra del rumore di fondo si nota vicino ai 15 kHz (Nystuen e Farmer, 1987).

Quando, durante le piogge, una goccia d'acqua colpisce la superficie marina, le fonti di rumore sottomarino sono:

- 1) impatto e passaggio del corpo (goccia d'acqua) attraverso la superficie d'acqua libera,
- 2) vibrazioni di risonanza del corpo, se esso ha rigidità,
- 3) pulsazione del volume delle bolle di aria nell'acqua (Minnaert, 1933).

Le interazioni onda-onda diventano rumore infrasonico (0.2-2 Hz) e microsismi del fondale oceanico.

Tuoni e lampi sono altri esempi di fonti di rumore proveniente dall'atmosfera. RegISTRAZIONI sottomarine dei tuoni da 5 a 10 km di distanza mostrano picchi di energia dai 50 e 250 Hz, superiori fino a 15 dB rispetto ai livelli di rumore ambientale con energie rilevabili da 10 Hz a 1 kHz (Dubrovsky e Kosterin, 1993).

2.1.2.2.3. Agitazione termica dell'acqua di mare, onde, acqua che si muove sopra le barriere coralline, distribuzioni di bolle (fonti continue)

Mellen (1952) mostra che per una serie di frequenze superiori ai 50 kHz il moto molecolare dell'acqua contribuisce ad aumentare il rumore termico (*thermal noise*).

Al di sotto dei 5-10 Hz, la fonte di rumore ambientale dominante è l'interazione nonlineare di onde superficiali oceaniche che si propagano in senso opposto (microsisimi). Nella parte rimanente di quella banda le fonti primarie sono bolle che oscillano, individualmente e collettivamente, nella colonna d'acqua (Deane, 1999). Comunque, in alcune bande di frequenza, come in quella da 10 a 200 Hz, dove il rumore ambientale nell'emisfero nord è tipicamente dominato dal rumore navale, i meccanismi della fonte dominante non sono stati identificati.

Un'onda, avanzando verso riva, diminuisce la sua velocità a causa dell'attrito con il fondale, che, però, aumenta la sua ripidità (altezza /lunghezza dell'onda). Si verifica un frangimento o rottura dell'onda con un avanzamento più rapido della cresta rispetto a quello del cavo dell'onda (Pranzini, 2004).

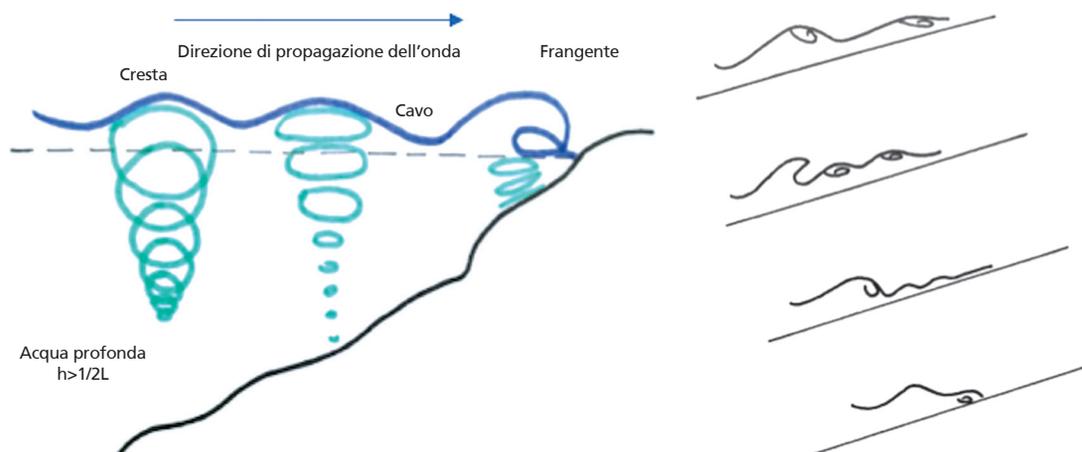


Fig. 12 - Schema del frangimento dell'onda. Disegno di destra, modalità di frangimento. Dall'alto verso il basso: *spilling*, *plunging*, *collapsing*, *surging*.

Il frangimento (Fig. 12) avviene attraverso quattro differenti modalità dell'onda (Pranzini, 2004):

- *spilling*: su spiagge a bassa pendenza, moderatamente ripide;
- *plunging*: su aree surf di media pendenza. La cresta si riversa in avanti con più violenza rispetto alla tipologia *spilling* e forma una cavità (tubo o *barrel*);
- *surging*: su spiagge con una forte pendenza. Le onde sono poco ripide e spesso non riescono a raggiungere il punto di rottura;
- *collapsing*: modalità di frangimento caratteristica di onde che dopo aver franto procedono gradualmente verso riva su di una spiaggia a pendenza medio elevata.

Il suono creato dagli *spilling breakers* ha frequenze più elevate, mentre quella dei *plunging breakers* è maggiore nei livelli e nella larghezza di banda della frequenza. Questi possono aumentare i livelli del rumore sottomarino di più di 20 dB per alcune centinaia di metri al di fuori della *surf zone* (banda da 10 Hz a 10 kHz) (Wilson *et al.*, 1985).

2.1.2.3. Fonti geofisiche

2.1.2.3.1. Ghiaccio (fonti continue)

Nelle regioni polari la dinamica delle banchise – fusione, propagazione di fratture, rottura, azione della marea sotto la copertura di ghiaccio – determina una cacofonia. Il rumore generato dipende dal tipo e dalle caratteristiche del ghiaccio, ad esempio *shore-fast pack ice*, *moving pack ice* (Milne, 1967). Il *shore-fast pack ice* isola la colonna d'acqua dagli effetti del vento e permette una diminuzione nel rumore ambientale di 10-20 dB. I suoni dovuti ai processi di rottura del ghiaccio (*ice cracking*) possono aumentare il livello del rumore ambientale fino a 30 dB.

La rottura della copertura del ghiaccio può generare impulsi a banda larga fino a 1 kHz della durata di un secondo o più.

La diminuzione della temperatura dell'aria può causare uno stress termico nel ghiaccio e risultare in un *cracking* tensivo del ghiaccio, per cui la variabilità diurna della temperatura dell'aria è sufficiente a cambiare i livelli sonori di 30 dB tra 300 e 500 Hz (Urick, 1984). Gli impulsi dei suoni emessi tipicamente durano pochi millisecondi e hanno un contenuto spettrale che varia da 100 Hz a 1 kHz. Alcuni suoni con ampiezza maggiore sono rilasciati dal ghiaccio particolarmente freddo e rigido sottoposto a sforzi di tipo meccanico.

L'interazione delle onde oceaniche con i bordi della banchisa creano livelli di rumore di 4-12 dB a causa della forma dei bordi, frastagliati (12 dB) o lisci (4 dB) (Diachok e Winokur, 1974). O'Neel *et al.* (2007) trova che la maggior parte dell'energia dei segnali in relazione al distacco dei ghiacci in Alaska è concentrata in una banda di frequenza stretta (1-3 Hz) (Bartholomaeus *et al.*, 2013). Non è stata riscontrata una relazione tra le dimensioni degli iceberg che si distaccano e l'ampiezza del segnale.

Si possono verificare tre specifiche modalità di distacco di masse di ghiaccio dalla piattaforma ghiacciata (*ice shelf*):

- 1) tipicamente subaeree,
- 2) sottomarine,
- 3) eventi subaerei con contatto tra la parete di ghiaccio ed i blocchi che si sono scissi.

Nella banda di frequenze più elevate (1-3 kHz), i livelli di pressione sonora restano costanti per gli eventi subaerei e sottomarini (Tegowski *et al.*, 2011; Pettit, 2012). Gli aumenti dell'intensità del suono sono più comuni quando il blocco che si stacca e scivola giù dalla scogliera. Nella modalità tipicamente subaerea osservata per l'Hans Glacier, ad esempio, le frequenze al di sotto di 0,1 kHz mostrano ampiezza minore che aumenta a livelli simili alla banda 0,1-0,5 kHz mentre il distacco prosegue.

Nella modalità di distacco sottomarino, i suoni a bassa frequenza (<0,1 kHz) sono più importanti rispetto ad altri eventi di distacco.

2.1.2.3.2. Terremoti (fonti discontinue)

L'energia sismica creata dai terremoti può generare onde acustiche nell'oceano e viaggiare per grandi distanze, contribuendo ad aumentare i livelli del campo acustico marino (Dubrovsky e Kosterin, 1993). L'energia sismica viene generata da tutti i tipi di processi tettonici che avvengono al di sotto degli oceani e dei mari e lungo i loro margini.

L'energia sismica, prodotta da terremoti sottomarini, che si propaga nell'oceano è detta terziaria (*T-phase*) in aggiunta alle fasi primarie (P) e secondarie (S). A distanza minore di 100 km, l'energia della fase T può avere frequenze maggiori dei 100 Hz, con energie di picco a 5-20 Hz.

Può essere di 30-40 dB al di sopra del rumore di fondo (Schreiner *et al.*, 1995). Il segnale di arrivo può avere un inizio improvviso e può durare da pochi secondi a pochi minuti. Movimenti di massa di sedimenti prodotti da correnti di torbidità e frane possono essere una fonte significativa di rumore ambientale a frequenze da 1 kHz a più di 200 kHz (Thorne, 1986).

2.1.2.3.3. Vulcani (fonti discontinue)

Le conoscenze sul rumore generato dall'attività dei vulcani sottomarini sono scarse, a causa della loro ubicazione remota.

Capla-Auerbach e Duennebier (2001) registrano un primo impulso seguito da un secondo segnale, 0,75 s dopo, e da un terzo impulso, 2 s dopo il primo. La parte iniziale del 'rombo' generalmente consiste di un rumore a bassa frequenza (<50 Hz), accompagnato o rimpiazzato da un fischio a banda larga. La porzione a bassa frequenza ha la sua ampiezza maggiore di circa 20-30 s. Questo 'sibilo' comprende un segnale che arriva fino a molti kHz e può durare da 1 a 30 minuti. L'arrivo del secondo è molto più disperso nel tempo e più basso in frequenza rispetto al primo.

Durante un esperimento, un'osservazione di due giorni con idrofono a banda larga installato su un *glider* ha permesso di registrare l'attività eruttiva di Hades e delle sorgenti idrotermali di Prometheus sul West Mata (isole Samoa) (Matsumoto *et al.*, 2011). A 38 km di distanza vicino alla superficie (tra 0 e 500 m), il livello sonoro medio tra 100 e 200 Hz è di circa 76-80 dB, leggermente più elevato rispetto al tipico livello di rumore ambientale dell'oceano profondo (Matsumoto *et al.*, 2011). Ciò dimostra che il suono dell'eruzione del vulcano si propaga maggiormente all'interno del canale sonoro (canale SOFAR) ed esibisce un'attenuazione di velocità ad una profondità di 1000 m. L'energia sonora massima del suono è concentrata tra 200 e 600 m di profondità ad una distanza di circa 10 km dalla fonte vulcanica. Qui la media 100-200 Hz dei livelli sonori è ~90 dB (re 1 $\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$), cioè circa 20 dB più elevata rispetto al tipico livello di rumore ambientale delle acque profonde.

2.2. Fonti antropogeniche

Il rumore generato dall'uomo proviene da una varietà di fonti ed è un componente importante della scena acustica totale nell'ambiente marino. Alcune di queste fonti producono suoni in maniera intenzionale mentre altre producono suoni come sottoprodotto di altre attività (National Research Council, 2003; Hildebrand, 2009). Le frequenze di emissione di alcuni animali sono confrontate con le principali fonti antropogeniche in Fig. 13.

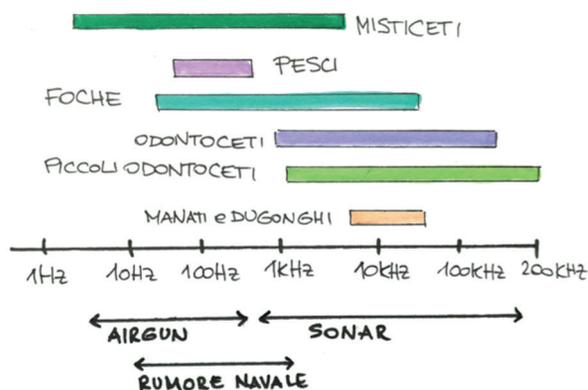


Fig. 13 - Frequenze di emissioni degli animali confrontate con alcune fonti antropogeniche (Licitra *et al.*, 2015).

Le fonti antropogeniche stanno diventando sempre più invasive, dato che aumentano il rumore di fondo oceanico ed i livelli di intensità del picco sonoro. Molte fonti di rumore sono localizzate in zone molto antropizzate del mare e della costa, come la piattaforma continentale, che ospitano habitat marini importanti. Per capire i cambiamenti a lungo termine nella quantità di rumore causata da attività umane si possono eseguire misurazioni in luoghi considerati più silenziosi ed ottenere un valore di base con cui confrontare gli altri (National Research Council, 2003).

Le caratteristiche delle tipiche fonti antropogeniche, secondo Hildebrand (2009), sono riassunte nella Tabella 5.

Tabella 5 - Tipiche fonti antropogeniche (modificata da Hildebrand, 2009). OC = onda continua, V = verticale, O = orizzontale.

Fonte	Livello acustico (dB re1 μ Pa@1m)	Potenza [W]	Energia totale per impulso [J]	Larghezza $\Delta = 10$ dB [Hz]	Direzione	Durata [s]
Airgun (array)	260	0,21 * 10 ⁹	6.2*10 ⁶	5-300	60*180°V	0.03
SURFTASS LFA sonar	235	0.59*10 ⁶	0.029*10 ⁹	100-500	15*360° O	6-100
Palificazione (1000 kJ)	237	0.46*10 ⁶	0.023*10 ⁶	100-1000	15*360° O	0.05
Multibeam acqua profonda (EM 122)	245	0.077*10 ⁶	760	11500-12500	1.0*120° V	0.01
Imbarcazione cargo (lung. 173 m -16 nodi)	192	66	-	40-100	80*180°	OC
Piccolo motore fuoribordo (20 nodi)	160	42*10 ⁻³	-	1000-5000	80*180°	OC
Turbina eolica	151	2.6 * 10 ⁻³	-	60-300	15*360°	OC

2.2.1. Fonti intenzionali

2.2.1.1. Sonar, comunicazioni (fonti discontinue)

La prima generazione di strumentazione per ascoltare il rumore oceanico fu utilizzata negli anni 1954-1955 in un sistema chiamato SOSUS (acronimo di Sound Surveillance System). Nel 1991 un progetto di ricerca internazionale progettò l'*Heard Island Feasibility Test* (HIFT), con cui si propagavano impulsi sonori a una distanza di 18.000 km in tutti gli oceani del globo tranne l'Artico. La prima sperimentazione del programma HIFT aveva l'obiettivo di mappare e monitorare la temperatura dell'oceano profondo, da cui dipende primariamente la velocità di propagazione del suono. La teoria postulava che gli andamenti a lungo termine della temperatura nelle acque dell'oceano potesse dare informazioni riguardo il riscaldamento globale: programma *Acoustic Thermography of Ocean Climates* (ATOC).

I sonar usano energia acustica per caratterizzare le proprietà fisiche e localizzare oggetti al di sotto della superficie del mare. L'ampio spettro di applicazioni dei sonar richiede che i sistemi abbiano grande variabilità nelle specifiche ingegneristiche e si distinguono in sonar a basse frequenze (<1 kHz), medie frequenze (1-20 kHz) e alte frequenze (>20 kHz) (Hildebrand, 2009).

I sonar militari sono usati per rilevare gli obiettivi, localizzarli e classificarli (National Research Council, 2003). Quelli ad elevate frequenze sono utilizzati in varie modalità, differenti tipi di segnali, lunghezze e forza. Sono strumenti molto precisi e con segnali a impulso. Altri tipi di sonar militari forniscono la mappatura del fondale e operano a frequenze vicino ai 100 kHz.

I sonar civili e commerciali sono utilizzati per rilevare, localizzare e classificare vari obiettivi (ad esempio: fondo oceanico, plankton, pesci, sub), scandagliano grandi profondità e profilando colonne d'acqua. Queste sonde sono state progettate per focalizzare il suono in un impulso diretto verso il fondo.

Possiamo considerare l'esempio di un tipo comune di ecoscandaglio che opera a due frequenze (ad esempio il modello LS-6000 - Furuno), 50 kHz e 200 kHz, con potenza di *output* dell'ordine di 1 kW (201 dB re 1 μ Pa a 1 m). Queste frequenze sono troppo elevate per essere percepite dai pesci, ma i 50 kHz cadono nella regione di sensibilità dei mammiferi marini. Questi strumenti normalmente vengono utilizzati lungo le coste o in acque basse, ma, talvolta, anche in aree biologiche ad elevate profondità.

I sonar sono usati anche per raccogliere dati di batimetria del fondale; possono essere a fascio singolo o multifascio. La frequenza varia da valori medi (12 kHz), per sistemi profondi, ad alti (70 a 100 kHz), per acque basse. I sonar multifascio sono operati a livelli elevati di fonti di energia (245 dB re 1 μ Pa a 1 m), con raggi altamente direzionali (Hildebrand, 2009).

2.2.1.2. Indagini geofisiche (fonti discontinue)

Le prospezioni sismiche in ambiente marino hanno come obiettivo la comprensione della struttura del sottosuolo. Queste prospezioni non vengono utilizzate solo per la ricerca di idrocarburi, ma anche la sicurezza delle installazioni sul fondale e per la ricerca scientifica. Le finalità più comuni sono la comprensione della struttura interna della terra, lo studio della pericolosità indotta dalla sismicità, dagli ambienti vulcanici, dall'instabilità dei pendii sottomarini e dalle emissioni di fluidi dal fondale, e infine lo studio del paleo-clima e la paleoceanografia. La profondità dell'indagine può variare da alcune decine di metri a diversi chilometri a seconda delle sorgenti utilizzate e degli obiettivi delle indagini. Le sorgenti pneumatiche ad aria compressa, comunemente definite *airguns* (Fig. 14), sono le fonti marine sonore maggiormente usate dagli anni '60 (Parkes e Hatton, 1986). L'energia acustica prodotta si propaga nella colonna d'acqua, viene riflessa e rifratta dal fondo mare e dagli strati al di sotto della superficie e viene raccolta da idrofoni trainati dalla nave in un cavo detto *streamer*. L'elaborazione del segnale ricevuto dallo *streamer* permette la restituzione di un'immagine ecografica del sottosuolo con cui si ricostru-



Fig. 14 - Messa a mare di un *array* di sorgenti pneumatiche (comunemente dette *airgun*) dalla nave da ricerca OGS - Explora (foto di Angelo Camerlenghi).

isce l'assetto geologico e si ricavano informazioni petrofisiche delle rocce, dei sedimenti e dei fluidi in essi contenuti (Blackburn *et al.*, 2007).

Il suono prodotto dalle fonti di aria compressa è funzione del volume, della dimensione e della forma delle aperture dalle quali fuoriesce l'aria. L'aria emessa converge in una bolla che, espandendosi e contraendosi, genera l'impulso sonoro (Coste *et al.*, 2014).

I cilindri che compongono le sorgenti ad aria compressa hanno diametri che variano tipicamente da 10 a 20 cm. I volumi d'aria variano da 0,2 a ~ 8 l. L'ampiezza del suono aumenta in proporzione alla radice cubica del volume degli *airguns*, il che significa che raddoppiare l'ampiezza (aggiungendo 6 dB di pressione sonora) al di sopra di quella ottenuta da una camera di 16 l richiede una camera di 131 l (Landrø e Amundsen, 2010). Invece di utilizzare *airguns* più grandi per raggiungere livelli sonori maggiori, sono usate fonti sonore multiple più piccole. La pressione di esercizio tipica è 2.000 psi (13.789,5 kPa) ma può variare da 1.500 to 3.000 psi. L'emissione sonora varia tra 218-228 dB rms re 1 μ Pa a 1 m (McCauley, 2000). Gli *airguns* sono generalmente dislocati ad una profondità dalla superficie dell'acqua variabile tra 3 e 10 m (Erbe, 2011).

Il suono caratteristico prodotto da un *airgun* sott'acqua è detto *pressure signature* (Fig. 15). La forma d'onda mostra un picco primario seguito da una serie di impulsi decadenti. Lo spettro primario della frequenza emessa per fini di esplorazione geologica è 3-100 Hz.

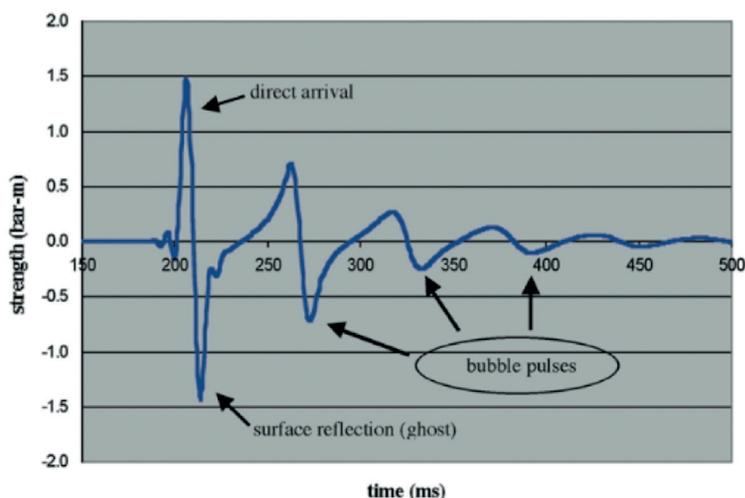


Fig. 15 - *Signature* di un *airgun* (40 in³) registrata da un idrofono a 300 m al di sotto (Dragoset, 2000)

La firma acustica dipende da quattro fattori ed è composta da tre elementi:

- 1) arrivo diretto: il suono prodotto quando l'aria fuoriesce dalle aperture;
- 2) *source ghost*: il riflesso dell'arrivo diretto dalla superficie marina che ha polarizzazione opposta rispetto a quella dell'arrivo diretto;
- 3) impulsi della bolla prodotti dal ciclo espansione-collasso creato in acqua. Ogni impulso contiene il suono prodotto direttamente dalla bolla seguito dal suono della bolla riflessa dalla superficie marina.

Queste proprietà della firma acustica sono caratterizzate da due parametri: ampiezza e periodo della bolla. Essi dipendono dalla dimensione, dalla profondità e dalla pressione. La Tabella 6 riassume le relazioni tra queste quantità.

Tabella 6 - Dipendenza della *signature* rispetto ai vari parametri (modificata da Dragoset, 2000).

	Ampiezza (S)	Periodo della bolla (T)
Volume (V)	S proporzionale a $V^{1/3}$	T proporzionale a $V^{1/3}$
Pressione (P)	S proporzionale a P	T proporzionale a $P^{1/3}$
Profondità (D in m)	complicato	T proporzionale a $(10+ D)^{-5/6}$

Gli *airgun* vengono, in genere, usati in *cluster* o *array*. La progettazione degli *array* è basata sulla necessità di avere una fonte che emetta un pacchetto di energia simmetrico in un tempo molto breve e con un contenuto di frequenza che consenta una buona penetrazione del segnale (Dragoset, 1984; Caldwell e Dragoset, 2000). Grazie all'interferenza tra gli impulsi emessi dal singolo *airgun*, la configurazione in *array* permette di ottenere la direzionalità del suono emesso, la soppressione dell'effetto di oscillazione della bolla, e, nel complesso, una firma più consona agli obiettivi dell'indagine (Caldwell e Dragoset, 2000; Dragoset, 2000).

2.2.1.2.1. Tipi di indagine

Un'imbarcazione che traina uno *streamer* singolo svolge un'indagine a 2 dimensioni (2D). Vengono prodotte delle "linee" che generano ognuna l'immagine verticale di una sezione del sottosuolo. Un'imbarcazione che traina molti *streamers*, invece, svolge un'indagine tridimensionale (Hambling, 2016), che seguendo una geometria progettata ad hoc consente di investigare un volume di spazio nel sottosuolo. Vengono definite 4D le indagini 3D ripetute nel tempo ad intervalli di mesi o anni con lo scopo di verificare eventuali variazioni di proprietà fisiche nel sottosuolo, come ad esempio la distribuzione di fluidi (Blackburn *et al.*, 2007; Gisiner, 2016).

2.2.1.2.2. Fonti alternative

Sebbene il loro maggiore *output* acustico sia diretto verticalmente verso il basso, gli *array* di *airguns* irradiano significativa quantità di energia ad angoli vicini all'orizzontale e l'energia può propagarsi per lunghe distanze nell'oceano, creando potenziali impatti sulla fauna marina (Laws e Hedge-land, 2008; Carroll *et al.*, 2017). A causa delle preoccupazioni generate da questi effetti, viene studiata una varietà di fonti come potenziale sostituzione degli *airguns* (Rassenfoss, 2016). La tecnologia dei vibratorini marini è in fase di sviluppo, ma non è ancora in grado di sostituire gli *airguns* nelle attività commerciali (Rassenfoss, 2016). Sorgenti differenti dagli *airguns*, utilizzate per rilievi specifici a bassa energia, alta risoluzione e bassa penetrazione sono i *water guns*, gli *sparkers* ed i *boomers*.

2.2.1.3. Altre attività industriali

Oltre alle indagini sismiche, già trattate nella sezione precedente, si possono distinguere:

- 1) perforazione,
- 2) posizionamento della struttura offshore,
- 3) rimozione della struttura offshore,
- 4) produzione e attività.

Tra tutte queste, la fase di perforazione è quella che produce i livelli di pressione sonora più elevati.

Le tecniche usate dalle industrie per la realizzazione delle piattaforme di estrazione richiedono una grande varietà di:

- strutture montate in modo permanente;
- semisommersibili: strutture mobili il cui supporto non appoggia sul fondale;
- sommersibili: strutture mobili le cui gambe appoggiano sul fondale;
- navi che svolgono le perforazioni;
- isole artificiali sulle quali sono posizionate le *drilling rigs*.

Le navi di perforazione sono rumorose perché lo scafo trasmette il rumore interno della nave in modo efficiente, e le navi non ancorano, ma usano i propulsori per rimanere sul posto. Inoltre, rumore addizionale è generato durante le attività supporto (Richardson *et al.*, 1995).

2.2.1.4. Esplosivi

Esplosivi chimici sono usati per la rimozione di strutture, *ship shock trials*, mine militari, bombe. Le esplosioni creano impulsi di pressione, a frequenza di banda ampia, con un tempo di insorgenza improvviso. Le caratteristiche spettrali e di ampiezza variano con il peso della carica e la profondità della detonazione (National Research Council, 2003). I suoni da un'esplosione si propagano ugualmente in tutte le direzioni (Munk *et al.*, 1988).

2.2.1.5. Deterrenti acustici

Gli strumenti acustici di dissuasione (*Acoustic dissuasive devices - ADDs*) usano il suono per allontanare i mammiferi marini dalle aree di pesca commerciale introducendo segnali acustici di allerta. Sono strumenti ad alta energia che raggiungono livelli di sorgente di 185-195 dB re 1 μ Pa a 1m. Hanno frequenze nella banda dai 5 ai 160 kHz con impulsi che possono durare per 2-2000 ms. Questi strumenti sono solo parzialmente adatti a ridurre la cattura accidentale di alcune specie di mammiferi marini: questi ultimi, infatti, hanno imparato a collegare questi suoni con la presenza di cibo (National Research Council, 2003).

Le *seal bombs*, ad esempio (Wiggins *et al.*, 2019), contengono ~ 2.3 g di miscela di carica esplosiva in un tubo sigillato che viene immerso sotto la superficie dell'acqua prima della detonazione (Myrick *et al.*, 1990).

2.2.2. Fonti involontarie

2.2.2.1. Traffico navale, commerciale e ricreazionale (fonti continue)

Il più pervasivo rumore di fondo a bassa frequenza (5-500 Hz) è causato da traffico navale transoceanico (Fig. 16).

Nel 1992 la flotta a cargo oceanica internazionale comprendeva circa 75.000 veicoli ed il livello di rumore medio del canale navale variava tra 70 – 90 dB: fino a 45 dB sopra il rumore ambientale oceanico naturale nelle regioni superficiali. Nei 12 anni successivi il numero è aumentato fino ad arrivare a circa 87.000 navi (un aumento della diffusione geografica del 16%).

I rumori ambientali in un canale navale sono dovuti a sistemi propulsivi e a rumori di navigazione. Ogni cargo è anche accompagnato da altri tipi di veicoli: navi da pesca commerciali, imbarcazioni per uso ricreativo, veicoli industriali costieri, traghetti per trasporto pubblico e servizi di sicurezza, guardie costiere e tutte le varietà di navi (Fig. 17). Ognuno di questi veicoli con un motore ed un sistema propulsivo aumenta il livello del rumore ambientale costiero. Essi generano 170 – 180 dB (re 1 μ Pa) di rumore a corto raggio che si diffonde sulla distanza e si attenua come risultato della geometria della propagazione e dello stato della superficie marina. Nelle aree costiere, i suoni del traffico marino sono moltiplicati da fenomeni di riflessione e

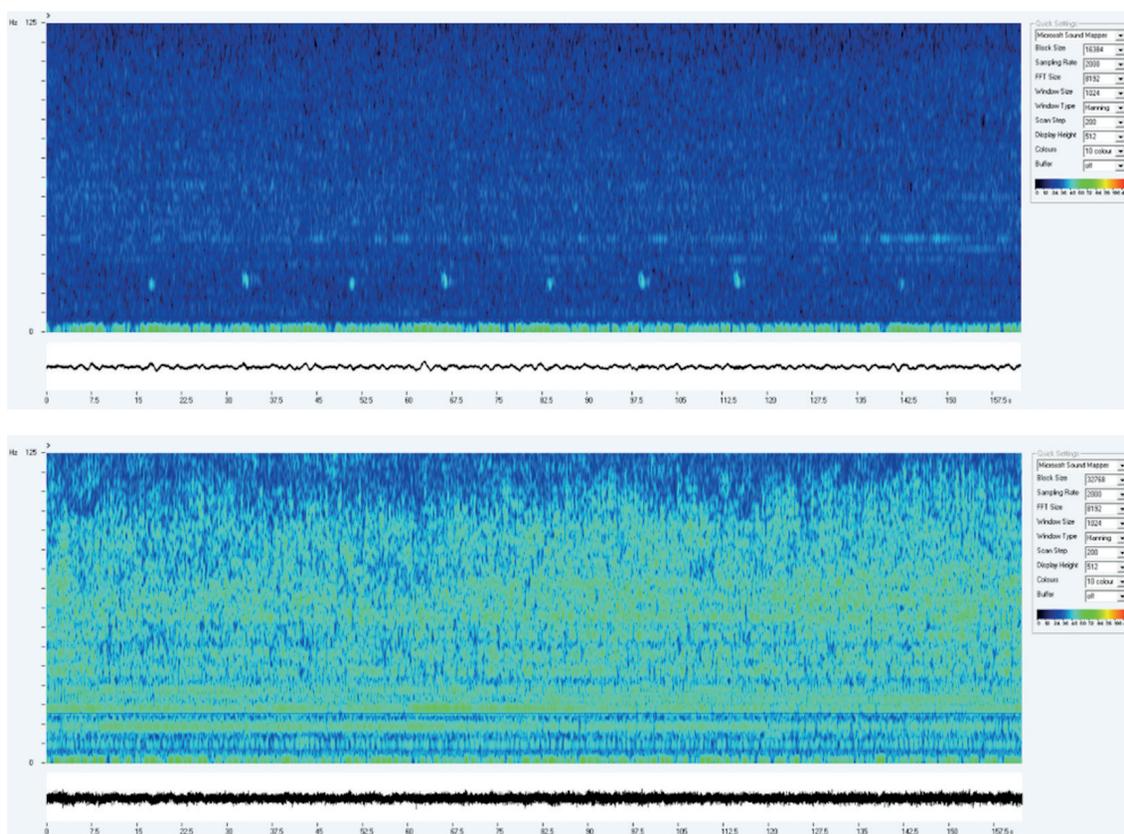


Fig. 16 - Spettrogrammi: in alto, balenottera in situazione di basso rumore (0-125 Hz, 160 s); in basso, rumore dovuto al transito navale (software CIBRA/SEAPRO). RegISTRAZIONI effettuate dai laboratori INFN-LNS di Catania con la piattaforma NEMO-ONDE (Pavan, 2014).

scattering a causa della topografia del litorale, raggiungendo 100 dB (re 1 μ Pa), con picchi a 150 dB nei maggiori porti e vie marine.

I motori marini sono normalmente più rumorosi rispetto al corrispettivo rumore ambientale prodotto da veicoli terrestri perché i motori sono molto più grandi e hanno maggiore potenza per ogni singolo veicolo; inoltre, ogni nave può avere fino a otto motori come sistema propulsivo. La maggior parte dei veicoli marini hanno anche pompe di raffreddamento e generatori di corrente (Erbe, 2011). Il rumore dipende dalla dimensione della nave, dal carico, dalla velocità e dalle attività che vi vengono svolte (Ross, 1976). Le navi con eliche sono generalmente più rumorose rispetto a quelle con propulsione a reazione. La cavitazione nella zona dell'elica, infatti, è la componente più rumorosa per velocità maggiori rispetto alla velocità di insorgenza della cavitazione.

Le imbarcazioni a scopo ricreativo non contribuiscono in modo significativo all'ambiente acustico globale, ma possono essere importanti fonti locali di rumore sottomarino. Gli yacht ad alta velocità potrebbero sembrare fautori del rumore marino, ma non sono in numero sufficiente a rappresentare in modo significativo le fonti di rumore (Bartlett e Wilson, 2002). Piccole barche con motori fuoribordo o entroborlo producono suoni generalmente più elevati nel campo delle medie frequenze (1 a 5 kHz) e moderati (da 150 a 180 dB re 1 μ Pa a 1 m) livelli di fonti sonore (Erbe, 2002).

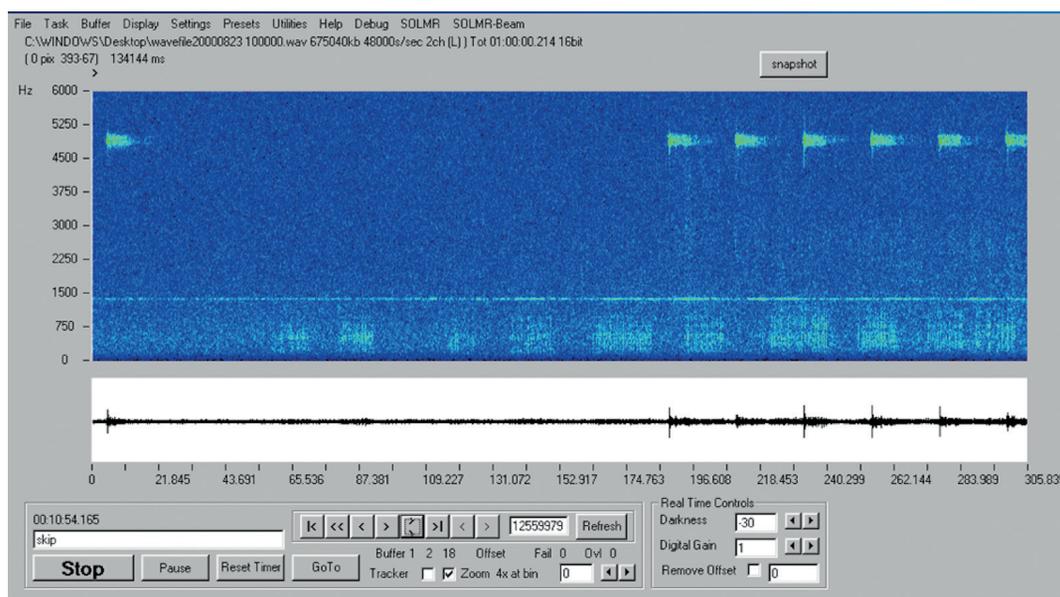


Fig. 17 - *Sonar pings* 4.8 kHz nave militare, 1.4 kHz traghetto, <1 kHz martelli pneumatici sulla costa (mar Ligure), immagine tratta da CIBRA - Centro Interdisciplinare di Bioacustica e Ricerche Ambientali – <http://www-3.unipv.it/cibra>).

Esistono anche dati delle misure del rumore per alcune classi di navi. Il più grande registro di navi che viaggiano nelle acque profonde è probabilmente il *Lloyd's Registry of Shipping* (Wales e Heitmeyer, 2001).

2.2.2.2. Altre attività industriali

Questo ampio spettro di attività produce una grande varietà di *pattern* acustici (National Research Council, 2003):

- palificazione (impulsivo, ampiezze molto ampie) (fonte discontinua),
- *power plants* (60-cycle molto forti con varie ampiezze) (fonte discontinua),
- industriali (toni ad alte frequenze) (fonte discontinua),
- dragaggi (moti causati da macchinari e meccanici) (fonte discontinua),
- turbine per la generazione di energia (fonte continua).

L'offshore drilling viene svolto utilizzando piattaforme, navi o isole artificiali. I livelli sonori prodotti dalle navi da perforazione sono generalmente più elevati rispetto alle piattaforme o isole con toni di frequenza bassi e segnali a banda larga nelle bande di frequenza basse o medie.

La telemetria acustica è usata per la comunicazione sottomarina, comando e controllo remoto dei veicoli, comunicazioni tra sub, monitoraggi e *data logging*. Sistemi a lungo raggio operano su distanze fino a 10 km usando frequenze da 7 a 45 kHz, con livello di sorgente a 190 dB re 1 μ Pa a 1m. La navigazione acustica è condotta con trasmettitori sottomarini che sono usati per stabilire una linea di riferimento per la navigazione dei veicoli sottomarini e per fornire posizioni sottomarine precise (Richardson *et al.*, 1995).

Il dragaggio marino è, in genere, condotto in aree costiere ed è una tecnica usata per rendere più profondi i canali di navigazione o per l'estrazione di risorse marine naturali. Come specifi-

cato dal documento di posizione del CEntral Dredging Association (CEDA, 2011), il processo di dragaggio comprende una varietà di attività che generano suoni che possono essere ampiamente divisi tra lo scavo dei sedimenti, il trasporto ed il posizionamento del materiale dragato al sito di scarico (WODA, 2013).

2.2.2.3. Parchi eolici marini

Di tutte le fonti di energia rinnovabile, la più realistica ed economica è l'eolico (Vella *et al.*, 2001).

Le attività svolte prima della costruzione di un parco eolico includono indagini geofisiche e geotecniche e creano un aumento nel traffico navale prima della costruzione e durante lo smantellamento (Nedwell e Howell, 2004). Un rimorchiatore di 25 m che traina un barcone vuoto è uno scenario tipico in questi casi e comporta un livello sonoro di 170 dB re 1 μ Pa a 1 m. Una delle attività più significative durante la costruzione dei parchi eolici è l'installazione delle fondamenta dei piloni, che produce livelli sonori di 215 dB re 1 μ Pa a 1 m. La fase più lunga del ciclo di vita è la fase operativa: livelli sonori a bassa frequenza con uno spettro che mostra un massimo di 153 dB re 1 μ Pa a 1 m a 16 Hz. Le misure sono fatte rispetto a turbine individuali di bassa potenza (meno di 1 MW, Fig. 18).

Ci sono quattro opzioni per il progetto delle fondamenta: monopilone, multipilone, a gravità e a cassettoni. Le prime due opzioni consistono di uno o più cilindri di acciaio aperti che vengono forzati nel sedimento. Le altre due sono strutture di cemento che galleggiano fino alla posizione della turbina e vengono messe in sicurezza sul posto. La generazione e la propagazione del rumore sottomarino è modificata dalla geografia e dalla geologia del luogo del parco eolico (Betke *et al.*, 2004).

Blocchi di roccia o cemento possono essere posizionati sul fondale marino durante la costruzione di parchi eolici come protezione contro gli sfregamenti e per salvaguardare i cavi tra le turbine. Il processo produce rumore quando i blocchi si scontrano gli uni contro gli altri. Misure di questo tipo di rumore sono molto scarse. Alcuni report dichiarano che non ci sia evidenza che il posizionamento delle rocce contribuisca al livello di rumore (Nedwell *et al.*, 2007).

Un quantitativo significativo di cavi deve essere installato assieme ad un parco eolico per assicurare le co-

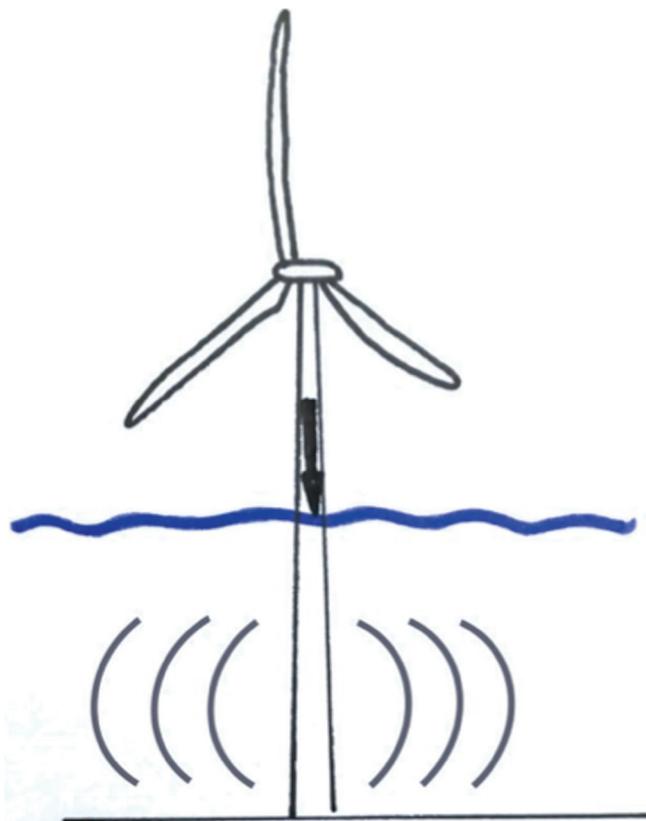


Fig. 18 - Meccanismo di generazione del rumore dovuto al funzionamento di una turbina (Betke *et al.*, 2004).

municazioni tra le turbine e tra queste e la stazione a terra. Per proteggere i cavi da possibili danni, questi sono scavati nel fondale marino usando aratri trainati con cavi (Nedwell et al., 2007).

A basse velocità del vento, il generatore gira a circa 1100 rpm, ma aumenta rapidamente al valore nominale di 1800 rpm, che è raggiunto a 700 kW. La potenza irradiata dalla turbina è di 1500 kW. Quindi ci sono due spettri acustici: uno per basse velocità del vento e uno per venti moderati e forti. Più grande è la turbina, minore è il campo di frequenze emesse. L'efficienza della radiazione delle onde superficiali diminuisce verso basse frequenze, mentre aumentano le soglie uditive.

2.2.2.4. Traffico di navi rompighiaccio in Artico

I rompighiaccio rappresentano una porzione relativamente piccola del traffico dei veicoli totali nell'Artico e sono utilizzati per la ricerca oceanografica, il monitoraggio, la scorta di altri veicoli, ecc. (Roth et al., 2013). Tuttavia, l'assottigliamento dei ghiacci artici e l'avanzamento della progettazione delle navi stanno permettendo lo sfruttamento di stagioni di navigazione più lunghe (Jensen, 2007).

In confronto ad altri veicoli, i rompighiaccio generano livelli di rumore più elevato e più variabile – ciò è dovuto alla natura episodica della manovra del rompighiaccio – che spesso comprendono indietreggiamenti e speronamenti nel ghiaccio. I livelli di sorgente (Cosens e Dueck, 1993) più elevati raggiungono i 190–200 dB re: 1 μ Pa a 1 m (banda di ottava piena a 10, 50, 100 Hz).

Alcuni rompighiaccio sono equipaggiati con sistemi che soffiano aria ad alta pressione nell'acqua in modo da spingere lontano dalla nave il ghiaccio galleggiante, creando una fonte di rumore addizionale a corto raggio. La propagazione del suono sotto al ghiaccio sottomarino è un'area di ricerca complessa, in ambito acustico, a causa degli effetti di *scattering* da ghiaccio, dell'assorbimento di energia acustica all'interfaccia acqua-ghiaccio e della possibilità che le onde trasmesse possano re-irradiare nella colonna d'acqua (Etter, 2003). Incorporando le condizioni del ghiaccio marino, la profondità dell'acqua ed il profilo di velocità del suono, è possibile creare un modello di propagazione e, quindi, predire i *range* ai quali il rumore del rompighiaccio possa essere rilevato (Jensen, 2007).

2.2.2.5. Palificazione

I livelli più alti di rumore di fondo registrati al sito della turbina sono probabilmente il risultato della presenza dei veicoli che si occupano di palificazione e delle navi di supporto, evidenziando l'importanza di considerare tutte le fasi della costruzione in termini del loro impatto ambientale. La meccanica della generazione del rumore sottomarino e la propagazione durante la palificazione non sono ben comprese e non c'è molta letteratura sull'argomento.

Palificazione per vibrazione: consiste di pesi rotanti eccentrici, sistemati in modo che le vibrazioni orizzontali si cancellino mentre quelle verticali vengono trasmesse dal palo.

Palificazione a impatto: il peso spinge il palo nel terreno e l'impatto genera energia acustica. Sono più rumorosi dei precedenti.

Il rumore viene trasmesso lungo il palo per differenti vie (Parvin et al., 2006):

1. dalla cima del palo attraverso l'aria, in acqua;
2. dalla cima del palo, giù per il palo, irradia in aria e scende nell'acqua;
3. dalla cima del palo direttamente in acqua;
4. lungo il palo, nel terreno.

2.3. Fonti di rumore a seconda dei valori di frequenza

Il rumore ambientale oceanico può essere diviso in tre bande di frequenza:

- bassa (da 10 a 500 Hz),
- media (da 500 Hz a 25 kHz),
- elevata (> 25 kHz).

In generale, le fonti a bassa frequenza hanno un potenziale significativo per la propagazione a lungo raggio, visto che sono caratterizzate da una bassa attenuazione. Le medie frequenze, invece, hanno un potenziale limitato per la propagazione a causa della maggior attenuazione; quindi solo fonti locali o regionali contribuiscono al campo del rumore ambientale. Ad elevate frequenze tutte le fonti sonore sono confinate in un'area all'interno di pochi chilometri di distanza dal ricevitore (Hildebrand, 2009).

Uno spettro generalizzato di rumore oceanico in acque profonde è presentato in Fig. 19. Questo grafico segue lo stile di Wenz (1962), ma è stato modificato per riflettere i livelli più elevati del rumore ambientale a bassa frequenza a causa delle aumentate attività antropogeniche (Cato e McCauley, 2002). Ad elevate frequenze e profondità il rumore del vento decade più velocemente con l'aumento della frequenza, rispetto a quanto ci si potrebbe aspettare, a causa dell'attenuazione delle fonti di rumore superficiale (Mellen, 1952).

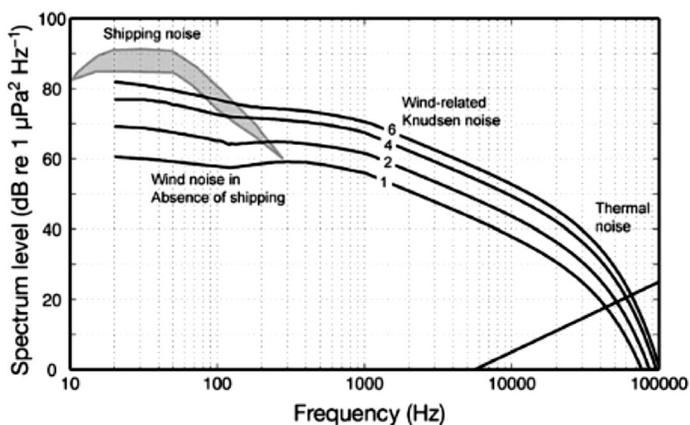


Fig. 19 - Livelli spettrali di rumore ambientale oceanico con un ricevitore a 1000 m di profondità (Hildebrand, 2009).

Fattori ambientali oceanografici importanti per la propagazione acustica sono:

- 1) la struttura della velocità del suono in oceano (per propagazione a lungo raggio),
- 2) l'attenuazione acustica dell'acqua di mare,
- 3) la profondità dell'acqua,
- 4) le proprietà geo-acustiche del fondale oceanico (Kuperman, 1988).

2.3.1. Rumore a bassa frequenza

C'è forte evidenza che la banda compresa tra i 10 Hz ed i 500 Hz sia dominata dalle fonti di rumore antropogenico dovute soprattutto al traffico navale e alla strumentazione per indagini sismiche, mentre si nota un minor contributo dovuto ai sonar (Wenz, 1972). È possibile, tuttavia, discernere il contributo del rumore del vento, facendo misurazioni in aree remote come il sud del Pacifico (Cato, 1976). All'interno della componente dovuta al traffico navale, le navi commerciali

hanno un peso significativo (Cato, 1976). Il Lloyd's Register indica che dagli anni '90 c'è stato un significativo aumento del numero e della dimensione delle navi, ma non è chiaro come il tonnellaggio o la stazza si relazionino al rumore ambientale irradiato (Ross, 1976).

Le esplosioni sono le fonti sonore che producono le SPL, la potenza acustica e l'impulso di energia totale più elevati. In ambienti di acqua bassa, la palificazione può risultare in livelli di rumore elevati, ma il potenziale per una propagazione a lungo raggio di questi suoni è limitata.

Le esplorazioni offshore per l'industria del gas e del petrolio costituiscono un'altra fonte significativa di rumore ambientale oceanico a bassa frequenza. Queste attività avvengono lungo i margini continentali e sono, in genere, condotte in acque basse, ma negli ultimi anni si sono iniziate esplorazioni in acque profonde (>500 m). In questi ambienti, c'è maggior potenziale perché il suono si propaghi su grandi distanze, attraverso i bacini oceanici, accoppiandosi con il canale sonoro profondo (Nieukirk *et al.*, 2004).

Anche i pesci creano suoni a bassa frequenza (50-2000 Hz, spesso 100-500 Hz) aumentando in modo significativo il rumore ambientale locale (Zelick *et al.*, 1999; Myrberg e Fuiman, 2002). I suoni vengono prodotti in varie modalità, ma, più comunemente, da stridulazioni o usando i muscoli sulla vescica natatoria o quelli connessi ad essa. La stridulazione produce tipicamente impulsi a banda larga, mentre i suoni prodotti dai muscoli sonici sulla vescica natatoria sono tonali. Questi animali quando si riuniscono in banchi sono anche capaci di generare cori che sono altamente variabili da specie a specie, dall'ora della giornata e dalla stagione (Cato e McCauley, 2002). L'aumento del rumore a bassa frequenza può andare da 20 a 30 dB in questi casi.

Oltre a ciò, i terremoti contribuiscono al rumore a bassa frequenza, soprattutto con una componente di fase T che si propaga in acqua (Butler, 2006). Onde oceaniche superficiali di lungo periodo dominano il rumore ambientale alle frequenze fino ai 10 Hz (Webb, 1998).

2.3.2. Rumore a media frequenza

La fonte primaria nella banda di media frequenza (da 500 Hz fino a 25 kHz, con un picco attorno ai 300 fino ai 500 Hz) è l'agitazione superficiale marina: le misure del rumore qui sono ben correlate con l'agitazione superficiale marina dovuta all'apporto locale del vento ed allo stato del mare (Knudsen *et al.*, 1948).

I processi che contribuiscono al rumore sono: rottura di onde, *spray*, formazione di bolle e relativo collasso, piogge. Queste fonti tendono ad essere locali rispetto al sito di misurazione e, quindi, il rumore ambientale nella banda di media frequenza è più intenso nella direzione verticale rispetto all'orizzontale (Short, 2005). Vari sonar contribuiscono anche al rumore alle medie frequenze come quelli militari o quelli usati per la mappatura, tuttavia il *range* della loro influenza è limitato alle poche decine di chilometri.

Il rumore dovuto all'agitazione superficiale marina è stato inizialmente descritto sistematicamente da Knudsen *et al.* (1948), usando misurazioni a frequenze medie ed in acque poco profonde (<200 m). È una delle fonti maggiori del rumore ambientale oceanico, lo spettro misurato dominante tra 500 Hz e 50 kHz, e varia con la velocità locale del vento e lo stato del mare. I meccanismi primari sono le onde generate da vento e l'impatto delle gocce d'acqua (Franz, 1959; Ma *et al.*, 2005). Le collisioni superficiali hanno due distinti meccanismi di generazione del rumore, ma entrambi irradiano preferenzialmente verso il basso. Lo spettro irradiato dell'impatto copre una banda di frequenza ampia e varia con la dimensione della goccia e la velocità con cui

essa colpisce la superficie. Le pulsazioni dovute alle gocce d'acqua successive producono spettri con picchi improvvisi, tra 500 Hz e 10 kHz (la bolla che determina la sua frequenza di risonanza) (Devin, 1959).

Anche il sonar è una fonte significativa di rumore antropogenico nella banda delle medie frequenze. I sonar militari sono le fonti più intense di rumore a media frequenza e sono incorporati negli scafi di molte navi come i cacciatorpedinieri e le fregate. Sebbene questi sonar siano utilizzati soprattutto in aree con conflitti militari in atto ed in aree di addestramento navale, essi sono stati coinvolti negli spiaggiamenti dei mammiferi marini e nelle loro reazioni comportamentali rispetto al suono (Mazzariol *et al.*, 2016). Visto che l'attenuazione limita il *range* di propagazione del suono, la preoccupazione per l'impatto di questi sonar è locale.

I deterrenti acustici (AHD) producono anche livelli elevati di potenza acustica e sono noti per il loro contributo locale al rumore ambientale a medie frequenze. Si ipotizza che le AHD possano escludere i mammiferi marini dalle aree del loro utilizzo (Morton e Symonds, 2002).

Le barche piccole hanno livelli di fonti acustiche moderate a medie frequenze. L'elevato numero di piccoli veicoli che sono utilizzati per una varietà di scopi, suggerisce che possano aumentare i livelli di rumore ambientale almeno localmente: può essere un componente importante del rumore di fondo in certe regioni costiere (Veirs e Veirs, 2006). Il rumore prodotto in questo caso non si propaga lontano (~10 km) a causa dell'attenuazione acustica, ma la persistenza dei suoni è mantenuta dalla sovrapposizione con i livelli più bassi del rumore ambientale.

A medie frequenze i gamberi schioccatori - *Alpheus spp.* e *Synalpheus spp.* - possono produrre una fonte dominante del rumore ambientale a media frequenza, aumentando i livelli del rumore ambientale anche di 20 dB (Everest *et al.*, 1948).

2.3.3. Rumore ad alta frequenza

Per ricevitori posizionati a varie profondità, i livelli spettrali del rumore marino diminuiscono molto più rapidamente con la frequenza rispetto a quanto previsto dalle curve di Kundsén: la profondità del ricevitore è, quindi, un parametro chiave dei livelli di rumore ambientale. Ciò avviene perché il rumore dovuto al vento è confinato alla superficie marina o vicino ad essa e c'è attenuazione significativa del rumore superficiale prima che raggiunga la profondità. La trasmissione sonora è fortemente dipendente dalla frequenza, e, ad elevate frequenze (>25 kHz), l'attenuazione del suono diventa un fattore importante nel determinare i livelli di rumore ambientale oceanico. Misure di attenuazione del suono fatte sull'acqua marina hanno rivelato numerosi meccanismi di assorbimento che includono: la viscosità molecolare, il rilassamento chimico e lo *scattering* oceanografico (Fisher e Simmons, 1977). La dipendenza di attenuazione da frequenza, pressione, temperatura, salinità e acidità è complessa (Francois e Garrison, 1982). Siccome l'attenuazione acustica ha una dipendenza sull'acidità dell'acqua di mare, è stato ipotizzato che l'aumento di quest'ultima, legata al livello di CO₂ risulterà diminuire l'assorbimento del suono aumentando, quindi, i livelli del rumore oceanico (Hester *et al.*, 2008).

I sonar usati per *echosounding* in acqua bassa e per localizzare piccoli oggetti, come i pesci, richiedono alte frequenze per fornire risoluzione sufficientemente dettagliata a distanze relativamente corte. Queste elevate frequenze si attenuano rapidamente e, quindi, hanno solo effetti locali.

3. Impatto del rumore antropogenico sulla fauna marina

Il rumore antropogenico copre l'intera banda di frequenza che usano gli animali marini, da 1 Hz a 200 kHz, e, a causa dell'efficienza della trasmissione del suono nel mare, ogni rumore viaggia per grandi distanze ed il contenimento è difficile (Stocker, 2002). Sebbene ci sia stata iniziale preoccupazione riguardante gli effetti del suono sui mammiferi marini (NRC, 2003; NMFS, 2018; Southall *et al.*, 2019), c'è, ora, crescente allarme riguardo i potenziali effetti sui pesci, sugli invertebrati e sullo zooplancton (Popper e Hawkins, 2019).

Alcuni animali usano il suono in modo passivo ed attivo per:

- rilevazione di predatori;
- localizzazione di prede;
- percezione di altre colonie o specie in branchi;
- navigazione;
- percezione di maree, movimenti sismici, correnti.

Tutti i sistemi sensoriali sono progettati per permettere agli animali di ricevere ed elaborare informazioni provenienti dall'ambiente circostante. Se ogni segnale ambientale disponibile ricevesse uguale attenzione, il cervello sarebbe subissato da input sensoriali. Invece, gli organi deputati a queste funzioni sono essenzialmente filtri multi livello, che selezionano i segnali considerati evolutivamente importanti (NOAA, 2018).

3.1. Pesci - L'orecchio

Ci sono sostanziali differenze nella morfologia delle orecchie dei pesci e, soprattutto, nelle regioni associate con l'udito (Schulz-Mirbach e Ladich, 2016; Schulz-Mirbach *et al.*, 2019).

I meccanismi dell'udito nelle differenti specie di pesci possono essere molto diversi. I pesci rilevano i suoni con gli orecchi interni, localizzati nella cavità del cranio laterale rispetto al cervello, a livello della medulla (Fig. 20). L'orecchio consiste di tre canali semi circolari e associati con regioni sensoriali (ampolle) che sono principalmente coinvolti nel rilevamento dell'accelerazione angolare e tre organi otoliti (saccula, lagena, utricolo) che sono coinvolti nell'udito e nei sensi posizionali (Popper e Fay, 2011). Gli organi otoliti, hanno ognuno un epitelio sensoriale in contatto con una struttura densa di carbonato di calcio, l'otolita. L'epitelio

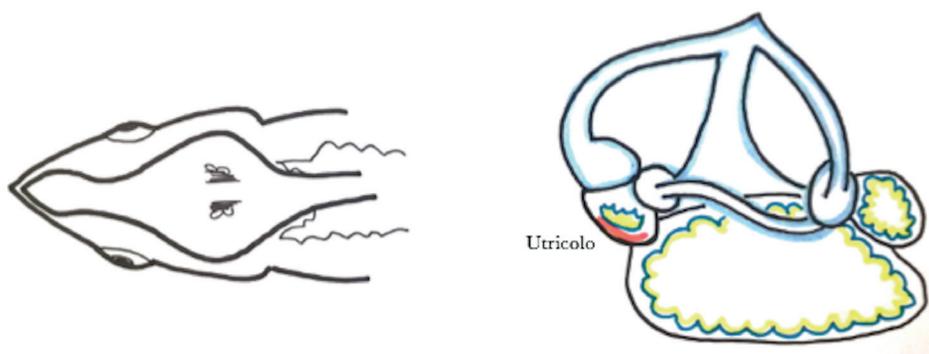


Fig. 20 - Disegno dell'orecchio di un *Gadus morhua* [modificato da Hawkins (2018); disegno di Alice Affatati]: a sinistra vista in pianta del corpo; a destra laterale (verde organi otoliti, azzurro canali semicircolari, giallo = otolita calcareo, rosso = epitelio sensoriale).

sensoriale (macula) ha molte cellule sensoriali ciliate organizzate in gruppi orientati nella medesima direzione. Quando un pesce è esposto al moto particellare, il corpo, assieme alle cellule sensoriali, si muove con l'acqua, mentre gli otoliti più densi si muovono a differenti ampiezze e fasi (Hawkins e Popper, 2018). Questi *pattern* di orientazione delle cellule ciliate, che variano in specie differenti (Popper e Coombs, 1982), mostrano una risposta di tipo graduale al moto delle particelle, permettendo, quindi, ai pesci di determinare la direzione confrontando informazioni che giungono da gruppi di recettori differenti (Fay, 2005; Sand e Bleckmann, 2008; Hawkins e Popper, 2018).

Nei pesci cartilaginei il dotto endolinfatico è connesso alla superficie della testa attraverso un piccolo poro (poro endolinfatico) che nei pesci ossei è di dimensioni ridotte (Lisney, 2010). Molte delle differenze nella dimensione dell'otolita sono in relazione alla grandezza del pesce, tuttavia otoliti di pesci molto grandi possono essere ben più piccoli rispetto a quelli di pesci piccoli e viceversa (Campana, 2004).

In tutti i pesci cartilaginei ed in alcuni membri degli Actinopterygii, è presente una quarta macula, detta la *macula neglecta* che consiste di una o due piccole guaine che ospitano da diverse dozzine a migliaia di cellule ciliate sensoriali (Corwin, 1981). Analogamente a quanto accade per le creste ampollari del canale, la *macula neglecta* è sovrastata da una cupola gelatinosa; non sono presenti otoconia o otoliti. All'interno dell'orecchio del pesce, la *macula utriculi* è orientata soprattutto orizzontalmente con eccezione della lacinia che curva antero-lateralmente. La *macula sacculi* e la *lagena*, sono entrambe orientate lungo il piano verticale. La maggior sensibilità alle vibrazioni si trova nella *macula neglecta*. Il primo audiogramma degli elasmobranchi fu quello dello squalo toro (*Carcharhinus leucas*). Questo audiogramma, basato su toni puri, mostra una tipica forma della curva a 'U' per i vertebrati, ed indica che il soggetto può sentire frequenze comprese tra 100 Hz e 1500 Hz, con maggiore sensibilità tra 400 e 600 Hz. Gli squali possono essere attratti da vibrazioni causate da azioni di lotta tra pesci o loro fuga durante i tentativi di cattura. Questi suoni risultano molto attraenti se hanno frequenze ad impulso, ed irregolari, sotto i 60 Hz. Si osservano fughe da fonti sonore nel caso di rapida insorgenza di un suono intenso quando il soggetto si trova entro 10 m dalla sorgente.

3.1.1. Linee laterali

Sono un sistema di organi di senso presenti nei vertebrati acquatici che servono a rilevare movimento e variazioni nella pressione nelle acque circostanti l'animale. Sono costituiti da una serie di meccanorecettori, detti neuromasti, disposti in una rete di connessioni lungo il corpo e la testa. Possono essere presenti sulla pelle o incorporati in canali al di sotto dell'epitelio e sono pieni di muco. Nel *Pseudacris triseriata*, ad esempio, le linee laterali sono responsabili della percezione delle oscillazioni delle correnti d'acqua vicino al corpo con una buona risposta al di sotto dei 10 Hz. Al di sopra di quella frequenza, la sensibilità declina rapidamente fino a 128 Hz (Myrberg *et al.*, 1976).

3.1.2. Diversità nella morfologia degli orecchi interni

La diversità nelle caratteristiche dell'orecchio interno sono più che altro in relazione a:

- grandezza degli orecchi in confronto alla dimensione totale del pesce e del cervello,
- quantità di osso del teschio o cartilagine e potenziale attaccamento al labirinto membranoso al teschio,
- distanza tra le orecchie e presenza/assenza della connessione tra orecchio destro e sinistro,

- posizione relativa alle parti superiori ed inferiori dell'orecchio cioè posizione dell'utricolo relativo alla saccula ed alla lagena,
- dimensione e diametro dei canali semicircolari,
- rapporto dimensionale tra l'utricolo, la saccula e la lagena,
- se saccula e lagena formano una o due tasche.

3.2 Effetti sui pesci

Tra tutti i sensi, l'udito è quello che fornisce ai pesci più informazioni, spesso provenienti da grandi distanze e dagli ambienti più vari, sul *soundscape*, cioè l'insieme del suono ambientale, compresi gli eventi sonori associati a luoghi specifici in un particolare momento (Bregman, 1994; Fay, 2009; Slabbekoorn, 2018).

Per esempio, l'abilità dei pesci di determinare la direzione di provenienza di una fonte sonora permette loro di localizzare i predatori, e allontanarsi, o rilevare una potenziale preda e avvicinarsi (Hawkins e Popper, 2018); questa capacità di discriminare tra suoni differenti rende anche possibile il riconoscimento dei conspecifici.

Dagli studi che sono stati condotti, è evidente che ci sono differenze sostanziali riguardanti le capacità uditive di un pesce rispetto ad un altro. Siccome è impossibile determinare la sensibilità uditiva per tutte le specie, si possono distinguere alcuni gruppi, in modo abbastanza grossolano, sulla base delle differenze nella loro anatomia e ciò che si sa riguardo all'udito di altre specie con l'anatomia comparata. Popper *et al.* (2014) suggeriscono le seguenti distinzioni:

- 1) pesci senza vescica natatoria: percepiscono solo il moto delle particelle e mostrano la sensibilità solo verso una stretta banda di frequenze (Pleuronectiformi e Chondrichti);
- 2) pesci con vescica natatoria: questo organo non sembra avere un ruolo nell'udito. Questi sono sensibili solo al moto delle particelle e solo ad una stretta banda di frequenze (Salmonidi, Scombridi, ecc.);
- 3) pesci con la vescica natatoria vicina, ma non connessa, all'orecchio: essi hanno speciali strutture molto diverse nelle varie specie (apparato di Weber) che collegano meccanicamente la vescica natatoria all'orecchio. Sono sensibili sia al moto delle particelle che alla pressione del suono e mostrano un *range* di frequenze più esteso rispetto alle prime due categorie, fino a 500 Hz. Questo gruppo comprende circa 8000 specie e famiglie come: Sciaenidae, Gadidae, Anguillidae (Weber, 1820);
- 4) pesci che hanno strutture che collegano meccanicamente le vesciche natatorie all'orecchio. Questi pesci sono sensibili soprattutto alla pressione sonora sebbene rilevino anche il moto particellare. Hanno un *range* di frequenza maggiore che si estende fino a parecchi kHz e generalmente mostrano sensibilità più elevata rispetto alle altre categorie (Holocentridae, Sciaenidae, Clupeidae, Otophysan);
- 5) uova e larve.

Si comprende come la vescica natatoria giochi un ruolo fondamentale nelle capacità uditive di questi animali. Ciò si verifica perché essa è comprimibile e varia il suo volume in risposta alle pressioni di suoni fluttuanti, diventando un trasformatore acustico (Sand e Hawkins, 1973). Quindi, avere una vescica natatoria vicino all'orecchio aumenta le capacità uditive dei pesci.

La maggior parte di essi rileva il suono da <50 Hz fino a 1000 Hz (Sand e Karlsen, 2000) e alcune specie possono rilevare i suoni sopra i 3000 Hz (Ramcharitar *et al.*, 2006) ed altri, tutti del genere *Alosa*, fino a oltre 180 kHz (Mann *et al.*, 2001; Ladich e Schulz-Mirbach, 2016). Al primo

gruppo appartengono i pesci ‘generalisti’, mentre quelli dell’altro gruppo sono detti ‘specialisti.’ Gli specialisti hanno una larghezza di banda più ampia di udito rispetto ai generalisti, ma sono anche capaci, spesso, di distinguere suoni ad intensità minori (Corwin, 1981). Esempi di specialisti includono i pesci rossi (*Carassius auratus*), i pescegatto (Siluriformes), i pesci scoiattolo (Holocentridae), le aringhe (*Clupea harengus*) e molte altre specie (Hastings e Popper, 2005). Nei generalisti l’energia acustica primaria è fornita dalla stimolazione diretta all’orecchio, ma è possibile che energia addizionale venga re-irradiata dalla vescica natatoria, abbassando le soglie di udito e aumentando la larghezza di banda della rilevazione. Come risultato, i generalisti hanno più probabilità di essere più sensibili alla componente del moto delle particelle del campo sonoro. In contrasto, gli specialisti hanno sviluppato un numero di meccanismi differenti per accoppiare acusticamente la vescica natatoria all’orecchio, permettendo, quindi, ai sistemi uditivi di rilevare la componente di pressione del campo sonoro.

Per i pesci più sensibili l’udito non è limitato dal livello minore udibile in un ambiente silenzioso, ma dall’abilità di rilevare e distinguere suoni biologicamente importanti rispetto al rumore ambientale (Fay e Simmons, 1999). Questa interferenza con la percezione di un suono biologicamente rilevante, o rumore, è genericamente rilevata come *masking* e si verifica in tutti i vertebrati (Fay e Simmons, 1999). Ogni aumento nel livello di rumore marino ambientale risulta nell’aumento delle soglie uditive ed in una diminuzione dell’abilità dei pesci di rilevare, localizzare e riconoscere suoni particolari (Hawkins e Johnstone, 1978).

Più bassa è la soglia, più il pesce è sensibile al suono. Quindi, la *Clupea harengus* ha l’udito migliore di tutte le specie su un range di frequenze. *Gadus morhua* e *C. harengus* sono sensibili sia alla pressione del suono che al moto delle particelle, mentre *Limanda limanda* e *Salmo salar* sono sensibili solo al moto delle particelle (Fig. 21).

3.3. Criteri di esposizione a fonti sonore

I criteri di esposizione al suono definiscono quei livelli sonori provenienti da fonti differenti che è probabile colpiscano gli animali generando diverse problematiche (Southall *et al.*, 2007; NMFS, 2018). Effetti fisici di esposizione al suono sono basati sui doppi criteri di *peak sound pressure* (SPL_{peak}) e cumulativi SEL (SEL_{cum}) (Popper *et al.*, 2006; Carlson *et al.*, 2007; Popper

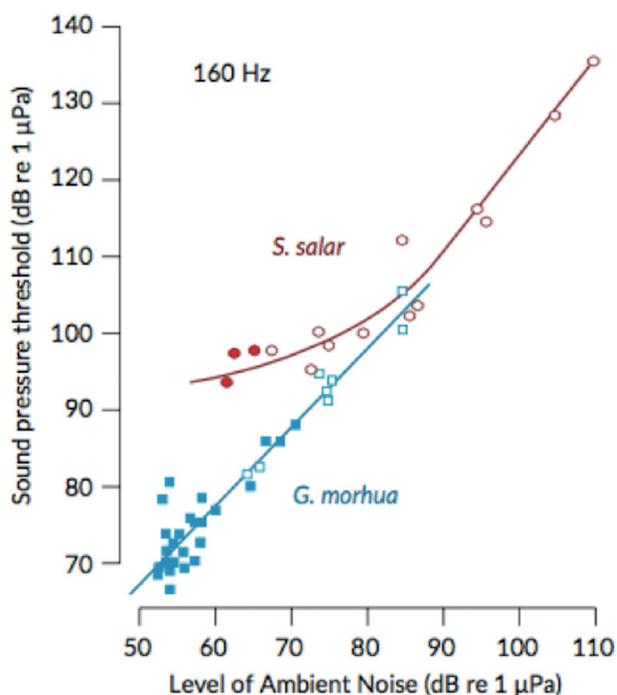


Fig. 21 - *Masking* nel *Gadus morhua* e *Salmo salar* (Popper e Hawkins, 2019). I valori di soglia sono determinati usando un segnale tonale puro ad una frequenza di 160 Hz. I simboli chiusi rappresentano soglie ai livelli naturali del rumore ambientale, i simboli aperti, invece, rappresentano soglie del rumore antropogenico (figura da Anthony D. Hawkins, 2018).

e Hastings, 2009). L'utilizzo del SEL è consigliato quando gli animali sono esposti a segnali che possono accumularsi nel tempo, ma si pensa possa essere una misura inappropriata degli effetti potenziali. Popper e Hawkins (2019) concludono che non sia possibile definire criteri di esposizione al suono per ogni possibile fonte o effettuare un'analisi per ogni specie di pesci. I criteri proposti sono incompleti a causa della mancanza di dati (Tabella 7).

Tabella 7 - Criteri proposti per la mortalità e danni fisici rimediabili dovuti all'esposizione a segnali di palificazione (960 suoni a intervalli di 1,2 s, Halvorsen *et al.*, 2012b e c.). Livelli di pressione acustica di picco e rms dB re 1 μ Pa; SEL dB re 1 μ Pa² s⁻¹. TTS basati su Popper *et al.* (2005). (tabella modificata da Popper e Hawkins, 2019).

Animale	Mortalità	Ferita (non mortale)	TTS
Pesci senza vescica natatoria	>219 dB SELcum >213 dB picco	>216 dB SELcum >213 dB picco	>>186 dB SELcum
Pesci con vescica natatoria non coinvolta nell'udito	210 dB SELcum >207 dB picco	203 dB SELcum >207 dB picco	>186 dB SELcum
Pesci con vescica natatoria coinvolta nell'udito	207 dB SELcum >207 dB picco	203 dB SELcum >207 dB picco	186 dB SELcum
Tartarughe marine	210 dB SELcum >207 dB picco	(Vicino) Elevato (Intermedio) Basso (Lontano) Basso	(Vicino) Elevato (Intermedio) Basso (Lontano) Basso
Uova e larve	>210 dB SELcum >207 dB picco	(Vicino) Moderato (Intermedio) Basso (Lontano) Basso	(Vicino) Moderato (Intermedio) Basso (Lontano) Basso

3.4. Mammiferi marini

Sono essenziali alle periferie uditive dei mammiferi:

- 1) un orecchio esterno che cattura il suono,
- 2) un orecchio medio che filtra ed amplifica i suoni,
- 3) un orecchio interno (coclea) che funge da filtro *band-pass* ed un trasduttore mecanochimico del suono in impulsi neurali.

Quattro adattamenti degli orecchi esterni sono comuni nei cetacei: non ci sono pinne, non ci sono canali esterni pieni d'aria, non ci sono aree racchiuse pneumatizzate, e ossa temporali eccezionalmente dense senza connessioni dirette ossee al teschio. Negli odontoceti il canale esterno è eccezionalmente stretto e bloccato con detriti cellulari. Il canale non ha legami osservabili con le membrane timpaniche o con l'orecchio medio (Ketten, 1994). Le ossa temporali sono sospese dai legamenti in un seno peribollare riempito con una mucosa spugnosa. Questo complesso legamento-mucosa isola l'orecchio dalla conduzione di suoni ossei ed allinea la cavità dell'orecchio medio con due canali specializzati. Un canale relativamente stretto corre anteriormente dall'osso temporale alla linea media della mascella inferiore (Fig. 22). Dati ottenuti dalla risonanza magnetica mostrano che un secondo canale più ampio, diretto lateralmente, a forma di imbuto, si allinea anche con l'orecchio medio. Questo canale può agire anche come un condotto parallelo a bassa frequenza. La mascella inferiore, o mandibola, è considerata il percorso di ricezione principale per segnali ultrasonici negli odontoceti. Norris (1980) osserva che la mascella inferiore degli odontoceti è composta da: un *core* grasso ed un *pan bone* magro

ed ovoidale. Norris (1969) suppone che questo canale mandibolare agisca come un percorso preferenziale a bassa impedenza all'orecchio medio ed il *pan bone* come una finestra acustica alla regione dell'orecchio medio (Varanasi e Malins, 1971). Come gli odontoceti, i misticeti hanno canali esterni occlusi, ma canali tissutali espliciti all'orecchio non sono stati identificati.

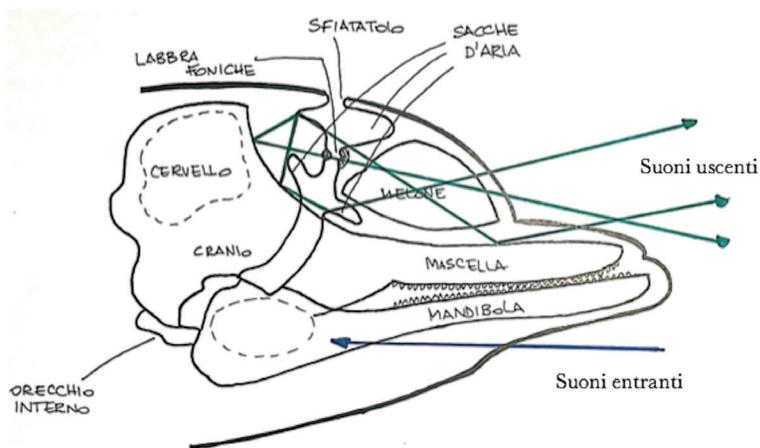


Fig. 22 - Percorso del suono e *feedback* (figura modificata da scientificearthconscientious6.wordpress.com; disegno di Alice Affatati).

3.4.1. Orecchio medio

Gli ossicini degli odontoceti e dei misticeti sono grandi e densi, ma presentano grosse differenze tra specie riguardanti dimensioni, rigidità e forma (Fleischer, 1980). Negli odontoceti, un ponte osseo (*processus gracilis*), fonde il martello alla parete delle giunture timpaniche e interossicolari che sono irrigidite con legamenti e guaina membranosa. Gli ossicini dei misticeti sono ugualmente massivi, ma non hanno le specializzazioni per le alte frequenze degli odontoceti. Gli ossicini non sono fusi con la bolla e la staffa è completamente mobile. Le cavità degli orecchi medi dei misticeti sono sostanzialmente più grandi rispetto a quelle degli odontoceti. La cavità dell'orecchio medio sia negli odontoceti che nei misticeti è allineata con il corpo cavernoso. Di conseguenza, una potenziale difficoltà acustica per un mammifero che si inabissa in profondità, è che la variazione dei volumi dell'orecchio medio può alterare le caratteristiche di risonanza dello stesso e, quindi, variare la sensibilità uditiva.

3.4.2. Orecchio interno

Tutte le coclee dei cetacei hanno tre camere come gli altri mammiferi: dotto cocleare, scala timpanica e scala vestibolare (Ketten, 1992). Nei cetacei, la lunghezza cocleare è in relazione alla dimensione dell'animale, ma non c'è correlazione significativa per lunghezza e frequenza (Ketten, 1992). Spessore e larghezza, comunque, sono fortemente correlati con le capacità uditive (Ketten, 1994). Le coclee degli odontoceti differiscono da quelle degli altri mammiferi perché possiedono dotti cocleari ipertrofici, distribuzioni dense di cellule ganglionari, e dimensioni di membrane basilari uniche.

Molti dei dati ricavati derivano dalla tomografia computerizzata che può visualizzare simultaneamente l'intera testa e l'orecchio interno (Ketten, 2000).

3.4.3. Pinnipedi

L'orecchio medio dei pinnipedi possiede alcune caratteristiche che non possono essere trovate in altri mammiferi terrestri (Repenning, 1972; Richardson *et al.*, 1995). In termini di rilevazione della pressione acustica, gli otaridi sembrano essersi adattati soprattutto a sentire in aria, mentre i focidi si sono generalmente adattati ad un udito anfibio (Kastak e Schusterman, 1998). In aggiunta, a facilitare l'evitamento dei predatori e la cattura delle prede, l'udito nei pinnipedi può anche funzionare nell'orientamento spaziale e nella navigazione. Molti pinnipedi sono attivi di notte o nelle acque torbide dove la visione è di utilità ridotta come un meccanismo di orientazione.

Il diametro del canale dell'orecchio ed i meccanismi di chiusura variano enormemente nei pinnipedi, e l'esatto ruolo del canale nell'udito non è stato chiaramente determinato. Gli otaridi hanno canali esterni con pinne distintive. I focidi, soprattutto *Mirounga angustirostris*, passano più tempo in acqua rispetto alle otarie e non hanno pinne né canali auricolari stretti.

Gli orecchi medi sono capaci di operare completamente pieni di liquido (Repenning, 1972). Il canale auricolare contiene un epitelio cavernoso analogo a quello dell'orecchio medio che può chiudere il canale e regolare la pressione dell'aria durante le discese in profondità (Repenning, 1972). Le orecchie medie dei pinnipedi hanno strati moderati di tessuto cavernoso, ma sono meno sviluppati rispetto a quelli dei cetacei (Repenning, 1972). Nei pinnipedi le catene ossicolarie timpaniche sono diverse: quelle degli otaridi somigliano a quelle dei carnivori terrestri; gli ossicini uditivi dei focidi sono più massicci, ma con grosse variazioni di forma all'interno della specie, che indica un *range* più ampio di frequenze e più enfasi sulla ricezione di basse frequenze rispetto a quelle degli otaridi.

La maggior parte dei pinnipedi ha orecchi interni con spirali multiple (Ramprashad *et al.*, 1973). Ramprashad *et al.* (1973) ha ipotizzato che questo possa facilitare la conduzione ossea del suono, ma il meccanismo non è chiaro.

3.4.4. Sirenidi

Come i cetacei, non hanno pinne. I complessi uditivi dei lamantini sono parzialmente fusi alla parete interna del cranio, ma i percorsi esatti di ricezione del suono non sono conosciuti (Ketten, 1992).

Il sistema dell'orecchio medio dei sirenidi è grande e dominato dalla massa, ma la densità estrema degli ossicini aggiunge rigidità (Ketten, 1992). Gli ossicini sono connessi in modo debole e la staffa è colonnare: una forma comune nei rettili. La membrana timpanica ha due regioni distinte, implicando che i *pattern* di risposta della membrana stessa siano dipendenti dalla frequenza (Pickles, 1982). Il nervo cranico VII che attraversa la cavità dell'orecchio medio è relativamente grande nei lamantini, ma non ha funzione uditiva significativa.

Anatomicamente, gli orecchi interni del lamantino dei Caraibi sono relativamente poco specializzati. La coclea non ha nessuna delle caratteristiche ovvie in relazione all'udito ultra o infra sonico delle orecchie dei cetacei. La struttura basilare della membrana e le distribuzioni neurali sono più vicine a quelle dei pinnipedi o di alcuni mammiferi terrestri rispetto a quelle dei cetacei (Ketten, 1992).

3.5. Tartarughe marine

Poco si sa del loro udito o della loro dipendenza ai suoni. In ogni stadio della vita, le tartarughe marine hanno sostanziali differenze nella forma, funzione e dimensione delle loro orecchie.

Il loro udito può essere considerato nel *range* 400-1000 Hz (Christensen-Dalsgaard *et al.*, 2012). Gli orecchi medi hanno tube di Eustachio strette connesse alla cavità orale. La funzione generale dell'orecchio medio non è definita visto che l'orecchio delle tartarughe è meno sensibile ai suoni aerei. L'ossicino primario, la "columella", è lungo e sottile ed è connesso alla superficie esterna dalla extracolummella a forma di disco che è coperta dalla pelle normale. L'altra parte terminale della columella passa attraverso il tessuto connettivo alla finestra ovale ed è il trasmettitore primario di suono (Wever e Vernon, 1956).

Poco si sa riguardo l'udito delle tartarughe, eccetto che per l'orecchio interno del genere *Trachemys*, che è stato studiato estensivamente a causa della tolleranza alla bassa tensione di ossigeno e, quindi, della fattibilità delle preparazioni *in vitro* degli orecchi interni e del cervello. Il timpano consiste di pelle relativamente sottile che copre uno strato di derma delicato collegato con un disco cartilagineo timpanico che forma il corpo principale dell'extracolummella. L'extracolummella è collegata ai bordi interni da un legamento posteriore che agisce come un legamento sottile anteriore. Le due cavità simmetriche grandi e bilaterali sono ovoidali con gli assi maggiori diretti antero-posteriormente. Il volume dello spazio pneumatizzato della cavità varia a seconda della massa dell'animale.

3.6. *Rischio da esposizione sonora per le popolazioni di animali*

È necessario classificare le specie chiave e quelle probabilmente colpite da suoni particolari. Boehlert e Gill (2010) definiscono gli effetti come l'ampia gamma di variazioni potenzialmente misurabili negli individui e nei gruppi di animali come risultato dell'esposizione sonora. Gli impatti sono gli effetti che diventano importanti quando si parla di danno ecologico, quindi hanno a che fare con la severità, l'intensità, la durata dell'effetto sulle popolazioni animali e le comunità ecologiche.

Esperimenti recenti mostrano che:

- 1) il rumore deve provocare dolore per causare perdita dell'udito permanente;
- 2) il danno è approssimativamente proporzionale all'energia del rumore integrato sul tempo;
- 3) il rumore ad alta frequenza è più dannoso rispetto al rumore a bassa frequenza;
- 4) il rumore a banda stretta è più pericoloso rispetto al rumore a banda larga;
- 5) c'è grande variabilità individuale nella resistenza al rumore anche tra animali geneticamente identici.

Nonostante la mancanza di dati per i mammiferi marini, alcuni commenti generali possono essere tratti riguardo l'impatto del rumore sugli organismi acquatici introducendo il concetto di zone di influenza (Richardson *et al.*, 1995; Gisiner, 1998). L'effetto del rumore sugli animali dipende in larga parte dalla prossimità dell'animale alla fonte del rumore ed il livello ricevuto del segnale da parte dell'animale. A distanze molto brevi (che devono essere ancora quantificate), una fonte sufficientemente forte può causare danno fisiologico severo ed, eventualmente, morte. A distanze maggiori, la divergenza geometrica e l'assorbimento riducono sostanzialmente il livello del segnale e la stessa fonte può causare perdita uditiva e variazioni comportamentali nel breve periodo, che possono portare a morte solo in particolari circostanze (Evans e England, 2001).

3.7. *Valutazione dell'impatto del suono sottomarino*

Il modello a zone di influenza (Fig. 23) creato da Richardson *et al.* (1995) è basato sulla distanza tra la fonte ed il ricevente. L'intensità del suono decade con l'aumentare della distanza dalla

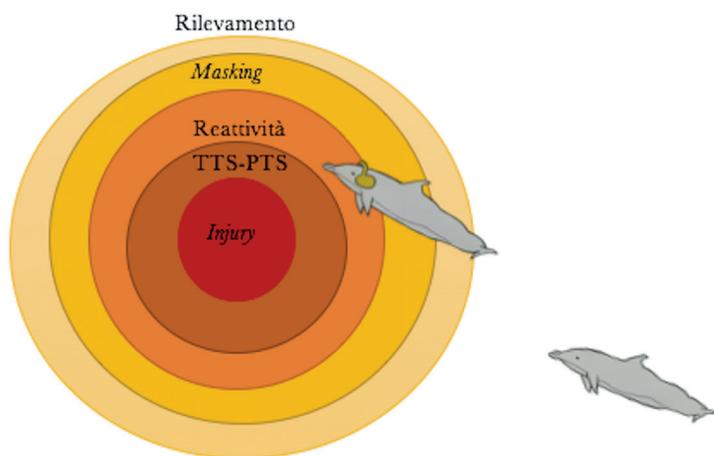


Fig. 23 - Zone di influenza basate su Richardson *et al.* (1995); (disegno di Alice Affatati).

fonte sonora: è, quindi, probabile che gli impatti diminuiscano o, almeno, varino con l'aumentare della distanza.

La zona di rilevamento o udibilità è quella più spazialmente estesa ed è definita dall'abilità del ricevente di rilevare il suono. Ulteriori fattori sono: la frequenza del suono emesso e condizioni locali come la temperatura dell'acqua, la viscosità, la densità, la profondità e le condizioni del fondale. Le zone di udibilità possono essere, quindi, molto variabili e non descrivono un effetto (Au, 1993).

La zona di *masking* è l'area dove il suono interferisce con il rilevamento di segnali biologicamente rilevanti come i *clicks* di ecolocalizzazione o i segnali sociali. Il rumore può, parzialmente o interamente, ridurre l'udibilità del segnale. Questa zona è altamente variabile: il grado di *masking* è influenzato dalle capacità uditive dell'organismo e dalla banda di frequenza del rumore di fondo. Per esempio, il *masking* dei suoni di alta frequenza può essere di maggior significato per alcuni organismi rispetto ai suoni a bassa frequenza, mentre il contrario può essere vero per alcune specie (Greenwood, 1961).

La zona di reattività è l'area all'interno della quale il ricevitore reagisce al suono. Questa zona è normalmente più piccola rispetto a quella di udibilità ed è più complicata da stimare visto che richiede la conoscenza delle variazioni del comportamento dell'animale. Inoltre, le soglie delle variazioni di comportamento possono essere diverse da individuo a individuo (Richardson *et al.*, 1995).

Le zone di *temporary threshold shift (TTS)*, *permanent threshold shift (PTS)* e *injury* indicano l'estensione spaziale alla quale l'esposizione al suono porta effetti fisiologici. Gli animali esposti ad un suono sufficientemente intenso esibiscono un innalzamento della soglia uditiva per un dato periodo di tempo in seguito all'esposizione: *noise-induced threshold shift (TS)*. Fattori che influenzano la quantità di TS includono: l'ampiezza, la durata, il contenuto di frequenza e la distribuzione di energia dell'esposizione al rumore. La grandezza di TS diminuisce normalmente nel tempo a seguito di una cessazione di esposizione al rumore. Se TS ritorna allo zero è detta TTS. Una TTS comprende un'elevazione temporanea delle soglie uditive dovute all'esposizione al suono. Quando questi cambiamenti risultano in TTS, piuttosto che in una variazione permanente nella sensibilità sensoriale, essi rimangono all'interno dei confini nominali della variabilità fisiologica e della tolleranza e non rappresentano danni fisici. Se TS non ritorna a zero dopo un lungo intervallo, la TS residua è detta *noise-induced permanent threshold shift (PTS)*. PTS è considerata

una ferita uditiva permanente. Molti studi su TTS da esposizione a rumore non impulsivo sono stati condotti su varie specie di cetacei odontoceti inclusi i tursiopi (Finneran *et al.*, 2002; Mooney *et al.*, 2009), i beluga (Popov *et al.*, 2014), le focene (Kastelein *et al.*, 2014, 2015), le neofocene (Popov *et al.*, 2011) ed i pinnipedi (Kastak *et al.*, 2007; Kastelein *et al.*, 2012, 2013). Alcuni studi sono stati condotti anche usando fonti di rumore impulsivo. Sono in numero più limitato perché ci sono difficoltà metodologiche nel generare questi suoni in laboratorio.

La zona di *injury* è definita da livelli di pressione sonora così elevati che l'animale può soffrire danni fisici o perdita di sensibilità nel sistema uditivo (Popper e Hastings, 2009).

La probabilità di danni seri diventa elevata quando i livelli di pressione sonora ricevuti superano i 180 dB re 1 μ Pa (RMS) per i cetacei e 190 dB re 1 μ Pa (RMS) per i pinnipedi (Southall *et al.*, 2019). Il criterio di 180 dB può presentare criticità nel caso in cui si debbano confrontare gli impatti di suoni transitori e continui.

I possibili effetti di esposizione al suono sono:

- morte: la mortalità ha un effetto diretto sulle popolazioni animali, specialmente sugli individui vicino alla maturità;
- effetti fisiologici e/o fisici: danni fisici o fisiologici come quelli ai tessuti sono risolvibili, ma possono indebolire gli animali, rendendoli più suscettibili alla predazione, finché non si ristabiliscono;
- problemi di udito: variazioni brevi o di lunga durata nella sensibilità uditiva possono, o meno, ridurre il *fitness* e la sopravvivenza. Riduzioni di udito possono inficiare l'abilità degli animali di catturare le prede ed evitare i predatori e deteriorare la comunicazione tra individui;
- *masking*: la presenza di suoni prodotti dall'uomo può rendere difficile rilevare suoni biologici significativi rispetto al rumore di fondo. Il *masking* dei suoni prodotti dagli organismi preda possono risultare nella riduzione dei foraggiamenti con effetti sulla crescita, mentre il *masking* dei suoni prodotti dai predatori può risultare in ridotta sopravvivenza;
- risposte comportamentali: variazioni nel comportamento possono avvenire in molti animali esposti al suono e possono causare problematiche serie, tra cui spostamento dai loro habitat preferiti e variazioni nei *pattern* di predazione.

La stessa fonte acustica può avere effetti radicalmente diversi a seconda delle variabili operazionali e ambientali, sulle caratteristiche fisiologiche, sensoriali e psicologiche degli animali esposti. È importante notare che queste variabili possono differire enormemente tra gli individui di una specie ed a seconda di vari fattori tra cui sesso, età, storia precedente, stagione, attività dell'animale (Wartzok *et al.*, 2004).

Quando un suono può essere percepito in mezzo al rumore di fondo, esso è considerato udibile. L'udibilità è determinata dalle caratteristiche del suono ricevuto, dalle caratteristiche del sistema ricevente e dalle condizioni del rumore di fondo. Le capacità dell'udito dei mammiferi marini sono quantificate nei soggetti vivi usando audiometria comportamentale e tecniche elettrofisiologiche (André e Nachtigall, 2007).

Gli audiogrammi comportamentali sono ottenuti da animali addestrati in cattività usando procedure psicometriche standard. Siccome i mammiferi marini sono difficili da mantenere in cattività, gli audiogrammi sono tipicamente basati su pochi individui. Inoltre, i soggetti sono, in genere, ottenuti opportunisticamente piuttosto che in modo casuale da popolazioni naturali. Ciò può produrre una rappresentazione di udito non "normale" per le specie se gli animali riabilitati hanno

capacità di udito compromesse (André *et al.*, 2007). Inoltre, differenze individuali nella sensibilità uditiva tra i soggetti e di metodologie tra gli investigatori, può portare a trarre conclusioni errate (Hall e Johnson, 1972). Un audiogramma può essere usato per valutare se un animale sarà capace di udire un particolare suono basato sulle capacità uditive della specie. L'audiogramma è composto da una serie di soglie di rilevamento per segnali a bande strette e larghe ottenute attraverso un *range* di frequenze sonore, e ciò è generalmente raffigurato come una curva di sensibilità continua. Gli audiogrammi dei mammiferi esibiscono una forma a U con una regione di frequenza di maggior sensibilità che decade a frequenze distali più elevate e meno elevate. Gli audiogrammi sono misurati in condizioni di quiete, cioè in condizioni che permettano la sensibilità migliore che possa essere misurata in assenza di interferenza, permettendo una comparazione diretta tra animali. Gli audiogrammi sono ottenuti utilizzando metodi comportamentali o neurologici. Le soglie comportamentali uditive sono misurate da individui in cattività addestrati a riportare la rilevazione di indizi uditivi, le soglie fisiologiche sono stimate da potenziali evocati uditivi (AEP) registrati dal sistema nervoso. I metodi comportamentali sono impegnativi dal punto di vista delle risorse e del tempo impiegato e, perciò, limitano gli studi ad una certa tipologia di specie di piccola taglia che possano essere mantenute in cattività. Gli AEP non possono, generalmente, essere ottenuti da animali grandi con sensibilità uditive a basse frequenze (Fig. 24), come i mysticeti (Houser *et al.*, 2008).

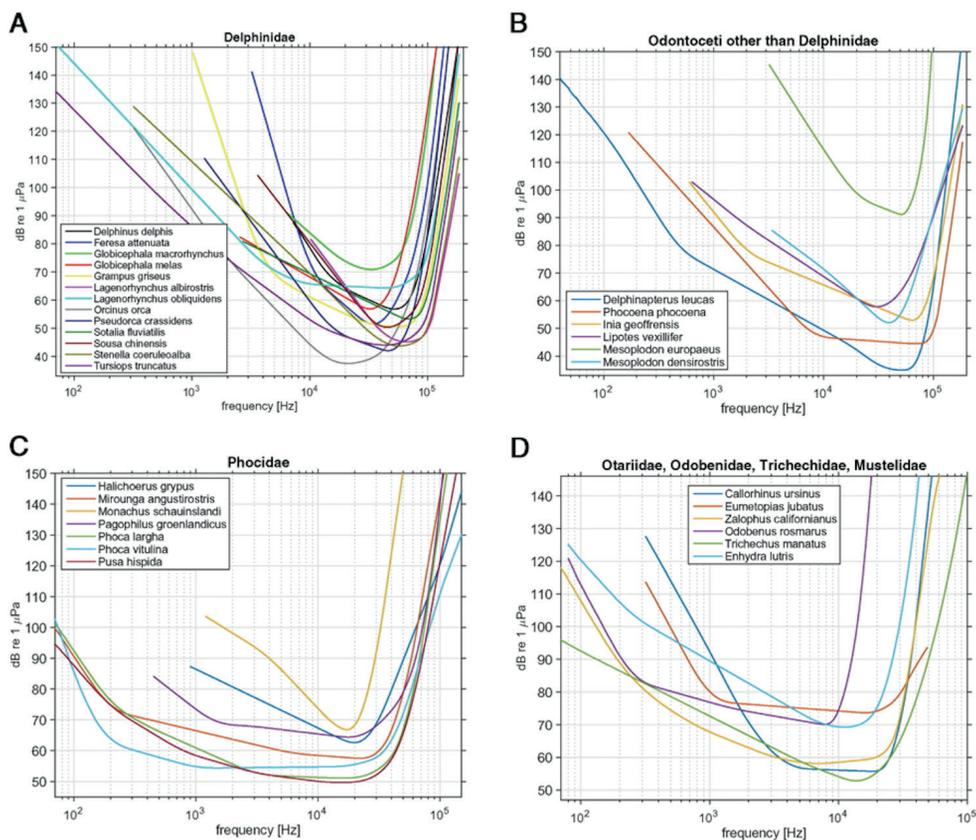


Fig. 24 - Audiogrammi uditivi dei livelli minimi misurati per alcune specie marine (*fitting* eseguito con un punto stazionario). Soglie uditive al di sotto di 1 kHz non sono spesso disponibili, ma probabilmente tutti i mammiferi marini sentono al di sotto di 1 kHz (Erbe *et al.*, 2016).

Sono identificati otto gruppi uditivi discreti (vedi Tabella 8):

- 1) cetacei – bassa frequenza (LF),
- 2) cetacei – alta frequenza (HF),
- 3) cetacei – frequenza molto elevata (VHF),
- 4) sirenidi (SI),
- 5) focidi carnivori in acqua (PCW),
- 6) focidi carnivori in aria (PCA),
- 7) altri carnivori marini in acqua (OCW),
- 8) altri carnivori marini in aria (OCA).

Tabella 8 - Gruppi uditivi dei mammiferi marini (tabella modificata da Southall *et al.*, 2019).

Gruppo uditivo	Famiglia
Cetacei- bassa frequenza	Balaenidae, Balaenopteridae, Neobalenidae, Eschrichtiidae
Cetacei- alta frequenza	Physeteridae, Ziphiidae, Delphinidae, Montodontidae, Platanistidae
Cetacei- frequenza molto alta	Delphinidae, Phocoenidae, Iniidae, Kogiidae, Lipotidae, Pontoporiidae
Sirenidi	Trichechidae, Dugongidae
Focidi carnivori	Phocidae
Altri carnivori marini	Odobenidae, Otariidae, Ursidae, Mustelidae

Le risposte comportamentali al suono sono altamente variabili e riferite al contesto (Wartzok *et al.*, 2004). Alcuni suoni che sono udibili per gli animali spesso non suscitano alcuna risposta comportamentale manifesta. Ciò è più comune quando il suono non eccede di molto il minimo livello rilevabile e non è in aumento o fluttuante (Richardson *et al.*, 1995). L'inabilità di rilevare una risposta manifesta non significa che non ci sia un effetto sul comportamento. Le risposte comportamentali dipendono dai principi di assuefazione e sensibilizzazione. Ciò include la percezione della prossimità della fonte, il movimento relativo, e la familiarità, che possono inficiare il tipo di risposta comportamentale risultante. Se una fonte è percepita in avvicinamento la risposta è spesso più forte. Ci sono altri fattori da considerare: animali che non esibiscono comportamenti di evitamento quando vengono esposti a certi tipi di fonti possono anche sentire il suono, ma possono essersi abituati o non manifestare una risposta.

Gli animali non percepiscono bene tutte le frequenze all'interno del loro *range* uditivo. Le funzioni generalizzate sono derivate per ogni gruppo funzionale dei mammiferi marini usando principi provenienti dai paradigmi di *human frequency-weighting*, con aggiustamenti per le larghezze di banda dei vari gruppi. Queste curve uditive sono necessarie, altrimenti fonti sonore a basse ed alte frequenze non sarebbero udite e potrebbero generare dati poco realistici. I danni acustici dovrebbero accadere solo a livelli ben al di sopra della soglia di rilevamento, cioè a livelli per i quali l'effetto di appiattimento è atteso. Quindi non è chiaro quanto siano utili o appropriate le funzioni di soglia uditiva nel derivare i filtri di *frequency-weighting* nei mammiferi marini per i quali misure di *psychophysical equal-loudness* sono generalmente non disponibili (Ridgway e Carder, 2000). I dati limitati di TTS per i cetacei esposti ai toni a frequenze differenti suggeriscono che una *frequency-weighting function* basata su audiogrammi produrrebbe troppo filtro a basse frequenze. Una procedura cautelativa è stata usata per derivare *weighting functions* per i

mammiferi marini a frequenze specifiche, queste funzioni sono segnalate con “M” per mammiferi marini e sono simili alle *C-weighting functions* per gli umani, usate per misurare suoni ad ampiezze elevate.

Le *weighting functions* sono simili ai filtri *band-pass*: includono una regione centrale che corrisponde alla maggior suscettibilità al rumore assieme a regioni a minore e maggiore frequenza dove la suscettibilità relativa è minore (Fig. 25). Gli effetti su un animale sono determinati dal primo *weighting* dell'esposizione al rumore filtrando il rumore usando queste funzioni. Il livello di esposizione pesato è confrontato con la soglia pesata - per TTS o PTS - che rappresenta il livello di esposizione richiesto per l'insorgenza di TTS/PTS a frequenze dove la funzione ha un'ampiezza di 0 dB.

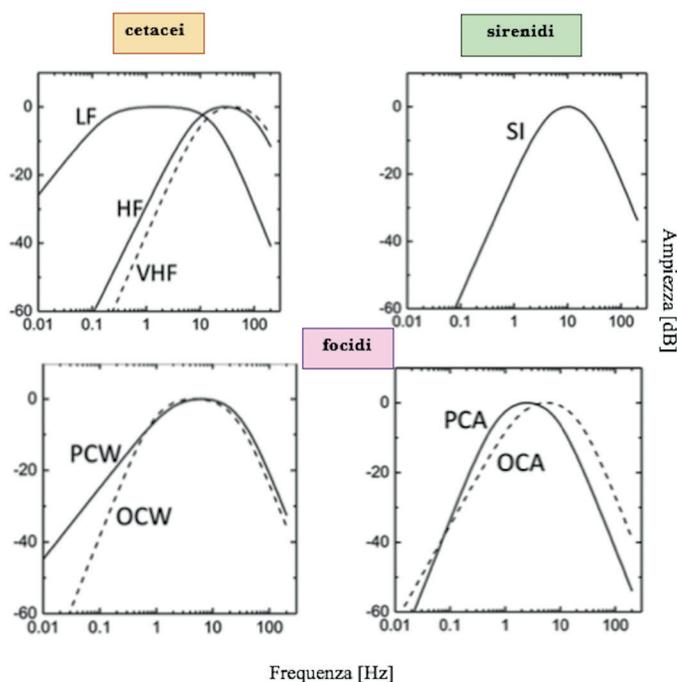


Fig. 25 - Dall'alto a sinistra ed in senso orario: *weighting functions* per cetacei a frequenza molto alta, alta e bassa, sireni, focidi carnivori in acqua (PWC o OCW) ed in aria (PCA, OCA) (figure modificate da Southall *et al.*, 2019).

Per tener conto di tutti gli aspetti potenzialmente dannosi dell'esposizione, si stabiliscono doppi criteri per i danni per ogni gruppo uditivo basato su pressioni di picco (*unweighted*) ed energia totale (*M-weighted*). I criteri di esposizione per i danni sono dati per due tipi di suoni, impulsivi e non impulsivi, e per esposizioni singole e multiple.

L'udito dei mammiferi è danneggiato soprattutto da suoni transitori con tempo di insorgenza rapido, elevate pressioni di picco e durata sostenuta relativa to *rise-time* consistente con questi risultati e *kurtosis* (Finneran *et al.*, 2002).

Finneran (2016) ha proposto procedure sistematiche per generare criteri di insorgenza di TTS e PTS di esposizione al rumore. Vengono proposti due criteri metrici (*frequency-weighted SEL* e *unweighted peak SPL*) per i segnali impulsivi per tutti i gruppi di mammiferi marini a seconda dell'effetto previsto (TTS o PTS). Per suoni non impulsivi, si presentano solo metriche pesate SEL che forniscono anche un mezzo per integrare le esposizioni cumulative (Southall *et al.*, 2007; Finneran, 2015).

3.7.1. Criteri TTS e PTS per esposizione di rumore non-impulsivo

Le soglie di esposizione pesate per insorgenze di TTS non-impulsive si basano sul minimo delle funzioni di esposizione TTS.

Per stimare i criteri di insorgenza di PTS per rumore non impulsivo in termini di SEL, viene usato un livello di esposizione di 20 dB al di sopra del livello di insorgenza di TTS (6 dB TTS) per ogni gruppo di mammiferi marini (Finneran, 2015). La Tabella 9 indica, la SEL non impulsiva per criteri di insorgenza TTS e PTS per tutti i gruppi uditivi di mammiferi marini.

Tabella 9 - Soglie per l'insorgenza di TTS e PTS per i mammiferi marini esposti a rumore non impulsivo. SEL: dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ in acqua e dB re $20\mu\text{Pa}^2\text{s}$ in aria (solo per PCA e OCA), (tabella modificata da Southall *et al.*, 2019).

Gruppo uditivo	TTS: SEL (<i>weighted</i>)	PTS: SEL (<i>weighted</i>)
Cetacei- bassa frequenza	179	199
Cetacei- alta frequenza	178	198
Cetacei- frequenza molto alta	153	173
Sirenidi	186	206
Focidi carnivori in acqua	181	201
Altri carnivori marini in acqua	199	219
Focidi carnivori in aria	134	154
Altri carnivori marini in aria	157	177

3.7.2 Criteri TTS e PTS per esposizione al rumore impulsivo

Ci sono dati estremamente limitati riguardanti l'insorgenza del rumore impulsivo per i mammiferi marini su un *range* di condizioni di frequenze espositive con le quali vengono valutati (Finneran, 2015), sebbene i dati esistenti non siano coerenti con questa ipotesi (Tabella 10). Per specie per le quali i dati TTS impulsivi sono disponibili (cetacei HF e VHF), le soglie TTS del rumore impulsivo SEL vengono determinate applicando ai gruppi specifici *weighting functions* alla forma d'onda

Tabella 10 - Soglie per l'insorgenza di TTS e PTS per i mammiferi marini esposti a rumore impulsivo. SEL: dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ in acqua e dB re $20\mu\text{Pa}^2\text{s}$ in aria (solo per PCA e OCA) e soglie id picco SPL in dB re $1\mu\text{Pa}$ in acqua e dB re $20\mu\text{Pa}$ in aria; (tabella modificata da Southall *et al.*, 2019).

Gruppo uditivo	TTS: SEL (<i>weighted</i>)	TTS: peak SEL (<i>unweighted</i>)	PTS: SEL (<i>weighted</i>)	PTS: peak SEL (<i>unweighted</i>)
Cetacei- bassa frequenza	168	213	183	219
Cetacei- alta frequenza	170	224	1852	230
Cetacei- frequenza molto alta	140	196	155	202
Sirenidi	175	220	190	226
Focidi carnivori in acqua	170	212	185	218
Altri carnivori marini in acqua	188	226	203	232
Focidi carnivori in aria	123	138	138	144
Altri carnivori marini in aria	146	161	161	167

che produce TTS e poi calcolando le SEL pesate associate. Per le specie per le quali non esistono dati di insorgenza impulsivi TTS, le soglie pesate SEL vengono stimate usando la relazione tra la soglia d'insorgenza del rumore mediano non impulsivo TTS e la soglia mediata impulsiva TTS pesata per i gruppi HF e VHF (Southall *et al.*, 2007). In Southall *et al.* (2007, 2019) – considerati i testi di riferimento per l'argomento – si utilizza un approccio a doppia metrica per lo stimolo impulsivo e la soglia pesata SEL è usata in congiunzione con la soglia non pesata di picco SPL.

I criteri di esposizione proposti per insorgenza di TTS e PTS per esposizioni al rumore impulsivo non sono derivate usando i valori della mediana dei dati disponibili nelle varie aree. Si crede che ciò fornisca la miglior stima possibile di questi effetti nelle varie specie.

3.7.3. Cetacei-bassa frequenza

I dati audiometrici che forniscono informazioni sui dati di frequenza non sono disponibili per i mysticeti. Alcune distinzioni sono disponibili in base a numerosi fattori tra cui: dimensione, limiti eccezionali di bassa frequenza della riproduzione del suono, ecc. (Ketten *et al.*, 2016) (Tabella 11).

Tabella 11 - *Weighting functions* cetacei LF soglie per l'insorgenza di TTS e PTS per i mammiferi marini esposti a rumore impulsivo. SEL: dB re 1µPa²s in acqua e dB re 20µPa²s in aria (solo per PCA e OCA) e soglie di picco SPL in dB re 1µPa in acqua e dB re 20µPa in aria; (tabella modificata da Southall *et al.*, 2019).

Taxon	Orecchio	Produzione del suono	Referenze
<i>Balaena mysticetus</i>	Orecchio medio (misticeti)	0.02 (moan)-6 kHz (warble)	Audiometria: no dati Acustica: Ljungblad <i>et al.</i> , 1980, 1982; Clark e Johnson, 1984; Cummings e Holliday, 1987; Würsig e Clark, 1993; Blackwell <i>et al.</i> , 2007; Stafford <i>et al.</i> , 2008; Delarue <i>et al.</i> , 2009; Tervo <i>et al.</i> , 2009, 2011, 2012
<i>Eubalaena australis</i>	Orecchio medio (misticeti)	0.02 (pulse) 2.2 kHz (pulse, belch)	Audiometria: no dati Acustica: Cummings <i>et al.</i> , 1971, 1972, 1974; Payne e Payne, 1971; Saayman e Tayler, 1973; Clark, 1982; Parks <i>et al.</i> , 2007
<i>Eubalaena glacialis</i>	Orecchio medio (misticeti)	0.02 22 kHz (gunshot)	Audiometria: no dati Acustica: Matthews <i>et al.</i> , 2001; McDonald e Moore, 2002; Vanderlaan <i>et al.</i> , 2003; Parks e Tyack, 2005; Parks <i>et al.</i> , 2007a; Trygonis <i>et al.</i> , 2013
<i>Balaenoptera acutorostrata</i>	Orecchio medio (misticeti)	0.09 9 kHz (boing)	Audiometria: no dati Acustica: Beamish e Mitchell, 1973; Edds-Walton, 2000; Mellinger <i>et al.</i> , 2000; Gedamke <i>et al.</i> , 2001; Rankin e Barlow, 2005; Oswald <i>et al.</i> , 2011; Risch <i>et al.</i> , 2014
<i>Balaenoptera edeni</i>	Orecchio medio (misticeti)	0.1 (LF tonal) 0.9 kHz (pulsed moan)	Audiometria: no dati Acustica: Edds <i>et al.</i> , 1993; Oleson <i>et al.</i> , 2003; Heimlich <i>et al.</i> , 2005; Figueiredo, 2014; Rice <i>et al.</i> , 2014; Širović <i>et al.</i> , 2014; Vilorio-Gómora <i>et al.</i> , 2015
<i>Balaenoptera physalus</i>	Orecchio medio (misticeti)	0.01 (rumble, thud, 20-Hz signal) 1 kHz (slam)	Audiometria: no dati Acustica: Watkins <i>et al.</i> , 1987; Edds, 1988; Thompson <i>et al.</i> , 1992; McDonald <i>et al.</i> , 1995a; Charif <i>et al.</i> , 2002; Širović <i>et al.</i> , 2007, 2013; Weirathmueller <i>et al.</i> , 2013
<i>Megaptera novaeangliae</i>	Orecchio medio (misticeti)	0.02 (moan, grunt, creak, pulse train) 24 kHz (mid-frequency tonal wail)	Audiometria: no dati Acustica: Hafner <i>et al.</i> , 1979; Payne e Payne, 1985; Thompson <i>et al.</i> , 1986; Simão e Moreira, 2005; Au <i>et al.</i> , 2006; Dunlop <i>et al.</i> , 2007; Stimpert <i>et al.</i> , 2007, 2011; Zoidis <i>et al.</i> , 2008

3.7.4. Cetacei - alta frequenza

Il *range* di frequenza più ampio riportato per ogni specie è fornito per segnali sociali (SOC). Per segnali di ecolocalizzazione (ECH) il *range* della mediana delle frequenze è fornito dove possibile, (Tabella 12-13).

Tabella 12 - *Weighting function* cetacei HF soglie per l'insorgenza di TTS e PTS per i mammiferi marini esposti a rumore impulsivo. SEL: dB re 1 μ Pa²s in acqua e dB re 20 μ Pa²s in aria (solo per PCA e OCA) e soglie di picco SPL in dB re 1 μ Pa in acqua e dB re 20 μ Pa in aria; BBHF= broad band high frequency; (tabella modificata da Southall *et al.*, 2019).

Taxon	Audiometria	Tipo di orecchio	Produzione di suono	Tipo di click	Referenze
<i>Physeter macrocephalus</i>	-	Physeteroid orecchio medio	SOC: 0.4 (squeal) MP - 9 kHz (coda) ECH: 3 - 26 kHz*	MP	Audiometria: No data Acustica: Backus e Schevill, 1966; Levenson, 1974; Watkins e Schevill, 1977, 1980; Watkins, 1980; Weilgart e Whitehead, 1988; Goold e Jones, 1995; Madsen <i>et al.</i> , 2002; Møhl <i>et al.</i> , 2003; Weir <i>et al.</i> , 2007
<i>Mesoplodon grayi</i>	-	Physeteroid orecchio medio			Audiometria: No data Acustica: no dati
<i>Ziphius cavirostris</i>		Physeteroid orecchio medio	ECH: 28-47 kHz*	FM	Audiometria: No dati Acustica: Frantzis <i>et al.</i> , 2002; Zimmer <i>et al.</i> , 2005; Baumann-Pickering <i>et al.</i> , 2013
<i>Orcinus orca</i>	BEH: 0.2 - 140 kHz AEP: < 1 - 90 kHz	Odontocete orecchio medio	SOC: 0.1 (click burst) - 75 kHz (ultrasonic whistles) ECH: 22 - 80 kHz*	BBHF	Acustica: Schevill e Watkins, 1966; Diercks <i>et al.</i> , 1971; Steiner <i>et al.</i> , 1979; Dahlheim e Awbrey, 1982; Ford e Fisher, 1983; Hoelzel e Osborne, 1986; Morton <i>et al.</i> , 1986; Moore <i>et al.</i> , 1988; Ford, 1989; Barrett-Lennard <i>et al.</i> , 1996; Thomsen <i>et al.</i> , 2001; Au <i>et al.</i> , 2004; Van Opzeeland <i>et al.</i> , 2005; Miller, 2006; Riesch <i>et al.</i> , 2006, 2008; Simon e Ugarte, 2006; Simon <i>et al.</i> , 2007; Samarra <i>et al.</i> , 2010; Riesch e Deecke, 2011; Simonis <i>et al.</i> , 2012
<i>Delphinapterus leucas</i>	BEH: 0.04 to 130 kHz AEP: < 4 - 150 kHz	Odontocete orecchio medio			Acustica: Kamminga e Wiersma, 1981; Sjare e Smith, 1986; Au <i>et al.</i> , 1987; Turl <i>et al.</i> , 1991; Belikov e Bel'kovich, 2001, 2005, 2006, 2007; Karlsen <i>et al.</i> , 2001; Rutenko e Vishnyakov, 2006; Lammers e Castellote, 2009; Chmel'nitsky e Ferguson, 2012
<i>Monodon monoceros</i>		Odontocete orecchio medio	SOC: 0.3 (whistle, pulsed calls) - 24kHz (pulsed calls) ECH: 53 kHz*(mean)	BBHF	Acustica: Watkins <i>et al.</i> , 1971; Ford e Fisher, 1978; Miller <i>et al.</i> , 1995; Shapiro, 2006; Stafford <i>et al.</i> , 2012; Rasmussen <i>et al.</i> , 2015
<i>Grampus griseus</i>	BEH: 1.6 - 100 kHz ² AEP: < 4 - 142 kHz	Odontocete orecchio medio	SOC: 0.1 (grunt) - 29 kHz (whistle) ECH: 24 - 131 kHz*	BBHF	Acustica: Au, 1993; Rendell <i>et al.</i> , 1999; Corkeron <i>et al.</i> , 2001; Philips <i>et al.</i> , 2003; Madsen, 2004; Soldevilla <i>et al.</i> , 2008; Smith <i>et al.</i> , 2016
<i>Pseudorca crassidens</i>	BEH: 2 - 111 kHz AEP: < 4 - > 45 kHz	Odontocete orecchio medio	SOC: 3 (whistle) - 9 kHz (whistle) ECH: 25 - 87 kHz*	BBHF	Acustica: Mizue <i>et al.</i> , 1969; Kamminga e van Velden, 1987; Thomas <i>et al.</i> , 1988; Thomas e Turl, 1990; Brill <i>et al.</i> , 1992; Au <i>et al.</i> , 1995; Murray <i>et al.</i> , 1998; Rendell <i>et al.</i> , 1999; Oswald <i>et al.</i> , 2003; Madsen, 2004; Kloepper <i>et al.</i> , 2012; Madsen <i>et al.</i> , 2013; Baumann-Pickering <i>et al.</i> , 2015
<i>Tursiops truncatus</i>	BEH: 0.4 - 146 kHz AEP: < 5 - 169 kHz	Odontocete orecchio medio	SOC: 0.1 (thunk) - 165 kHz (creak) ECH: 23 - 102 kHz*	BBHF	Acustica: Lilly e Miller, 1961; Evans e Prescott, 1962; Lilly, 1963; Caldwell e Caldwell, 1968, 1979; Diercks <i>et al.</i> , 1971; Evans, 1973; Au <i>et al.</i> , 1974; Fish e Turl, 1976; Kamminga, 1979; Au e Penner, 1981; Steiner, 1981; Au <i>et al.</i> , 1982; Wiersma, 1982; dos Santos <i>et al.</i> , 1990; Au, 1993, 2004; Jacobs <i>et al.</i> , 1993; Ding <i>et al.</i> , 1995; McCowan e Reiss, 1995; Schultz <i>et al.</i> , 1995; Connor e Smolker, 1996; Blomqvist e Amundin, 2004; Boisseau, 2005; Azevedo <i>et al.</i> , 2007; van der Woude, 2009; Hawkins, 2010; Simard <i>et al.</i> , 2011; Wahlberg <i>et al.</i> , 2011b; Branstetter <i>et al.</i> , 2012; Azzolin <i>et al.</i> , 2014; Frankel <i>et al.</i> , 2014; Buscaino <i>et al.</i> , 2015; Gridley <i>et al.</i> , 2015

3.7.5. Cetacei – frequenze molto elevate

Tabella 13 - *Weighting functions* cetacei VHF soglie per l'insorgenza di TTS e PTS per i mammiferi marini esposti a rumore impulsivo. SEL: dB re 1µPa²s in acqua e dB re 20µPa²s in aria (solo per PCA e OCA) e soglie di picco SPL in dB re 1µPa in acqua e dB re 20µPa in aria; NBHF= narrow band high frequency; (tabella modificata da Southall *et al.*, 2019).

Taxon	Audiometria	Tipo di orecchio	Produzione di suono	Tipo di click	Referenze
<i>Cephalorhynchus heavisidii</i>	-	Orecchio medio	SOC: 0.8-4.5kHz (cries) ECH: 121-130 kHz*	NBHF	Audiometria: No dati Acustica: Watkins <i>et al.</i> , 1977; Morisaka <i>et al.</i> , 2011
<i>Phocoena phocoena</i>	BEH: 0.3 - 160 kHz AEP: < 10 - 160 kHz		SOC: no evidenza ECH: 125 - 200 kHz*	NBHF	Acustica: Busnel e Dziedzic, 1966; Schevill <i>et al.</i> , 1969; Dubrovskii <i>et al.</i> , 1971; Møhl e Andersen, 1973; Kamminga e Wiersma, 1981; Wiersma, 1982; Verboom e Kastelein, 1995; Au <i>et al.</i> , 1999; Kastelein <i>et al.</i> , 1999; Teilmann <i>et al.</i> , 2002; Villadsgaard <i>et al.</i> , 2007; Hansen <i>et al.</i> , 2008; Madsen <i>et al.</i> , 2010; Clausen <i>et al.</i> , 2011; Kyhn <i>et al.</i> , 2013

3.7.6. Sirenidi, focidi carnivori ed altri mammiferi marini carnivori (Tabella 14)

Tabella 14 - *Weighting functions* dei sirenidi, dei focidi carnivori in acqua, in aria e di altri mammiferi; soglie per l'insorgenza di TTS e PTS, soglie di picco SPL in dB re 1µPa in acqua e dB re 20µPa in aria; (tabella modificata da Southall *et al.*, 2019).

Taxon	Audiometria	Tipo di orecchio	Produzione di suono	Referenze
<i>Trichechus senegalensis</i>	-	Tipo sirenide	-	Audiometria: no dati Acustica: no dati
<i>Dugong dugong</i>	-	Tipo sirenide	0.15 (squeak) - 18 kHz (trills, chirp-squeak)	Audiometria: no dati. Acustica: Nair e Lal Mohan, 1975; Marsh <i>et al.</i> , 1978; Anderson e Barclay, 1995; Ichikawa <i>et al.</i> , 2003; Hishimoto <i>et al.</i> , 2005; Parsons <i>et al.</i> , 2013
<i>Halichoerus grypus</i>	AEP: < 1.4 - 100 kHz	Focidi	< 0.1 (click, hiss) - 40 kHz (hiss)	Audiometria: no dati. Acustica: Schevill <i>et al.</i> , 1963; Schusterman <i>et al.</i> , 1970; Oliver, 1978; Asselin <i>et al.</i> , 1993
<i>Hydrurga leptonyx</i>	-	Focidi	0.04 (growl, thump pulse) - 164 kHz (FM buzz)	Audiometria: no dati Acustica: Poulter, 1968; Stirling e Siniff, 1979a; Thomas <i>et al.</i> , 1983; Rogers <i>et al.</i> , 1995, 1996; Thomas e Golladay, 1995; Rogers e Cato, 2002; Kreiss <i>et al.</i> , 2014; Rogers, 2014
<i>Leptonychotes weddellii</i>	-	Focidi	0.1 (short duration calls) - 15 kHz (unspecified)	Audiometria: no dati. Acustica: Thomas e Kuechle, 1982; Thomas e Stirling, 1983; Green e Burton, 1988; Morrice <i>et al.</i> , 1994; Pahl <i>et al.</i> , 1997; Evans <i>et al.</i> , 2004; Moors e Terhune, 2004, 2005; Terhune, 2004; Terhune e Dell'Apa, 2006; Terhune <i>et al.</i> , 2008; Doiron <i>et al.</i> , 2012
<i>Phoca vitulina</i>	BEH:<0.1-79kHz	Focidi	0.02 (roar) -24 kHz (roar)	Acustica: Schevill <i>et al.</i> , 1963; Schusterman <i>et al.</i> , 1970; Perry e Renouf, 1988; Hanggi e Schusterman, 1994; Van Parijs <i>et al.</i> , 1997, 1999, 2003; Van Parijs e Kovacs, 2002; Bjørgsaeter <i>et al.</i> , 2004; Sauvé <i>et al.</i> , 2015; Nikolich <i>et al.</i> , 2016; Casey <i>et al.</i> , 2017; Sabinsky <i>et al.</i> , 2017
<i>Odobenus rosmarus</i>	BEH: < 0.125 - > 15 kHz	Intermedio completamente mobile	0.2 (rasp) - 20 kHz (knock) in aria: 0.01 (guttural sounds) - 17 kHz (burp)	Acustica: Schevill <i>et al.</i> , 1966; Ray, 1975; Stirling <i>et al.</i> , 1983; Schusterman e Reichmuth, 2008; Miller e Boness, 1983; Miller, 1985; Kastelein <i>et al.</i> , 1995; Verboom e Kastelein, 1995; Schusterman, 2008; Schusterman e Reichmuth, 2008; Charrier <i>et al.</i> , 2010, 2011
<i>Ursus maritimus</i>	- in aria BEH: < 0.25 - 29 kHz AEP: < 1.4 - > 22.5 kHz	Mobile	- in aria: 0.28 - 0.85 kHz (humming)	Audiometria: no dati Acustica: Derocher <i>et al.</i> , 2010
<i>Enhydra lutris</i>	BEH: < 0.125 - 36 kHz In aria: BEH: 0.23 - 38.2 kHz	Mobile	- in aria 0.3 (coo) - 60 kHz (scream)	Acustica: Sandegren <i>et al.</i> , 1973; McShane <i>et al.</i> , 1995; Ghoul e Reichmuth, 2012

I dati audiometrici da studi comportamentali (BEH) e neurofisiologici [*auditory evoked potential* (AEP)] sono indicati separatamente ad una larghezza di banda a +60 dB dalla sensibilità misurata in modo più esatto. Si riportano solo gli studi non smentiti da possibili problemi all'udito o audiogrammi ritenuti insoliti (Southall et al., 2019) (Tabella 14).

L'effetto dei suoni antropogenici sui mammiferi marini è riassunto nelle tabelle 15 e 16 (Boyd et al., 2008).

Tabella 15 - Tipi di suoni antropogenici che possono danneggiare i mammiferi marini (tabella modificata da André et al., 2009).

Fonte	Effetto più pericoloso
Navi	Masking, evitamento dell'habitat, variazioni comportamentali
Airgun	Masking, traumi fisici, perdita dell'udito, variazioni comportamentali, evitamento dell'habitat
Sonar (bassa o media frequenza)	Traumi fisici, perdita dell'udito, variazioni comportamentali, evitamento dell'habitat
Palificazione	Traumi fisici, perdita dell'udito, variazioni comportamentali, evitamento dell'habitat
Altri tipi di sonar	Masking, perdita dell'udito, variazioni comportamentali
Dragaggio	Variazioni comportamentali, evitamento dell'habitat
Trivelle	Perdita dell'udito, variazioni comportamentali
Materiale per la pesca	Variazioni comportamentali, evitamento dell'habitat
Esplosioni	Traumi fisici, perdita dell'udito, variazioni comportamentali
Aerei	Variazioni comportamentali

3.8. Effetti del rumore dovuti a sonar

Studi osservazionali che usano monitoraggi acustici passivi hanno documentato risposte comportamentali in parecchie balene in seguito all'esposizione a vari tipi di sistemi di sonar operativi militari (Fristrup et al., 2003). Nowacek et al. (2004) hanno studiato le risposte di alcune balene franche boreali (*Eubalaena glacialis*) a stimoli di allarme controllati. Sivle et al. (2016) identificarono variazioni comportamentali individuali di megattere (*Megaptera novaengliae*) e di balenottere minori (*Balaenoptera acutorostrata*) esposte a sonar militari. In base ai risultati ricavati da esperimenti a esposizione controllata (CEE), le balene che non rispondevano ai sonar sembravano riprendere i loro spostamenti abituali relativamente velocemente. La loro probabilità di risposta dovrebbe essere considerata a seconda del contesto. Visto l'aumento della richiesta energetica, anche l'interruzione forzata del foraggiamento per un breve periodo potrebbe avere conseguenze per il benessere di questi animali (Goldbogen et al., 2013). Se gli effetti sono cronici, essi possono colpire anche le popolazioni (Fig. 26).

Croll et al. (2001) trovarono che le balene rispondevano maggiormente alle variazioni del numero di prede ed alle caratteristiche oceanografiche mentre si foraggiano. Goldbogen et al. (2013) scoprirono che la risposta delle balenottere azzurre (*Balaenoptera musculus*) ai sonar attivi ad alta frequenza (MFA) erano dipendenti dal loro stato di comportamento; le balene che si foraggiavano in superficie non sembravano accorgersi della differenza, mentre quelle che si inabissavano reagivano andandosene dal fondale o prolungando la loro permanenza a mezz'acqua.

Tabella 16 - Articoli relativi al *masking* di segnali acustici (tabella modificata da André *et al.*, 2007).

Specie	Scopo dell'esperimento	Risultati e conclusioni	Fonte
Beluga (cattività)	Analisi del rumore prodotto da rompighiaccio e valutazione zone di <i>masking</i>	Raggio di <i>masking</i> : 15km per rompighiaccio (SPL 194 dB re 1microPa) e 22 km per rumore da elica (SPL 203 dB re 1 μ Pa ref 1 m). Ghiaccio che fonde non sembra influire	Erbe, 1997 Johnson <i>et al.</i> , 1989
	Analisi del rumore prodotto da rompighiaccio e preparazione di un modello per studiare l'effetto	Il rompighiaccio produce un rumore di 15-29 dB (<i>bubbler system</i> e <i>ramming</i>). La zona di <i>masking</i> dei beluga arriva fino a 40 km	Erbe e Farmer, 1998; 2000 Erbe <i>et al.</i> , 1999, 2000
	Variazione vocalizzazioni in presenza di aumento di rumore	Rumore a bassa frequenza: aumento del livello e della frequenza delle vocalizzazioni	Au <i>et al.</i> , 1985
Beluga	Studio delle vocalizzazioni in risposta al rumore navale	Aumento della frequenza delle vocalizzazioni	Lesage e Barrette, 1999
Capodogli	Risposta comportamentale dopo l'emissione di fonti acustiche con l'intenzione di allontanarli dalle rotte delle navi	Nessuna reazione tranne che ai livelli molto alti	André <i>et al.</i> , 1997
Globicefali	Variazione delle vocalizzazioni in risposta al Head Island Feasibility Test/HIFT, 1991	Cessazione vocalizzazioni	Bowles <i>et al.</i> , 1994
Delfini	Effetto del <i>masking</i> durante l'ecolocalizzazione	La capacità di rilevare la preda è ridotta	
	Effetto del rumore	La capacità di rilevare la preda è ridotta. A volte ciò viene compensato emettendo più clicks	Au, 1993
Tursiopi	Suoni naturali possono interferire con l'ecolocalizzazione	Rumore ambientale di 55 dB re 1 μ Pa ² /Hz avviene una riduzione del 46% nel range di rilevamento	Au <i>et al.</i> , 2007
	Modellazione del rumore prodotto da palificazione e parchi eolici	La zona di <i>masking</i> per forti vocalizzazioni arriva fino a 10-15 km e a 40 km per quelle più deboli	David, 2006
Focene	Studio dei tre tipi di generatori di potenza eolica in Danimarca e Svezia. Il rumore delle turbine è misurato sopra quello ambientale in frequenza minori di 500 Hz	Questo rumore non produce <i>masking</i>	Tougaard <i>et al.</i> , 2009
	Studiato il 50% del rilevamento della soglia uditiva per un segnale di 4.0kHz frequenza modulata a banda stretta	<i>Masking</i> consiste di un rumore in 1/6 di ottava di banda con una frequenza di 4.25 kHz. Il sistema uditivo dell'animale risponde in forma lineare con l'aumento del <i>masking</i>	Kastelein e Wensveen, 2008
Narvali	Studio delle reazioni del narvalo al rompighiaccio	Il narvalo esibisce un comportamento totalmente silenzioso	JCNB/NAMMCO, 2005
Orche	Studio delle vocalizzazioni delle orche in risposta alla loro interazione con le barche turistiche	Le orche variano la loro frequenza e prolungano le loro vocalizzazioni in risposta alla presenza delle barche turistiche	Foote <i>et al.</i> , 2004
Megattere	Studio delle vocalizzazioni delle megattere in risposta alle trasmissioni di bassa frequenza	Alcune megattere cessano le loro vocalizzazioni, mentre le canzoni di altri esemplari erano il 29% più lunghe ad un livello massimo ricevuto di 150 dB. Fristrup <i>et al.</i> (2003) mostrarono che le canzoni delle megattere erano più lunghe del 10%, due ore dopo l'esposizione al sonar	Miller <i>et al.</i> , 2000; Fristrup <i>et al.</i> , 2003

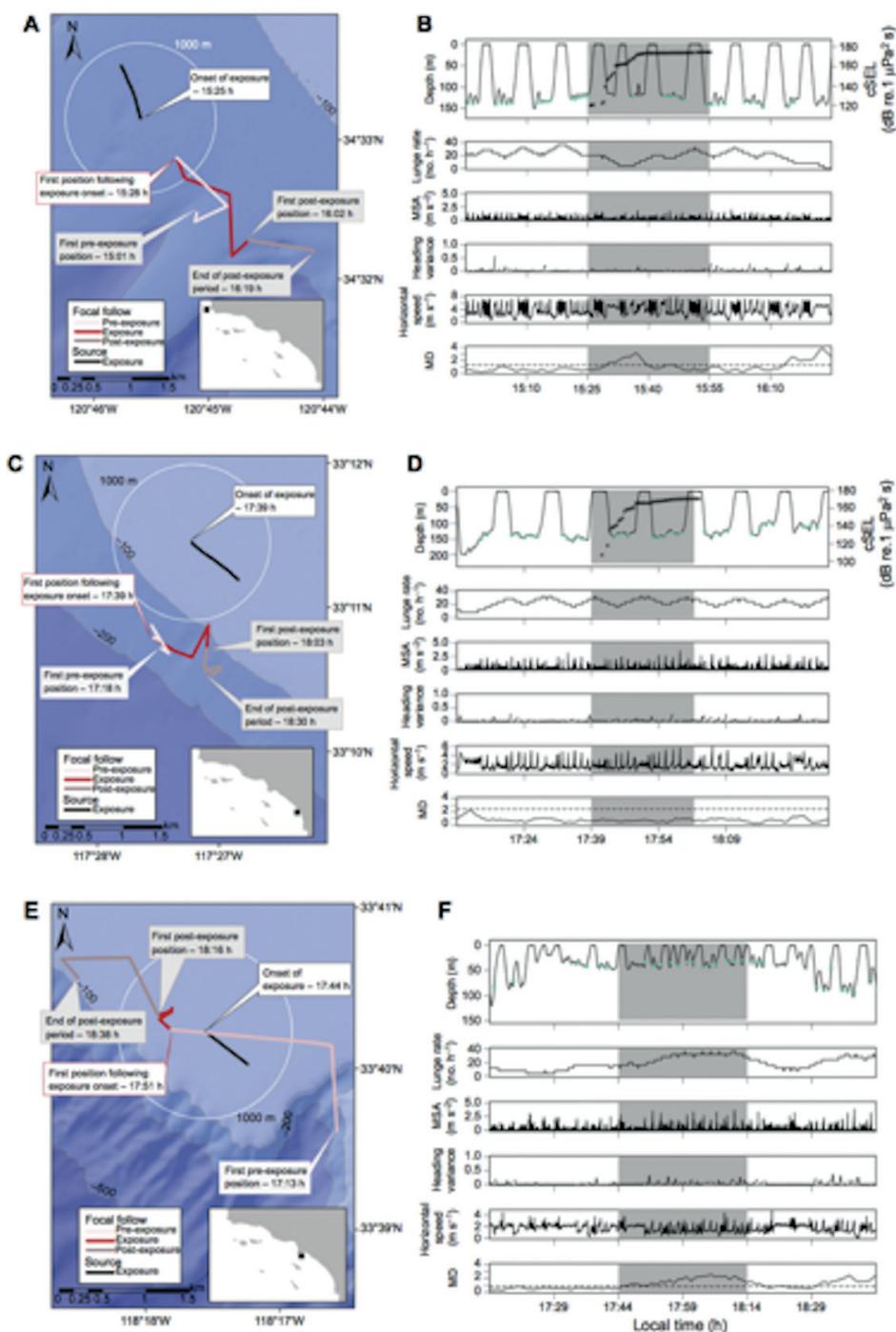


Fig. 26 - Movimento, immersioni e foraggiamento per tre CEE (Controlled Exposure Experiments) durante pre esposizione (*baseline*), fasi di esposizione e post esposizione a MFA: A, C, E) i movimenti del soggetto durante ogni fase sono mostrati nelle mappe relative alle fonti sonore, esposizione (cerchi neri sequenziali che mostrano lo spostamento delle imbarcazioni); B, D, F) le modalità di immersione delle balene: profondità (m), e livello di esposizione cumulativo ricevuto (cSEL; dB re. 1 $\mu\text{Pa}^2 \text{s}$), accelerazione specifica massima (MSA; m s^{-2}), varianza uditiva (adimensionale), velocità orizzontale calcolata (m s^{-1}) e la distanza di Mahalanobis (MD) (linea tratteggiata che indica il valore massimo nelle condizioni *baseline*), con la fase di esposizione di CEE in grigio (Southall *et al.*, 2019).

Per quanto riguarda varie specie di delfini, gli studi condotti supportano ulteriormente l'idea che l'impatto dei sonar MFA vari con il comportamento e rispetto all'ora della giornata. Quando il rumore derivante dal sonar finisce, i gruppi di delfini presenti, ma per lo più silenziosi, aumentano le loro vocalizzazioni (Fig. 27), spesso con *bursts* inizialmente più intensi.

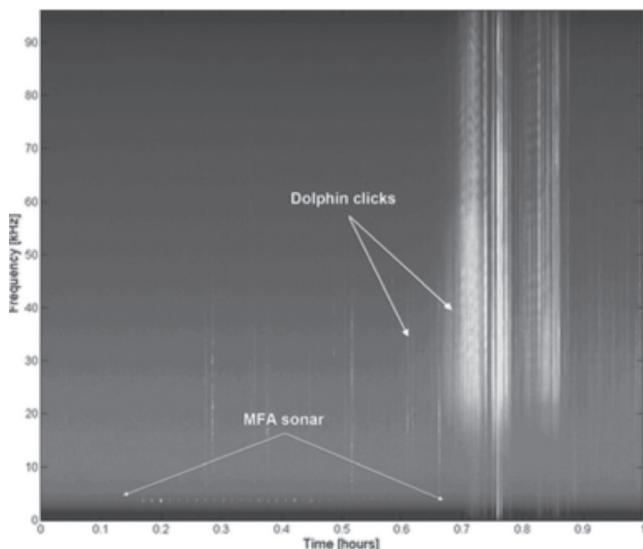


Fig. 27 - Esempio di una risposta acustica al sonar MFA; uno spettrogramma di 1 h mostra un sonar MFA a 3 kHz durante la notte. I delfini sembrano essere presenti in base ai pochi *clicks* udibili durante il sonar. Entro 5 minuti dalla fine del sonar, inizia un periodo di intensi *clicks* che si estendono da circa 18 a 96 kHz. Le linee verticali da <10-50 kHz derivano da rumore associato con il R/P FLIP da cui sono stati calati gli idrofoni (Henderson *et al.*, 2014).

Gli effetti avversi dovuti ai sonar a bassa frequenza (*Low-Frequency Active Sonar – LFAS*) sono poco studiati. Inoltre, la maggior parte dei dati relativi all'utilizzo di questi strumenti sono soggetti a segreto militare. Frantzis (1998) studia uno spiaggiamento di 12 esemplari di zifio (*Ziphius cavirostris*) vivi lungo le coste del golfo di Kyparissiakos sparsi in un arco temporale in modo atipico, visto che, in genere, gli spiaggiamenti avvengono nello stesso posto ed in un lasso di tempo ristretto. Frantzis (1998) osserva che questo fenomeno avviene in contemporanea e nelle stesse zone dei test militari di un sistema acustico per il rilevamento di sottomarini svolto dalla NATO (North Atlantic Treaty Organization). Valutare la causa e le misure di mitigazione per ogni impatto non sempre è possibile a causa della scarsità di conoscenza scientifica rispetto alla fisiologia, al comportamento, alla distribuzione ed all'uso dell'habitat dello zifio (Podestà *et al.*, 2006).

Inoltre, conseguenze non legate all'udito sono ancora meno studiate. Una di queste è legata alla sovrassaturazione dei tessuti con gas azoto disciolto e accrescimento di bolle che può portare alla separazione dei tessuti dovuta ad emboli e un aumento localizzato di pressione nei tessuti. Alcuni ricercatori hanno presentato evidenza di lesioni croniche dovute a bolle di gas nel fegato e nei reni di differenti specie di cetacei spiaggiate (Fernández *et al.*, 2005).

3.9. Effetti del rumore dovuti a parchi eolici

Wahlberg e Westerberg (2005) hanno rivisitato l'impatto del rumore sottomarino sui pesci dovuto ai parchi eolici. Hanno concluso che il rumore delle pale può potenzialmente inficiare il loro comportamento a distanza di parecchi chilometri, ma senza trarne dati conclusivi. Il rumore, infatti, sembra essere di intensità troppo bassa per causare impedimenti acustici permanenti o transitori ai pesci anche a distanza di pochi metri (Wahlberg e Westerberg 2005; Madsen *et al.*,

2006). In contrasto a queste ipotesi, Vella *et al.* (2001) sostengono che il rumore ad intermittenza associato con le attività durante la costruzione dei parchi eolici sia compreso all'interno del campo degli audiogrammi comportamentali dei pesci. Ciò è supportato dall'osservazione delle loro reazioni di allarme e variazioni nei *pattern* di nuoto. Questi atteggiamenti possono essere particolarmente significativi se il parco eolico si trova in prossimità delle zone di crescita dei piccoli e se i tempi di costruzione sono prolungati. Studi di Westerberg (2000) presso il parco eolico Svante, ad esempio, hanno mostrato che il numero di merluzzi nell'area dell'operazione delle turbine è maggiore rispetto alle aree circostanti. Ciò potrebbe indicare l'abilità di questi animali ad abituarsi a stimoli di rumore continui. Effetti simili sono stati riscontrati vicino ad altre strutture che producono rumore come le piattaforme *offshore* (Valdemarsen, 1979).

Rumore forte ed intermittente può avere un effetto avverso sulle popolazioni locali di pesci, causando risposte di allarme e probabile spostamento lontano dalle aree di costruzione. Ciò può essere significativo soprattutto se la costruzione influenza le aree di *nursery*. Tuttavia, quando i parchi eolici operano normalmente i pesci sembrano abituarsi prontamente ed utilizzare i siti a densità più elevate (Vella *et al.*, 2001). Studi condotti al parco eolico *offshore* Horns Rev in Danimarca mostrano la colonizzazione delle fondamenta delle turbine da parte di molte specie marine entro cinque mesi dalla costruzione (Leonhard, 2000); quindi la colonizzazione dipenderà dal numero e dalle dimensioni delle fondamenta delle turbine.

In generale, le foche preferiscono evitare il rumore antropogenico e le attività di costruzione nelle vicinanze. Ciò potrebbe essere dovuto sia ad una risposta visiva che al rumore. Tuttavia, altri studi rivelano la predisposizione di alcuni individui a rimanere nelle zone adiacenti ai parchi eolici. L'abilità delle foche di rilevare i suoni a bassa frequenza (<1000 Hz) non è stato chiaramente dimostrato.

I delfini non sembrano essere sensibili ai suoni a bassa frequenza e spesso passano parecchio tempo vicino alle navi. Le reazioni dei singoli individui possono, comunque, variare in base alle singole attività. Per esempio, non è raro che i delfini si avvicinino alle navi quando stanno socializzando, ma le evitano durante il foraggiamento (Richardson *et al.*, 1995).

3.10. Effetti del rumore dovuti alla palificazione

L'area sulla quale il rumore antropogenico può impattare le specie marine dipende da quanto efficacemente il suono si propaga sott'acqua e dalle sue caratteristiche di frequenza e durata. Tutti assieme questi dati (Tabella 17) possono essere usati per determinare la probabilità che le specie saranno impattate a differenti distanze dalla fonte (Bailey *et al.*, 2010).

Tabella 17 - Criteri di esposizione al rumore per disturbo comportamentale per le specie di mammiferi marini più comuni trovati nel Moray Firth e la distanza massima dalla palificazione all'interno della quale questo livello sonoro viene sorpassato in base alle registrazioni (stime delle distanze in parentesi), (tabella modificata da Bailey *et al.*, 2010).

Genere o specie	Soglie per variazioni comportamentali (peak to peak broadband level)	Distanza massima dalla palificazione	Referenze
Tursiope	140 dB re 1 μ Pa	50km(43km)	Southall <i>et al.</i> , 2007
Focena	Min: 90dB re 1 μ Pa Max: 155dB re 1 μ Pa	Min: 70km (70km) Max: 20km(21km)	Southall <i>et al.</i> , 2007
Balenottera minore	143dB re 1 μ Pa	40 km	Gordon <i>et al.</i> , 2003
Foca comune e grigia	Min: 160 dB re 1 μ Pa Max: 200 dB re 1 μ Pa	Min: 14km (15km) Max: 215m (300m)	Harris <i>et al.</i> , 2001

Le focene sono altamente sensibili al rumore (Southall *et al.*, 2007) ed è, quindi, possibile che gli effetti comportamentali possano ripercuotersi fino a 70 km dalla palificazione, il limite al quale potrebbe essere distinguibile dal rumore di fondo. L’analisi dei dati misurati confrontati con i criteri di esposizione indica che i comportamenti di evitamento dovrebbero avvenire solo entro 20 km dalla fonte di rumore. Si ritiene che la zona di impatto per i pinnipedi sia ridotta, all’interno di 14 km dalla sorgente. I tursiopi e le balenottere minori potrebbero esibire variazioni comportamentali fino a 50 km dalla fonte. Uno studio sulle foche dagli anelli presso la Northstar Island, Alaska, non mostra reazioni drammatiche agli impulsi sottomarini con livelli ricevuti di almeno 150 dB re 1 µPa (RMS) (Blackwell *et al.*, 2004). In contrasto, osservazioni in un parco eolico del Baltico ovest (Nysted wind farm) evidenziano un effetto significativo nel comportamento delle focene (Edrén *et al.*, 2004). Edrén *et al.* (2004) trovano una riduzione dal 10 al 60% nel numero di foche rifugiate su una banchina a circa 10 chilometri di distanza dall’area di palificazione.

3.11. Effetti del rumore dovuti ad indagini sismiche

C’è un aumento degli studi riguardanti i potenziali effetti sui mammiferi marini del suono prodotto da *airgun* durante indagini geofisiche (Weir e Dolman, 2007).

Visto che piccole specie di odontoceti utilizzano il suono nella banda 0,5-20 kHz, sia gli odontoceti che i mysticeti possono essere potenzialmente affetti. Si identificano varie problematiche tra cui danni fisici, danni fisici indiretti (“*the bends*”), effetti fisiologici, *masking* di segnali di ecolocalizzazione, impatti comportamentali ed effetti indiretti dovuti allo spostamento di specie predatorie. Tuttavia, dalle Tabelle 18 e 19 si può notare quanti dati siano ancora necessari per studiare a fondo il problema (Carroll *et al.*, 2017).

Tabella 18 - Schema degli impatti potenziali di rumore prodotto da fonti sismiche a bassa frequenza sui pesci (Carroll *et al.*, 2017).

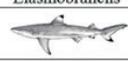
	Adult/juvenile fish 	Fish eggs/larvae 	Elasmobranchs 
PHYSICAL			
Swim bladder damage	1,2		
Otolith/inner ear damage	3	4	
Temporal Threshold Shift	5	1a,3a	
Permanent Threshold Shift	5		
Organ/tissue damage	1,2,6		
Mortality	1,2,6-11	12-14	13,15
BEHAVIOURAL			
Startle/alarm response	1,8a	6,7,8a,9,16,17	
Sound avoidance/migration*	9,18-20	7,12,16-18,21-23,24a	18
Other changes in swimming	20		
Predator avoidance			
Foraging			
Reproduction			
Intraspecific communication			
PHYSIOLOGICAL			
Metabolic rates			
Stress bio-indicators	16	6a	10a
Metamorphosis/settlement			
CATCH EFFECTS			
Catch rates/abundance	7,19,25,26	21,23	12,18,23,27,28
<small>1= Popper et al. 2005*, 2 = Popper et al. 2016*, 3 = Song et al. 2008*, 4 = McCauley et al. 2003, 5 = Hastings and Miksis-Olds 2012, 6 = Santulli et al. 1999, 7 = Hassel et al. 2004, 8 = Boeger et al. 2006, 9 = Wardle et al. 2001, 10 = Radford et al. 2016*, 11 = McCauley and Kent 2012, 12 = Dalen and Knutsen 1987, 13 = Booman et al. 1996, 14 = Payne et al. 2009, 15 = Kostyuchenko 1973, 16 = McCauley et al. 2000, 17 = Pearson et al. 1992, 18 = Lokkeborg et al. 2012, 19 = Pickett et al. 1994, 20 = Peña et al. 2013, 21 = Skalskiet al. 1992, 22 = Slotte et al. 2004, 23 = Engås et al. 1996, 24 = Chapman and Hawkins 1969, 25 = Miller and Cripps 2013, 26 = Thomson et al. 2014; 27 = Lokkeborg and Soldal 1993, 28 = Przeslawski et al. in prep.</small>			
<small>1a: Statistically significant hearing loss immediately upon exposure of freshwater adult Northern Pike to 5 pulses at 400 Hz and exposure of Lake Chub to 5 and 20 pulses at 200, 400 and 1600 Hz. Recovery within 18 hrs. A shift was observed only in adults and not in juvenile Pike. 3a: Adult freshwater Northern Pike and Lake Chub exhibited temporary hearing loss, but no damage to the sensory epithelia studied in any of the otolithic end organs, demonstrating that hearing loss in fishes is not necessarily accompanied by morphological effects on the sensory hair cells. 8a: Repeated exposure to air guns resulted in increasingly less obvious startle responses in effected fish, indicating possible habituation to the disturbance. 10a: Fish exposed to playbacks of pile-driving or seismic noise for 12 weeks no longer responded with an elevated ventilation rate to the same noise type, and showed no differences in stress, growth or mortality compared to those reared with exposure to ambient-noise playback. 24a: Free ranging Whiting school responded to airgun sound by shifting downward, temporary habituation was observed after one hour of continual sound exposure. * Includes changes in vertical/horizontal distribution. -Freshwater/brackish species.</small>			
KEY			
	Response at realistic exposure levels		Possible response (conflicting results)
	Response at unrealistic/unknown exposure levels		No data, has not been tested
	No response at either realistic or unrealistic exposure levels		Not applicable

Tabella 19 - Schema degli impatti potenziali di rumore prodotto da fonti sismiche a bassa frequenza su molluschi, crostacei, echinodermi (Carroll *et al.*, 2017).

	Molluscs				Crustaceans		Echinoderms	
								
	Cephalopod	Gastropod	Bivalve	Larvae	Decapod ^a	Stomatopod	Larvae	Ophiuroid
PHYSICAL								
Air bladder damage								
Otolith/statocyst damage	1-3				4,5	5		
Organ/tissue damage	6		7,8		9			
Mortality/abnormality	6		7,8,10 ^c	5	11	5,9,12	4,13,14	
BEHAVIOURAL								
Startle response	15-19		5,20		4,21			
Sound avoidance	18				22			
Predator avoidance			5		5,12,23			
Foraging					23			
Reproduction					24			
Bioturbation			25		25			25
PHYSIOLOGICAL								
Metabolic rates ^b	26			11	4,12,27,28		13	
Stress bio-indicators	25		25,29	5	4,5,12,22,25,27,30			25
Immune response					5			
Energy stores			10					
Metamorphosis/settlement							31	13
CATCH EFFECTS								
Catch rates / abundance	29	29	7,10,29	8	4,9,27,29,32,33	29		
<small>1 = André et al., 2011, 2 = Solé et al 2013a, 3 = Solé et al 2013b, 4 = Christian et al 2003, 5 = Day et al 2016a, 6 = Guerra et al 2004, 7 = Harrington et al 2010, 8 = Parry et al 2002, 9 = Courtenay et al 2009, 10 = current study 11 = Aguilar de Soto et al 2013, 12 = Payne et al 2007, 13 = Pearson et al 1994, 14 = Day et al 2016, 15 = Fretwell and McCauley 2012, 16 = McCauley et al 2009, 17 = Samson et al 2014, 18 = Komak et al 2005, 19 = Mooney et al 2016, 20 = Roberts et al 2015, 21 = Roberts et al 2016, 22 = Celi et al 2013, 23 = Wale et al 2013a, 24 = Lagardere 1982, 25 = Solan et al 2016, 26 = Kaiifu et al 2007, 27 = Christian et al 2004, 28 = Wale et al 2013b, 29 = La Bella et al 30 = Filicetto et al 2014, 31 = Branscomb and Rittschof 1984, 32 = Jandriguetto-Filho et al 2005, 33 = Parry and Gason 2006 a DFOC 2004 also examined the effects of various physical and physiological effects of seismic signals on snow crabs but is not included here because no baseline data acquired before seismic survey, and refined experiments in Courtenay et al 2009 supersede these results. b Includes proxies for metabolic rate such as food consumption, growth, respiration, developmental rate c Also includes Chalmer (1986), Kosheleva (1992) and Matishov (1992) as cited in Parry et al. (2002)</small>								
KEY								
	Response at realistic exposure levels				Possible response / conflicting or anecdotal results			
	Response at unrealistic/unknown exposure levels				No data, has not been tested			
	No response				Not applicable			

Ci sono alcuni studi riguardanti larve di molluschi e crostacei, ma mancano informazioni riguardanti gli stadi primari della vita di altri taxa (Edmonds *et al.*, 2016). Gli stadi larvali sono spesso considerati più sensibili agli agenti di stress rispetto agli individui adulti (Byrne e Przeslawski, 2013), ma l'esposizione ai suoni da prospezioni sismiche rivela che non ci sono differenze per quanto riguarda i pesci (Dalen *et al.*, 2007), i granchi (Pearson *et al.*, 1994), o le capesante (Parry *et al.*, 2002). Comunque, periodi di esposizione lunghi ed intensi a suoni a bassa frequenza - come quelli adottati da Aguilar de Soto *et al.* (2013) (3 s di intervallo per gli impulsi per 90 ore, 1 m distanza dalla fonte) per le capesante o per i pesci studiati da Booman *et al.* (1996) (numero di impulsi ripetuti sconosciuto, 220-242 dB re 1 µPa SPL, 0,75-6 m dalla fonte) - possono aumentare la mortalità indicando la vulnerabilità delle larve.

L'utilizzo di *airguns* può sollecitare risposte di allarme nei pesci teleostei, inclusi 'C-start' e variazioni nei *pattern* di assembramento, posizioni nella colonna d'acqua e velocità di nuoto (Santulli *et al.*, 1999; Wardle *et al.*, 2001; Hassel *et al.*, 2004).

Chapman e Hawkins (1969) hanno osservato che la distribuzione in profondità dei merlani (*Merluccius bilinearis*) cambia in risposta ad un *airgun* stazionario, che espone i pesci ad una SPL di 178 dB re 1 µPa. In questo studio il banco si sposta verso il fondale, formando uno strato più compatto a profondità maggiori, ma stabilizzandosi dopo un'ora di continua esposizione al suono. Queste analisi indicano che i movimenti verticali, piuttosto che orizzontali, potrebbero corrispondere a reazioni in tempi brevi ai suoni sismici. Indagini relative alla possibile influenza di suono

prodotto dalla sismica sulla distribuzione e l'abbondanza dei pesci pelagici hanno rilevato effetti di distribuzione orizzontali insignificanti a breve termine (Slotte *et al.*, 2004). Esposizione alle emissioni di *airguns* non sembrano interrompere il ritmo diurno dei pesci e sono state registrate solo variazioni a lungo termine riguardanti il ritmo nictemerale di due merluzzi neri (Wardle *et al.*, 2001).

I comportamenti di evitamento del suono hanno un impatto maggiore sulle popolazioni rispetto alle risposte di allarme, soprattutto se gli animali migrano lontano da un'area nella quale sono condotte indagini sismiche. Studi precedenti hanno trovato che né i calamari (McCauley *et al.*, 2000), né le granceole artiche (Christian *et al.*, 2003), né i gamberetti (Celi *et al.*, 2013) si muovono per evitare i suoni a bassa frequenza, sebbene gli studi recenti siano stati condotti in una vasca nella quale i gamberi possono non essere capaci di rilevare la direzione del suono.

Dati riguardanti una popolazione di merluzzi (Engas *et al.*, 1996), ad una profondità media di 260 m, soggetti a suoni ad elevate intensità prodotti da *airguns* a circa 80-150 Hz mostrano che i pesci con dimensioni maggiori lasciano l'area più velocemente rispetto a quelli più piccoli.

3.12. Effetti del rumore dovuto a traffico marittimo

Vari studi sperimentali hanno quantificato gli effetti del traffico navale riguardanti le popolazioni di orche residenti nel Pacifico del NE (Erbe, 2002; Lusseau *et al.*, 2009). Altre indagini hanno dimostrato gli effetti del rumore derivante da grandi navi su una varietà di specie di cetacei tra cui lo zifio (Aguilar Soto *et al.*, 2006), le balene franche boreali (Nowacek *et al.*, 2004; Rolland *et al.*, 2012), i beluga (Erbe e Farmer, 2000) e le balenottere comuni (Castellote *et al.*, 2012). Questi studi forniscono un indizio riguardo al fatto che il rumore navale possa ridurre l'efficienza del foraggiamento (Aguilar Soto *et al.*, 2006), aumentare il rischio di collisione con le navi (Nowacek *et al.*, 2004) e causare stress psicologico che può alterare i livelli ormonali (Rolland *et al.*, 2012).

Le balenottere comuni variano le caratteristiche delle loro canzoni per cercare di mantenere la comunicazione nel mezzo di elevati livelli di rumore navale (Castellote *et al.*, 2012). Inoltre, c'è evidenza che suggerisce che le orche possano compensare aumenti nel livello di rumore ambientale allungando le loro *calls* (Foote *et al.*, 2004). Non ci sono, però, prove che questi animali aggiustino i loro *pattern* di ecolocalizzazione per compensare segnali mascherati usati nei foraggiamenti.

3.13. Effetti del rumore su vocalizzazione e comunicazione

Siccome i mammiferi marini dipendono dai canali acustici sensoriali per molte delle loro attività, forzare un animale a modificare il proprio comportamento vocale può ridurre la sua abilità nel cercare il cibo, nello spostarsi o nel contattare conspecifici (Richardson *et al.*, 1995). Modifiche nel comportamento vocale sono state ritrovate in pochi mammiferi marini esposti ad elevati livelli di rumore ambientale, ma i risultati possono variare tra gli studi (Lesage e Barrette, 1999). Ad esempio, il comportamento vocale dei maschi delle megattere viene alterato quando sono esposti a sonar LFA (Miller *et al.*, 2000). Le canzoni delle megattere risultano più lunghe del 29% e ritornano a valori normali dopo l'esposizione, suggerendo che questi animali cantano più a lungo durante le trasmissioni di LFA sonar per compensare interferenze acustiche e che questa risposta abbia una durata limitata. Siccome la canzone è legata alla riproduzione (Tyack, 1981), alterazioni di questo comportamento ambientale possono anche inficiare parametri demografici (Miller *et al.*, 2000).

I beluga esposti ai suoni di un rompighiaccio emettono un'elevata proporzione di *calls*, mentre i narvali (*Monodon monoceros*) diventano silenziosi quando esposti alla stessa fonte di rumore (Finley *et al.*, 1990). C'è anche indicazione che le balene grigie ed i tursiopi facciano slittare le loro frequenze primarie di comunicazione in modo da evitare il rumore di fondo (Würsig e Richardson, 2000). In uno studio sulle balene grigie, le *calls* aumentano quando le balene vengono esposte a rumori dei motori, ma diminuiscono quando i rumori sono poco familiari (Dahlheim, 1987). Si documenta che i capodogli fermano la vocalizzazione in risposta ad impulsi sismici relativamente deboli proveniente da una nave a centinaia di chilometri in lontananza (Bowles *et al.*, 1994).

Lesage e Barrette (1999) studiano il comportamento vocale dei beluga prima, durante e dopo l'esposizione al rumore di una piccola barca a motore ed un traghetto. Queste variazioni comprendono:

- 1) una progressiva riduzione nel *calling rate* da 3,4 a 10,5 *calls* per balena per minuto a meno di 1 *call* per balena per minuto durante l'avvicinamento dei natanti,
- 2) piccoli incrementi nei *falling tonal calls* e *three-pulsed tone call types*,
- 3) un aumento nella ripetizione delle *call* specifiche a distanze di meno di 1 km,
- 4) uno spostamento nelle bande di frequenza usate dagli animali che vocalizzano da una frequenza media di 3,6 kHz prima dell'esposizione al rumore di frequenze da 5,2 a 8,8 kHz quando i natanti erano vicino alle balene (Lesage e Barrette, 1999).

3.14. Stress

In questo contesto, il termine 'stress' si usa per descrivere variazioni patologiche in sistemi immunitari (e neuroendocrini) in seguito all'esposizione al suono. Gli indicatori di stress nei mammiferi marini possono venir registrati, ma gli effetti non possono venir separati da problematiche indotte da altre pressioni. Uno stress prolungato causato dal rumore può indebolire la resistenza alle malattie e l'equilibrio endocrino che può inficiare l'abilità dell'animale di riprodursi (Geraci, 1980).

3.15. Effetti del rumore sull'uso dell'habitat

In studi condotti alle Hawaii, le megattere si allontanano quando un impulso sonar di 3,3 kHz viene emesso nel loro habitat (Maybaum, 1993). Le risposte osservate consistono di piccoli aumenti di velocità e linearità dei percorsi. Si pensa che le reazioni di evitamento possano derivare dalle similitudini tra i segnali dei sonar ed i suoni biologici associati con allarmi e segnali di pericolo.

Uno studio condotto su 90 capodogli nel 1993 nel Golfo del Messico dimostra una correlazione tra operazioni sismiche e la distribuzione delle balene nell'area (Mate *et al.*, 1994). Da una distribuzione di 0,092 balene/km prima dell'inizio dell'operazione sismica, l'abbondanza di balene diminuisce in modo significativo a 0,038 balene/km durante i primi due giorni, e poi a 0 balene/km per i cinque giorni successivi (Mate *et al.*, 1994).

Polacheck e Thorpe (1990) trovarono che le focene esibiscono una reazione di evitamento ai veicoli. Evans *et al.* (1994) studiarono il fenomeno per cui questi animali evitavano i veicoli di tutte le dimensioni, spesso muovendosi subito fuori dall'area.

Finley *et al.* (1990) studiarono le reazioni dei beluga e dei narvali ai rompighiaccio nell'Artico canadese. I beluga si spaventarono e fuggirono ed i narvali si bloccarono (lo stesso atteggiamento

è adottato durante la predazione delle orche). I beluga evitarono l'approccio delle navi nel *range* di 45 to 60 km, e sembrarono accorgersi di una nave che si avvicinava ad una distanza di 85 km. I beluga si allontanarono fino a 80 km dalla loro posizione originaria in risposta al passaggio della nave e restarono assenti dall'area per 1 o 2 giorni (Finley *et al.*, 1990).

Le balene grigie nella baia di San Diego risposero al rumore dei veicoli abbandonando la zona e ritornandovi solo dopo la diminuzione del traffico navale (Reeves, 1977; Richardson *et al.*, 1995).

Ricollocamenti di popolazioni dei tursiopi (Evans *et al.*, 1993), delle focene (Evans *et al.*, 1994), dei beluga (Finley *et al.*, 1990) e dei capodogli (Mate *et al.*, 1994) sono stati riportati in associazione alle esplorazioni sismiche e al traffico navale. Si pensa, inoltre, che le megattere (Green, *et al.*, 1994), le balenottere azzurre (Gordon e Moscrop, 1996), le balene grigie (Reeves, 1977) e le balene della Groenlandia (Richardson *et al.*, 1987) abbiano abbandonato le aree in risposta alle attività navali, al traffico aereo, ed alle attività industriali come il dragaggio.

3.16. *Impatti cumulativi*

Le interazioni sinergiche di questi allarmi ambientali in congiunzione con l'esposizione a rumore antropogenico continuo hanno probabilmente conseguenze più severe per le popolazioni di cetacei nelle aree costiere.

Richardson *et al.* (1987) confrontarono la distribuzione della balena della Groenlandia ed attività industriali nel Canadian Beaufort Sea, e suggerirono che la diminuzione della presenza di questi animali fosse un risultato di effetti cumulativi dell'attività industriale che iniziò nel 1976.

4. Misure di mitigazione

La preoccupazione riguardante l'influenza del rumore antropogenico sulla fauna marina è aumentata negli anni recenti (Hildebrand, 2009; Williams *et al.*, 2015). La rivoluzione industriale ha causato un aumento del rumore antropogenico (tecnofonia) che sta minando il 'comfort acustico' degli organismi marini, i quali dovrebbero poter svolgere le loro funzioni vitali e di comunicazione senza impedimenti (Pavan *et al.*, 2018). Non potendo ripristinare il paesaggio acustico pre-industriale, dovremmo poter evitare gli impatti acustici immediatamente dannosi e garantire la libertà di comunicazione senza *masking* e senza induzione di stress da rumore (Pavan *et al.*, 2018).

Sia che il rumore venga emesso intenzionalmente o come sottoprodotto delle attività antropiche, è necessario adottare programmi di monitoraggio adeguati che permettano di raccogliere le informazioni nel modo più esaustivo possibile. È importante, inoltre, effettuare misure di rumore di fondo in aree silenziose e poco trafficate in modo da definire dei valori di base e mappare le aree che potranno risultare negativamente impattate dall'esposizione al rumore. Le misure di mitigazione dovrebbero considerare anche gli effetti cumulativi delle fonti sonore che operano simultaneamente nella zona e lo stato delle popolazioni particolarmente sensibili.

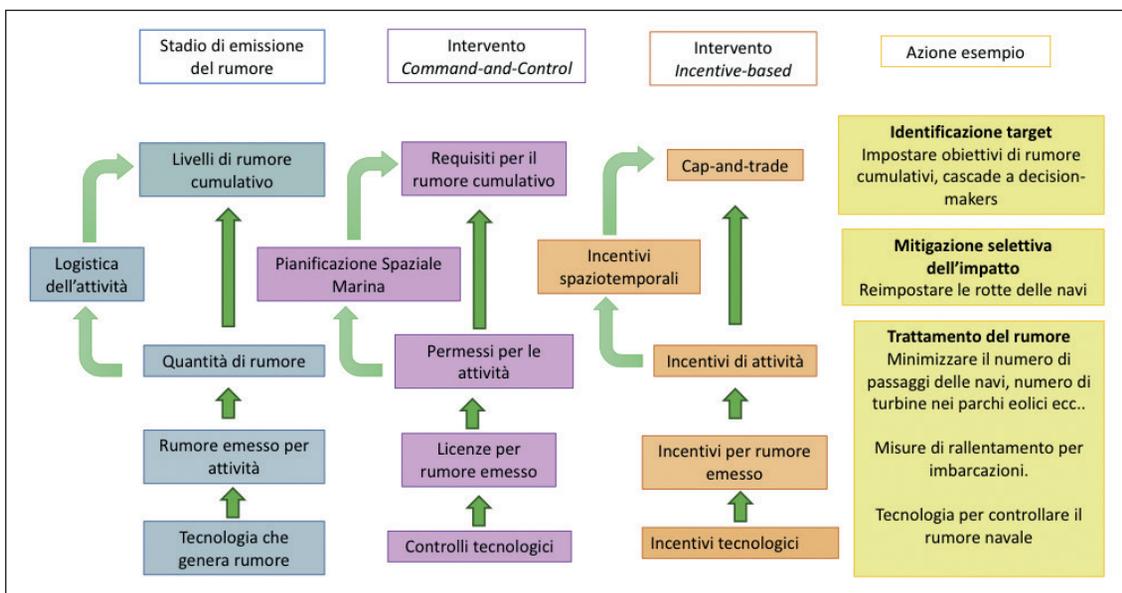
La regolamentazione dei fattori di stress ambientale si basa spesso sulla legislazione che protegge alcune specie chiave, come i mammiferi marini. Tuttavia, solo alcune di esse sono classificate come "in pericolo" (*endangered*) e la maggioranza di pesci ed invertebrati non riceve lo stesso livello di protezione (Popper e Hawkins, 2019). Ci sono pochi dati a supporto dei criteri

per la fauna marina differente da cetacei e pinnipedi e la definizione di criteri è urgentemente necessaria anche per altri gruppi.

4.1. Approcci alla riduzione del rumore

Le misure riguardanti la gestione del rumore possono essere suddivise in due grandi categorie (Tabella 20): approcci *command-and-control* (CAC) o misure *incentive-based* (IBM), detti anche *market-based* (MBM) (Merchant, 2019).

Tabella 20 - Stadi delle emissioni di rumore, corrispondenti *command-and-control* e misure *incentive-based* ed esempi di azioni per ogni stadio (modificata da Merchant, 2019).



L'Unione Europea tramite la 'Marine Strategy Framework Directive' (MSFD 2008/56/EC – adottata dalla Commissione 2010/4777/EC) riconosce il rumore sottomarino come una forma di inquinamento. L'Ecosystem Approach (EcAp) - derivante dalla Convenzione di Barcellona (UNEP/MAP) - si integra bene con la realizzazione dell'MSFD (Maglio *et al.*, 2017) e rispetta le linee guida della *Marine Spatial Planning Directive* (MSPD 2014/89/EU).

Si richiede che gli stati membri stabiliscano programmi di monitoraggio per le valutazioni dello stato ambientale delle acque marine in atto (Dekeling *et al.*, 2016). Questa azione è importante per fornire dati su una serie di indicatori ambientali chiave che permettono di valutare il raggiungimento del 'Good Environmental Status' (GES): "Le attività antropiche che introducono energia sottoforma di suoni impulsivi di elevata intensità a bassa e media frequenza nell'ambiente marino non devono comportare nessun effetto significativo a carico delle popolazioni interessate" (isprambiente.it).

Non sono disponibili standard europei sulle unità di misura, né sul monitoraggio e sulla mappatura dei suoni. Il gruppo di lavoro *TG Noise* (*Technical Group on underwater Noise*) è stato istituito dalla Commissione per definire problemi e relative soluzioni inerenti il rumore subacqueo (Dekeling *et al.*, 2014).

ISPRA ha redatto rapporti tecnici e linee guida nazionali per lo studio e la regolamentazione del rumore di origine antropica anche per conto del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare (MATTM). Nel 2015, la commissione di valutazione dell'impatto ambientale del MATTM ha creato nuove disposizioni per ottenere i permessi per esplorazioni geofisiche nelle acque italiane (<http://www.va.minambiente.it/it-IT>; Fossati *et al.*, 2017), ma non vengono esplicitate misure di mitigazione.

Il descrittore 11 (strategiamarina.isprambiente.it) della MSFD (EC Decision 2010/477/EU - abrogata da EC Decision 2017/848/UE) comprende il rumore sottomarino ed è suddiviso nei due indicatori 11.1.1 e 11.2.1.

L'indicatore 11.1.1 è definito come: "Proporzione dei giorni e loro distribuzione in un anno sulle aree di una determinata superficie e loro distribuzione spaziale, in cui le fonti sonore antropogeniche superano livelli che potrebbero avere un impatto significativo sulla fauna marina misurati come livello di esposizione a un suono (in dB re $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}$) o come livello di pressione acustica di picco (in dB re $1 \mu\text{Pa}_{\text{peak}}$) a un metro, misurati sulla banda di frequenza da 10 Hz a 10 kHz".

L'Unione Europea, considerata la necessità di monitorare e valutare l'inquinamento acustico, raccomanda la compilazione di un registro del rumore.

Il registro può essere usato per catalogare il livello di rumore generato da diversi eventi, per identificare i miglioramenti necessari e gli sviluppi futuri del registro che permetteranno una robusta implementazione in modo da suggerire significativi indicatori di impatto (Drira *et al.*, 2018). Sono considerate sia le sorgenti più propriamente impulsive (*airgun*, palificazione) che quelle tonali (*sonar*, deterrenti acustici) nella banda 10 Hz – 10 kHz, in accordo con i valori di soglia riportati dal *TG Noise* (Viola *et al.*, 2017).

L'ambito spaziale considerato dal Registro è costituito dalle zone di competenza italiana delle sottoregioni marine del Mar Mediterraneo: 1) il Mare Mediterraneo occidentale, 2) il Mare Adriatico, 3) il Mar Ionio e il Mare Mediterraneo centrale (D.Lgs. 190/2010). L'implementazione del Registro è stata affidata al CONISMA (Consorzio Interuniversitario per le Scienze del Mare).

Seguendo le linee guida del *TG Noise*, viene stabilita una griglia spaziale (dimensioni delle celle uguale a 30 minuti in latitudine e longitudine).

Per utilizzare il registro come strumento per valutare il disturbo e/o l'impatto sulla vita marina, viene proposta una metodologia in quattro punti (Maglio *et al.*, 2017):

- 1 - calcolo della propagazione del rumore generato da ogni evento di rumore contenuto nel Registro. È necessario conoscere il tempo, la posizione e la profondità dell'emissione, la data e la posizione;
- 2 - stima dei livelli di esposizione al rumore cumulativi (SEL) che risultano da eventi di rumore differenti nell'intera area di studio, sommando tutti i contributi di eventi singoli di rumore;
- 3 - applicazione dei criteri di esposizione al suono (soglie) disponibili in letteratura date le caratteristiche uditive delle specie chiave presenti nell'area. Ciò permette di ottenere le mappe di rischio acustico giornaliero e le specie chiave presenti nelle aree di studio;
- 4 - calcolo del numero di giorni in un anno per ogni cella di una griglia in cui i valori di SEL eccedono i criteri di esposizione sonora; questo valore può essere visto come un indicatore di impatto.

Dopo la modellazione, l'approccio include il *weighting* dei risultati con sensibilità uditive delle specie selezionate, ed il calcolo delle *daily noise footprint* per ogni giornata in un anno. In seguito, le mappe sono sovrapposte sulla griglia spaziale proposta nell' ACCOBAMS Noise Register Demonstrator (le linee guida ACCOBAMS sono discusse in fondo a questo capitolo).

L'indicatore 11.2.1 è definito, invece, come: "Tendenze nei livelli di rumorosità ambientale entro le bande 63 e 125 Hz a 1/3 di ottava della frequenza centrale (re 1 μ Pa RMS; livello medio di rumore nelle bande di questa ottava per un anno) misurate tramite stazioni di osservazione e/o utilizzando modelli se necessario" (Van der Graaf *et al.*, 2012).

Il descrittore 11 considera significativi gli effetti cumulativi tali da innescare evitamento di aree di popolazioni, generando una vera e propria modifica nella distribuzione spaziale degli individui ed una ripercussione sugli ecosistemi. Secondo il *TG Noise* proprio questo tipo di modifica del comportamento è quella più strettamente correlata alle fonti impulsive.

4.2. "Migliori pratiche" da usare come misure di mitigazione

Come spesso succede nei sistemi biologici, la variabilità significativa delle condizioni ecologiche, sociali e comportamentali, unite a diversi scenari ambientali, rende difficile trovare dei parametri uguali per tutti (Fossati *et al.*, 2017). Si cerca di impostare pratiche che salvaguardino il maggior numero di specie. Dove ciò non è possibile, si applica il principio di precauzione.

Le pratiche da usare come misure di mitigazione consistono in:

- 1) definizione dell'area di influenza e delle caratteristiche acustiche delle immissioni previste. L'attività può essere svolta quando i recettori non sono presenti nell'area, per esempio evitando i periodi di migrazione o i luoghi di riproduzione. Bisogna considerare, però, che queste informazioni possono essere incomplete, difficili da ottenere o non adatte a tutte le specie (Nedwell *et al.*, 2003). Le immissioni programmate non devono superare la soglia che genera disturbi comportamentali (Southall *et al.*, 2007, 2019);
- 2) valutazione delle zone di esclusione. Le zone di sicurezza devono essere definite in funzione della posizione e della potenza della sorgente, della profondità e delle condizioni locali di propagazione (ACCOBAMS, 2007). Gli operatori dovrebbero anticipare o ritardare le attività che producono rumore (JNCC, 2003) o cessarle completamente se specie sensibili entrano nell'area. Può essere necessario stabilire una zona di esclusione più ampia per ridurre gli effetti comportamentali. In alcuni casi si preferisce identificare le specie presenti nell'area di indagine e definire la dimensione della zona di esclusione (a seconda delle condizioni oceanografiche locali e delle caratteristiche della fonte), mentre in altri casi si opera su valori fissati a prescindere dalle dimensioni della strumentazione e delle condizioni oceanografiche (Fossati *et al.*, 2017);
- 3) identificazione dei recettori sensibili. Si devono considerare la risposta fisica, fisiologica e comportamentale degli individui e del gruppo degli animali, specialmente in termini di quei cambiamenti che possano influenzare il benessere individuale. È necessario operare distinzioni tra variazioni brevi che causano problematiche transitorie negli animali e quelle con effetti più duraturi;
- 4) descrizioni complete del rumore prodotto. La valutazione del *soundscape* è richiesta per una valutazione completa. Vanno considerate tutte le informazioni riguardanti i livelli prevalenti di rumore di fondo nell'ambiente, inclusa la presenza di suoni di origine naturale

che possono essere importanti per gli animali, così come l'effetto del *masking* di quei suoni. C'è particolare necessità di raccogliere dati relativi ai livelli naturali ed alle componenti direzionali del moto sonoro particellare, a differenti profondità ed in una varietà di ambienti acquatici;

- 5) valutazione degli impatti cumulativi. Vanno eseguiti nel tempo includendo la considerazione degli impatti storici e stagionali prodotti da altre attività nella specifica area di indagine e nelle regioni vicine;
- 6) osservazioni visive e monitoraggi acustici. Vengono formate delle figure di *Marine Mammal Observers* (MMOs) addestrate a rilevare ed identificare la presenza di mammiferi marini a distanze ravvicinate alla nave durante le ore diurne. L'attività degli MMOs non è efficace in condizioni di scarsa visibilità durante la notte. In questi casi, il monitoraggio acustico attivo (Active Acoustic Monitoring, AAM) e passivo (Passive Acoustic Monitoring, PAM) viene utilizzato come misura di mitigazione e per la valutazione dell'impatto, permettendo di estendere la zona di osservazione effettiva nel caso si decida di adottare un approccio precauzionale. Tuttavia, queste tecniche, non sono molto accurate nel definire in modo preciso la posizione della sorgente rispetto alla zona di sicurezza. La strumentazione utilizzata per mammiferi marini (Guan *et al.*, 2011) si divide tra sensori, *hardware* e *software* per analisi acustica (per. es. PamGuard, SeaPro, XBAT, WhatTrak, ecc.). Vengono formate delle figure di Marine Mammal Observer (MMO) addestrate a rilevare ed identificare la presenza di mammiferi marini a distanze ravvicinate alla nave durante le ore diurne.
- 7) *ramp up*. È il processo che comprende il graduale aumento del livello di pressione acustica prodotta da una fonte antropogenica. In questo modo, gli organismi marini hanno l'opportunità di abbandonare l'area prima che i livelli diventino dannosi. L'efficacia di questo processo deve essere ulteriormente valutata visto che bassi livelli di pressione acustica spesso attraggono animali curiosi piuttosto che dissuaderli (Barlow e Gisiner, 2006).
- 8) La scelta del modello previsionale deve tenere conto sia dei parametri alla sorgente che delle caratteristiche ambientali al contorno che possano influenzare la trasmissione sonora. Non esiste un solo modello valido per ogni scenario, pertanto la scelta può avvenire in funzione di revisioni e comparazioni (Farcas *et al.*, 2016):
il *TG Noise*: conclude che l'uso combinato delle misure e dei modelli (e possibilmente di mappe sonore) sia il modo migliore utilizzabile dagli stati membri di verificare livelli ed andamenti del rumore ambientale nelle bande di frequenza rilevanti (Viola *et al.*, 2017). Questi metodi aiutano nella scelta delle posizioni di monitoraggio e nella scelta dell'equipaggiamento. Inoltre, assicurano che la stima degli andamenti sia più affidabile e più economicamente vantaggiosa, riducendo il tempo richiesto per stabilire l'area di posizionamento delle stazioni di misura ed il numero delle stazioni stesse;
- 9) restrizioni spazio temporali (STR) vengono implementate su attività che generano rumore o nello stadio di pianificazione, restringendo l'attività durante periodi particolarmente delicati per le specie o la zona occupata (JNCC, 2017). La protezione degli habitat chiave attraverso l'implementazione della gestione spaziotemporale è stata frequentemente identificata come uno dei mezzi efficaci e disponibili di mitigazione dell'impatto (Barlow e Gisiner, 2006). Le restrizioni spaziotemporali sono state implementate in vari luoghi in tutto il mondo, tra cui l'Australia e le isole Canarie. Tuttavia, le STRs tendono a favorire aree ben studiate, a differenza di quelle zone povere di dati (Agardy *et al.*, 2007).

Esistono diversi tipi di aree marine in relazione alle fonti di rumore antropogenico (Agardy *et al.*, 2007):

- 1) “area marina protetta”: è un termine generico comunemente usato per descrivere un’area marina protetta per la conservazione delle specie e degli habitat. La sua dimensione va valutata a seconda della sensibilità della specie, della sua mobilità, delle caratteristiche del luogo (batimetria e topografia del fondale) e della fonte di rumore (dB, direzionalità, frequenza, durata e *rate* di ripetizione) (Agardy *et al.*, 2007).

Le modalità per identificare le aree marine protette consistono in:

1. definire gli obiettivi, le restrizioni e lo scopo del processo di pianificazione;
 2. identificare le lacune e le priorità di ricerca. Informazioni spaziali sulle distribuzioni degli habitat, rischi e informazioni socio-economiche;
 3. generare mappe di esposizione: identificare aree di sovrapposizione tra valori di biodiversità e rischi relativi a questi valori;
 4. generare mappe di mitigazione per le aree prioritarie: integrazione con le mappe di esposizione del punto 3;
 5. stabilire le zone di conservazioni prioritarie;
 6. monitorare;
- 2) “zona spaziotemporale” *buffer*: è una zona marina definita attorno ad una protetta per fornire la distanza adeguata o cautelativa tra la fonte di rumore e l’habitat della fauna;
 - 3) “santuario internazionale”: è un’area marina che tutela la conservazione delle specie marine in acque internazionali e che viene stabilita da istituzioni internazionali o gruppi di Paesi. Strategie per identificare queste aree dovrebbero includere aree di elevato valore per le specie minacciate. Queste aree protette possono essere stagionali e/o dinamiche e dovrebbero poter essere modificate col passare del tempo ed essere soggette a revisione nel caso in cui nuove informazioni diventassero disponibili (Heise *et al.*, 2017);
 - 4) “santuario nazionale”: è un’area marina che occupa l’intera zona economica di esclusione (EEZ) di un Paese o di un territorio oltremare.

4.3. Riduzione dei livelli di rumore delle fonti antropogeniche

4.3.1. Rumore navale

L’Organizzazione Marittima Internazionale (International Maritime Organization – IMO), agenzia UN che delinea requisiti globali per il traffico navale internazionale, ha stabilito linee guida non obbligatorie sulle misure di silenziamento delle imbarcazioni (IMO, 2014). Esse sono:

- a) costruzione di navi più silenziose ed adattamento di quelle esistenti. Il rumore delle navi può essere diminuito attraverso buone pratiche di mitigazione che, non solo possono ridurre il rumore meccanico, ma possono, anche, risparmiare il carburante ed aumentare l’efficienza. È possibile progettare le eliche in modo da ridurre la cavitazione che è la fonte della maggior parte del rumore generato dalle navi (Southall, 2005);
- b) moderazione della velocità delle navi. Questa precauzione può diminuire la probabilità di collisioni tra i cetacei e la riduzione di emissioni del rumore (Laist *et al.*, 2001). L’IMO può decidere di aggiustare le rotte o creare nuovi percorsi o restrizioni di velocità per minimizzare l’esposizione dei mammiferi marini sensibili al rumore in modo da preservare habitat critici dal traffico navale. Questo approccio è stato applicato nella zona di esclusione economica US Exclusive Economic Zone (EEZ) e canadese;

- c) *vessel ranking*. La graduatoria delle *sound signature* delle imbarcazioni è molto utile per sviluppare incentivi o programmi basati sulle prestazioni come quelli iniziati dal programma ECHO della Fraser River Port Authority's (FVPA). Le misure possono essere svolte seguendo gli standard ANSI 12.64 (ANSI, 2009) e ISO 17208-1 (ISO, 2016) ed usate per informare i proprietari di imbarcazioni navali delle emissioni che queste producono. Bisogna tener conto delle classi, delle dimensioni e della velocità al momento della misurazione. È possibile identificare le imbarcazioni *'best in class'*, a cui si possono offrire incentivi come tariffe di ormeggio ridotte, come quelle recentemente stabilite dal Vancouver Fraser Port Authority per le imbarcazioni con notazione *'quiet vessel'* (Heise *et al.*, 2017). È importante separare variazioni a breve termine, a causa della presenza locale o temporanea di fauna marina o rumore antropogenico, rispetto alle modifiche a lungo termine dovute a variazioni nei parametri stagionali che possano influenzare propagazione a lungo termine e traffico navale distante;
- d) modifica della rotta. In caso di necessità, per ridurre l'inquinamento acustico in particolari aree, il traffico marittimo può alterare le rotte e stabilire una distanza di sicurezza con gli habitat dei cetacei ed i corridoi di migrazione;
- e) un'altra soluzione di cui si può tener conto riguarda almeno un parziale affidamento alla propulsione a vento: infatti, è possibile equipaggiare le barche commerciali con un enorme *kite* controllato da un computer ("skysails", skysails.info) che possa aiutare il tiraggio con una riduzione di utilizzo del combustibile fino al 35%. Questa nuova tecnologia non è ancora utilizzata in modo diffuso (Wright, 2014);
- f) la propulsione a diesel-elettrico è stata identificata come un'altra opzione efficace per ridurre il rumore sottomarino (Marine Environment Protection Committee, IMO, 2014);
- g) altre tecnologie possono contribuire alla riduzione del rumore per navi esistenti come modifiche operazionali e misure di mantenimento:
- progettazione e installazione di eliche nuove,
 - pulizia dell'elica e dello scafo per rimuovere le incrostazioni e ridurre di molto la rugosità superficiale,
 - installazione di *wake conditioning device*,
 - installazione di iniettori d'aria all'elica (per. es. *in ballast condition*),
 - selezione della velocità considerando una combinazione ottimale di velocità dell'albero e passo dell'elica;
- h) barriere di bolle. Le bolle d'aria in acqua attenuano il suono perché possono variare l'impedenza nel mezzo di propagazione e possono agire come uno specchio acustico. Questo metodo può essere efficace anche a basse frequenze (Gisiner, 1998) e può essere usato per ridurre la propagazione orizzontale del rumore prodotto da *airgun* e dal rumore navale. Questi sistemi, se posizionati attorno alle eliche, sono efficaci nella riduzione del rumore da cavitazione (Urlick, 1983), ma non sono adatti alla riduzione dei suoni di frequenze molto basse come quelle prodotte dalle eliche (Gisiner, 1998).

4.3.2. Riduzione di emissioni

4.3.2.1. Trattamenti di riduzione del rumore per fonti sismiche

La Tabella 21 presenta possibili trattamenti per fonti sismiche.

In dettaglio:

- (SE1) Silenziatore per *airgun*. L'obiettivo è quello di ridurre l'ampiezza del suono generato alle frequenze al di sopra di quelle usate per l'esplorazione sismica. Ciò può essere di particolare beneficio per gli organismi marini con sensibilità uditiva maggiore. Strati di gomma-piuma fonoassorbente sono posizionati su piastre di metallo che sono orientate radialmente verso l'esterno rispetto all'asse centrale dell'*airgun* (Nedwell, 2005). Nedwell (2005) mostra riduzioni di 0-6 dB a frequenze al di sopra dei 700 Hz e aumenti di 0-3 dB soprattutto attorno ai 100 Hz;
- (SE2) *Marine Vibroseis* – 'LACS'. I LACS sono una sorgente acustica che può rimpiazzare gli *airgun*. Il suono è generato attraverso il moto dei pistoni posizionati ad ogni estremità dell'unità. Questo sistema permette di ridurre in modo significativo i livelli sonori a tutte le frequenze. Non ci sono segnali aggiuntivi creati da "bubble noise" come per gli *airgun* (Askeland *et al.*, 2007);
- (SE2b) *Marine Vibroseis* – vibratori marini elettronici. Il sistema utilizza due trasduttori per coprire l'intero range di frequenza 6-100 Hz. I principali vantaggi di questo sistema includono una significativa riduzione del suono a frequenze al di sopra del range utile alle indagini sismiche (sopra i 100 Hz) così come la riduzione del livello acustico. Questo sistema sembra essere adatto alle applicazioni in acque basse, tuttavia per maggiori profondità è possibile usare *array* (Tehghamn e Stenze, 2006);
- (SE3) Rumore ambientale. Questa tecnica usa un *array* di idrofoni verticale attaccati ad una boa. Il rumore ambientale generato dal vento sulla superficie dell'acqua è misurato ed analizzato. Siccome il livello di sorgente di questi segnali è molto basso, i dati devono essere raccolti per lunghi periodi di tempo, caratteristica che rende questa tecnica poco adatta all'esplorazione di nuove aree (Spence *et al.*, 2007);
- (SE4) Barriera di bolle. In questo metodo, le barriere di bolle sono create ai due lati della sorgente sismica. Riduzioni di 9 dB sono possibili a 40 Hz con aumento dell'efficacia fino a 30 dB al di sopra degli 80 Hz. Le riduzioni vengono misurate per tutti i luoghi nei quali la fonte non sia in vista (Spence *et al.*, 2007);
- (SE5) Generatore di onde di taglio. Le onde di taglio create sul fondale oceanico possono essere usate per identificare le caratteristiche della superficie. Un generatore di onde di taglio è posto sul fondale oceanico in modo da creare onde di taglio e non radiazione acustica.

Tabella 21 - Trattamenti per fonti sismiche (tabella modificata da Spence *et al.*, 2007).

	Nome	Riduzione	Range di frequenza
SE1	Silenziatore per <i>airgun</i>	0-3 dB aumento 0-6 dB riduzione 1.3-2x aumento	< 700 Hz >700 Hz Livello dell'impulso del picco
SE2	<i>Marine Vibroseis</i> –'LACS'	≈15dB 25-45 dB 45dB min	0-100Hz 100-1000 Hz >1000 Hz
SE2b	<i>Marine Vibroseis</i> – electronically driven	≈15dB 60dB 60dB min	0-100Hz 100-600 Hz >600Hz
SE3	Rumore ambientale	Potenziale eliminazione rumore antropogenico	tutte
SE4	Barriere di bolle	9-30dB	40-80Hz
SE5	Generatore di onde di taglio	No dati	No dati

4.3.2.2. Trattamenti di riduzione del rumore per palificazione

Le modalità di riduzione del rumore di palificazione sono riportate in Tabella 22.

Tabella 22 - Riduzione di palificazione del rumore (tabella modificata da Spence *et al.*, 2007).

	Nome	Riduzione	Metrica
PD1	<i>Bubble Curtain</i>	5-20dB	RMS +/- picco SEL
PD2	Palificazione alternativa	10-20dB	Picco
PD3	<i>Vibratory Hammers</i>	10-20dB	
PD4	Palificazione a pressa	Grosse riduzioni	Tutte

In dettaglio:

- (PD1) *bubble curtain* e *bubble tree*. Una *bubble curtain* è una parete di bolle d'aria prodotta attorno al luogo nel quale avviene la palificazione. Le bolle sono create forzando l'aria attraverso piccoli fori nel metallo o anelli in PVC usando compressori ad aria. Riduzioni nel livello di pressione massima (RMS) ed energia sono tipicamente dell'ordine dei 5-20 dB. Per essere efficaci le pareti di bolle devono avvolgere completamente il palo lungo l'intera colonna d'acqua. Inoltre, l'efficacia di questa tecnica dipende da vari fattori incluso lo spessore della parete, la dimensione e la densità delle bolle e la profondità dell'acqua. Questo metodo è utilizzabile nelle acque costiere e poco profonde (Spence *et al.*, 2007);
- (PD2) palificazione alternativa. Questo approccio si basa sull'utilizzo di una barriera solida fisica di pali ad H. Rispetto ai pali tradizionali, questi possono comportare differenze dell'ordine dei 10-20 dB. I dati sono scarsi e servono ulteriori test (Spence *et al.*, 2007);
- (PD3) *vibratory hammer*. I *vibratory hammer* vibrano in modo continuo, o quasi, ad una frequenza nel *range* di 10-60 Hz (Nedwell, 2003). Il tempo di insorgenza ed i livelli di pressione massima e minima che costituiscono la preoccupazione principale in molte applicazioni, tra cui le misure di mitigazioni della mortalità dei pesci, sono anche significativamente ridotti usando questo metodo. Tuttavia, potrebbero crearsi delle problematiche nel rimpiazzare un tipo di fonte impulsiva con una continua. Ulteriore ricerca è necessaria per caratterizzare meglio questa tecnica (Spence *et al.*, 2007);
- (PD4) palificazione a pressa. Questi sistemi fanno leva su pali precedentemente installati. Questa fonte rimuove tutti i tipi di fonti impulsive. Anche in questo caso, ci sono pochi dati disponibili, ma ci si aspetta livelli sonori bassi rispetto alle tecniche convenzionali. Misure delle vibrazioni nel terreno durante le installazioni terrestri danno parziale conferma di queste ipotesi (Spence *et al.*, 2007).

4.3.2.3. Trattamenti per imbarcazioni

I trattamenti per le imbarcazioni sono riportati in Tabella 23.

Tabella 23 - Trattamenti per imbarcazioni (tabella modificata da Spence *et al.*, 2007).

	Nome	Riduzione	Range di frequenza
PT1	Eliche a basso rumore	3-10dB	Tutte
PT2	Eliche di materiali compositi	Pochi dati	Pochi dati
PT3	Emissione di bolle	>10dB aumento di 0-10dB	>500Hz 20-80Hz

I trattamenti specifici che potrebbero essere usati su ogni imbarcazione dipenderanno dall'assetto della nave, dalle caratteristiche della fonte e dai livelli di rumore marino richiesti:

Il contributo principale è il rumore prodotto dalla cavitazione: si cercano, quindi, trattamenti e *design* delle pale che ritardino o riducano l'insorgenza di questo fenomeno. Il modo migliore di ridurre la cavitazione è quello di aumentare l'uniformità delle condizioni di flusso entranti ed uscenti dell'elica. Inoltre, è sempre meglio ridurre il carico dell'elica aumentandone il diametro e riducendo la velocità di rotazione. Il progetto che prevede il silenziatore include modifiche ai parametri comuni come: variazioni nella velocità delle punte delle pale, *skew*, spessore e numero delle pale. Non sono necessari materiali speciali o trattamenti addizionali e la riduzione nel livello di rumore possono essere significativi, dell'ordine dei 3-10 dB o più. Queste modifiche sono spesso possibili per imbarcazioni esistenti rimpiazzando le eliche esistenti con nuove versioni migliorate (Spence *et al.*, 2007).

(PT2) eliche costruite con materiali compositi: danno migliori prestazioni per quanto riguarda la cavitazione. Modelli teorici danno un'insorgenza di velocità di cavitazione più elevata del 30% in confronto con l'elica costruita con nickel alluminio e bronzo (NiBrAl). Questo risultato promettente è dovuto alla combinazione dei materiali e alla nuova forma.

4.4. Linee guida più usate per l'implementazione di misure di mitigazione

4.4.1. ASCOBANS

Dopo varie modifiche, le linee guida ASCOBANS sono entrate in vigore nel 1994 (dopo la convenzione sulle specie migratorie, Convention on Migratory Species - CMS o Bonn Convention, Dolman *et al.*, 2010). Nel febbraio del 2008, entra in vigore un'estensione che cambia il nome a "Agreement on the Conservation of Small Cetaceans of the Baltic, North East Atlantic, Irish and North Seas".

Queste linee guida sono state abbozzate insieme a quelle stabilite dal comitato scientifico dell'accordo ACCOBAMS (Agreement on the Conservation of the Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea, ed aree contigue atlantiche- <http://accobams.noiseregister.org>). Le principali raccomandazioni riguardano in modo specifico i sonar militari e civili ad elevate potenze e possono essere suddivise in tre fasi principali (ASCOBANS, 2009).

Fasi di pianificazione:

1. le aree di esercizio devono essere ben studiate prima di iniziare, in modo da pianificare il miglior uso possibile dei dati ottenuti da indagini già svolte e modelli predittivi;

2. evitare le caratteristiche oceanografiche importanti, come i *canyons*, le pareti ripide, e le montagne sottomarine, l'*upwelling* persistente, e le baie, così come le aree marine protette, e le aree ad elevata densità;
3. le marine militari dovrebbero implementare in modo esteso i sistemi di monitoraggio acustico passivo (PAM) come strumento efficace per identificare aree ad elevate densità.

Mitigazione in tempo reale:

1. adottare le basi scientifiche e precauzionali per una zona di esclusione tenendo in considerazione le caratteristiche della fonte sonora e le caratteristiche della propagazione;
2. le procedure di mitigazione dovrebbero essere pratiche, usando dati che possono essere prontamente utilizzati dai *marine mammal observers*;
3. la mitigazione dovrebbe includere monitoraggio e protocolli per fornire informazioni riguardo le procedure implementate e la loro efficacia, e i set di dati che possano essere usati per migliorare i *database* esistenti;
4. durante le operazioni, allertare gli *stranding networks* nell'area e introdurre ulteriore sorveglianza se necessario;
5. cessare le operazioni se si nota un comportamento anomalo, spiaggiamenti o morte che si pensa siano in relazione all'attività;
6. uso restrittivo notturno delle sorgenti ad elevata potenza durante periodi di bassa visibilità. A causa dell'impatto delle condizioni meteo avverse sulla rilevazione visiva dei mammiferi, le emissioni durante condizioni non favorevoli dovrebbero essere limitate;
7. dovrebbe essere utilizzato monitoraggio acustico passivo svolto con *array* o *sonobuoy*, per migliorare le capacità di rilevamento;
8. prima di iniziare qualunque emissione, ci dovrebbe essere a un monitoraggio visivo di almeno 30 minuti per assicurarsi che non ci siano animali all'interno dell'area di esclusione;
9. al momento dell'introduzione della sorgente sonora è necessario un aumento lento della potenza acustica (*ramp-up* o *soft start*) che dia la possibilità ai mammiferi marini di lasciare l'area.

Monitoraggio post-esercizio:

1. deve includere le indagini sui cetacei all'interno dell'area di esercizio;
2. deve relazionare alle autorità nazionali rispettando una scala temporale predeterminata;
3. deve essere definita la modellazione del campo sonoro generato in relazione alle caratteristiche oceanografiche (profondità/profilo di temperatura, canali sonori, profondità dell'acqua, caratteristiche del fondale) e con l'esistente *background noise*;
4. le procedure per raccogliere dati osservazionali dovrebbero essere basate su un protocollo standardizzato.

4.4.2. ACCOBAMS

L'obiettivo di ACCOBAMS (<http://accobams.noiseregister.org>, Agreement on the Conservation of Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea, ed aree contigue atlantiche) è favorire lo stato di conservazione dei cetacei nell'area (Dolman *et al.*, 2010). Dopo non aver raggiunto un accordo riguardo alle linee guida (Dubrovnik, ottobre 2007), viene adottata la Risoluzione 3.10 che spinge alla scelta di una migliore gestione e migliori misure di mitigazione tra cui:

- a) particolare attenzione alla gestione di habitat che ospitano specie particolarmente sensibili;
- b) inclusione di fonti ad elevata potenza nei piani di gestione;

- c) implementazione di misure di mitigazione e di monitoraggio per le attività di produzione del rumore all'interno dell'area ACCOBAMS, evitando le aree ad elevate densità di mammiferi marini e le aree marine protette e definendo delle zone di *buffer* appropriate attorno ad essi. Vanno stabilite zone di esclusione, monitorando in modo efficace i mammiferi vicino alla fonte e gestendo le attività alla luce degli impatti derivanti da molteplici fonti.

4.4.3. JNCC

Il Joint Nature Conservation Committee (JNCC; <http://data.jncc.gov.uk/data>) fornisce linee guida per le attività industriali e civili e divenne il primo a stilare linee guida per minimizzare gli impatti del rumore prodotto dalle indagini sismiche sui mammiferi marini (JNCC, 2010).

Pianificazione

Una pianificazione adeguata è necessaria per ridurre o eliminare l'impatto sui mammiferi marini. Le condizioni ambientali sono attive durante tutta la vita del progetto e devono essere incluse nel processo di pianificazione in modo da facilitare decisioni informate riguardo le migliori località per le attività sismiche. L'evitamento di aree nelle quali i mammiferi marini sono soliti essere presenti dovrebbero essere prioritizzate, ma se ciò non è possibile, è necessario evitare indagini in periodi di particolare importanza, come quelli riproduttivi. Abbondanza e uso dell'habitat sono soggetti a variabilità interannuale, quindi è preferibile un monitoraggio pre-attività di tre o più anni.

Zone di sicurezza: dimensione e funzione

Per essere efficaci, le zone di esclusione devono essere basate su dati provenienti da studi scientifici e devono essere appropriate per tutelare le specie più sensibili (Tyack *et al.*, 2011). Le linee guida JNCC richiedono solo il mantenimento di una zona di mitigazione pre-indagine. Si esamina un'area con un raggio di 500 m dal centro dell'*array* dell'*airgun* per 30 minuti prima dell'inizio del *soft-start* per determinare l'assenza di animali. In acque più profonde di 200 m la durata del monitoraggio visivo pre-esercizio si estende a 60 minuti per tenere conto di specie che si inabissano più a lungo. Se vengono rilevate specie marine il *soft-start* viene ritardato di 20 minuti dopo l'ultimo avvistamento (JNCC, 2010).

Uno dei difetti principali si verifica quando l'*array* è sufficientemente grande, creando una zona di mitigazione contenuta nell'*array*. Di conseguenza, un animale che è 500 m lontano dal centro può essere in realtà solo pochi metri lontano dall'*airgun* più vicino (Weir e Dolman, 2007).

Marine Mammal Observers

Il loro ruolo è di consulenza visto che possono solamente raccomandare un ritardo nell'inizio dell'attività sismica se i mammiferi marini vengono rilevati. Inoltre, gli MMOs possono dare consigli riguardo le procedure e le linee guida delle misure di mitigazione visto che i membri dell'equipaggio non sono tenuti a conoscerle (JNCC, 2010). Uno dei principali problemi consiste nel monitorare una zona di sicurezza determinando la distanza tra l'animale ed il centro dell'*array*. Le linee JNCC raccomandano l'uso di un *range finding stick* ed un'equazione per calcolare i 500 m (JNCC, 2010). Tuttavia, l'osservatore non è posizionato al centro dell'*array* e deve smettere di utilizzare il binocolo per cercare gli animali prima di localizzarli nuovamente ad occhio nudo.

Monitoraggio acustico passivo (PAM)

Vengono utilizzati come supplemento delle indagini visive per mantenere la zona di sicurezza (JNCC, 2010). Questo sistema funziona solo quando i mammiferi marini stanno vocalizzando e solo se sono abbastanza vicini agli idrofoni. Inoltre, non è possibile preparare un software per visualizzare i suoni di tutte le specie nello stesso momento.

Misure pre-indagine di mitigazione della fonte

I *soft-starts* (o *ramp-ups*) comprendono l'aumento graduale di livelli di sorgente degli *airgun* fino a livelli operativi prima dell'indagine sismica durante un periodo di 20 minuti in modo da dare il tempo necessario agli animali di lasciare l'area prima di esporli a livelli pericolosi (JNCC, 2010). Tuttavia, questa procedura si basa sull'ipotesi che l'animale si allontanerà dalla fonte, ma sono state osservate altre risposte.

4.4.4. CMRE

Il CMRE (Centre for Maritime Research and Experimentation, La Spezia, IT) definisce linee guida per operazioni navali militari.

Sfortunatamente, questi protocolli non sono ancora standardizzati (Wright e Cosentino, 2015; Fossati *et al.*, 2017).

5. Conclusioni

La Comunità Europea è sempre maggiormente preoccupata dall'esposizione continua e a lungo termine del rumore della fauna marina, dal suo elevato costo economico, sociale e sanitario. Il concetto è chiaramente espresso dalla Marine Strategy Framework Directive (MSFD) all'interno del Descrittore 11 e dai risultati del lavoro del *Technical Group Noise (TG Noise)* istituito dalla Commissione per agevolare l'implementazione della MSFD rispetto al Descrittore 11 da parte degli Stati Membri.

Gli animali marini, soprattutto i mammiferi, usano il suono per comunicare, per ecolocalizzare e per scandagliare l'ambiente nel quale vivono. Attraverso l'evoluzione, hanno adattato le loro curve uditive alle nuove dinamiche del *background* del rumore naturale nell'era preindustriale. Tuttavia, attualmente, il rumore prodotto dall'uomo (tecnofonia) eccede in modo severo il *background* naturale (Pavan *et al.*, 2018).

Si riconoscono fonti naturali principali: atmosferiche, oceanografiche, geofisiche, biologiche e fonti antropogeniche principali: sonar (militari – fonti impulsive), esplorazioni sismiche (*airguns* – fonti impulsive, attività *offshore* e *pile driving* (fonti impulsive (fase di costruzione) e fonti continue (fase operativa)), traffico navale (fonti continue), esplosioni (fonti impulsive), (Hildebrand, 2009).

Viene riconosciuto che il rumore marino è una scienza relativamente giovane nella quale, nonostante il numero in aumento di progetti e studi, molto deve essere ancora compreso. La ricerca, infatti, ad esempio, si focalizza sui mammiferi marini, mentre pesci ed invertebrati devono essere ulteriormente studiati, in modo da permettere una maggior conoscenza di come il suono possa inficiare ciò che accade in tutta la rete trofica.

Il rumore marino è largamente diffuso ed è necessario considerare gli effetti a lungo termine cumulativi, sinergici rispetto ad altre fonti inquinanti. È essenziale regolamentare le emissioni provenienti dalle fonti antropogeniche in modo da preservare la fauna marina e la sua importanza economica. Le popolazioni di animali (come, ad esempio, quelle di mammiferi marini) giocano un ruolo fondamentale non solo negli ecosistemi marini biologici, ma anche nel cambiamento climatico attraverso la cattura e lo stoccaggio della CO₂ (Chami *et al.*, 2019).

Le popolazioni di mammiferi marini necessitano di un ambiente acustico adatto per completare i loro cicli biologici. Sebbene non esistano mari o oceani acusticamente incontaminati, è necessario definire una *baseline* in modo da capire l'evoluzione temporale (dinamica).

Per ottenere una visione comprensiva degli effetti sulle popolazioni, l'analisi deve iniziare dagli individui (impatti diretti) e, quindi, espandersi considerando gli effetti sulla popolazione. La ricerca deve considerare anche gli effetti sugli stadi della vita degli organismi marini, anche a lungo termine.

Il *fitness* animale deve essere valutato considerando il numero di animali, la sensibilità delle specie, la riproduzione, la mortalità, le riposte comportamentali tra cui la fuga (*avoidance*) dalle aree contaminate. L'assuefazione, che può mascherare la reazione all'aumento dello stress, non deve essere considerata una soluzione. È importante considerare l'impatto diretto sugli individui, le conseguenze sia a breve che lungo termine sugli individui, sulle comunità, sulle popolazioni, sulle specie, sull'intero ecosistema e sulla rete trofica. Particolare attenzione deve essere rivolta agli habitat critici, alle rotte migratorie e alle specie sensibili (Licitra *et al.*, 2015).

Nuovi concetti devono essere sviluppati per definire le dosi di rumore accettabili e garantire un comfort acustico adeguato a tutte le creature marine. Laddove ci sia una mancanza di informazioni scientifiche, si applica il principio di precauzione (COM, 2000).

Stress, danni al sistema immunitario, patologie relative a questo problema, variazioni comportamentali e *masking* devono essere considerati in egual misura. Tuttavia, sebbene esistano indicatori di stress cumulativi (come i biomarcatori), molto lavoro deve essere ancora fatto per discernere tra i fattori di stress e quelli dovuti al rumore in ambiente marino. Differenze nelle capacità uditive, nella struttura uditiva e nelle connessioni tra l'orecchio e le strutture anatomiche periferiche devono essere maggiormente studiate (Lucke *et al.*, 2011; Hawkins *et al.*, 2015). Le sensibilità uditive devono essere misurate attraverso tutto lo spettro uditivo funzionale, dove possibile, piuttosto di verificare solo le frequenze contenute nei segnali di comunicazione delle specie considerate (Reichmuth *et al.*, 2013). I risultati di questi studi dovrebbero permettere di raccogliere dati per sviluppare esperimenti futuri e applicabili ad un *range* di specie più ampio e criteri basati su *dose-response* per effetti fisici, fisiologici, comportamentali e tutti quelli che possano peggiorare le funzioni di vita di base.

L'industria e la ricerca scientifica devono lavorare assieme per sviluppare fonti alternative meno rumorose che mantengano lo stesso livello di efficienza e allo stesso tempo valutare l'effetto degli impatti sulla fauna marina. L'efficienza della strumentazione e dei dispositivi deve essere preservata mentre si cercano opzioni sostenibili.

Le analisi di dati riguardanti il rumore sottomarino necessitano di metodologie e misure standardizzate. Gli strumenti predittivi (numerici e sperimentali) vanno migliorati per aumentare la

comprensione dei meccanismi fondamentali di generazione e propagazione. Un'altra importante problematica è la necessità di comprendere tutte le componenti che giocano un ruolo nella propagazione del suono: fonte, mezzo e ricevitore. A complicare ulteriormente le cose, le fonti ed i ricevitori non sono statici e il suono viene modificato dalle diverse condizioni del mezzo di propagazione. I modelli dovrebbero tener conto della propagazione del suono sulle acque superficiale e lungo la colonna d'acqua (Southall *et al.*, 2007; Normandeau Associates, 2012; Hawkins *et al.*, 2015).

Ulteriori studi sono necessari per rispondere a problemi chiave, soprattutto per certi taxa (carnivori marini, sirenidi), e quelli che prevedano variazioni sistematiche di SPL, SEL, durata del segnale e contenuti di frequenza (Southall *et al.*, 2007, 2019; Finneran, 2015).

Un'importante tema è la validazione scientifica delle misure di mitigazione che permetterebbe di creare soluzioni tecniche da mettere in atto come ultima soluzione, dopo aver utilizzato fonti antropogeniche meno acusticamente inquinanti. Per il rumore marino sono state formulate linee guida ACCOBAMS, ASCOBANS e JNCC. Tuttavia gli accordi intergovernamentali non vengono considerati legalmente vincolanti dagli Stati e non vengono utilizzati in modo uniforme. È necessario quindi che sistemi di monitoraggio e misure preventive vengano implementati da ogni paese in armonia con gli stati membri che si affacciano sulle stesse regioni identificate dalla MSFD.

L'*Open access* ai dati, che devono anche essere confrontabili, ha un impatto sulla scienza e, quindi, è necessario enfatizzare i principi di FAIR (*Findable, Accessible, Interoperable and Reusable*).

Infine, lo sfruttamento dell'oceano deve essere considerato responsabilità di tutti e l'accettazione di questa problematica da parte della società è essenziale. Basandoci su attività di ricerca e progresso tecnologico per sviluppare la conoscenza dell'oceano, l'*Oceans Ethics* tiene in considerazione fattori esterni come problematiche sociali, politiche, economiche, ambientali e culturali per mettere in atto comportamenti responsabili che potranno supportare la sostenibilità dell'oceano (Barbier *et al.*, 2018).

È, quindi, auspicabile che le istituzioni scientifiche, le amministrazioni dello stato, le associazioni non-governative e tutti i portatori di interessi, pubblici e privati, collaborino per una rapida implementazione della MSFD a livello regionale al fine di consentire la definizione condivisa di misure di mitigazione dell'impatto del rumore antropico sugli ecosistemi marini. Tali misure di mitigazione devono garantire la sostenibilità sia per l'ambiente che per l'economia del mare.

Ringraziamenti. Si ringrazia Gianni Pavan (Centro Interdisciplinare di Bioacustica e Ricerche Ambientali - CIBRA, Dipartimento di Scienze della Terra e dell'Ambiente, Università degli Studi di Pavia) per la revisione critica di questo documento. Inoltre, la stesura ha beneficiato di una revisione da parte di Angelo Camerlenghi (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS) e di una discussione critica con Junio Fabrizio Borsani (Istituto Superiore per la Ricerca Ambientale – ISPRA). Si ringraziano anche Franco Coren, Paola Del Negro, Mounir Ghribi, Stefano Parolai, Maria Cristina Pedicchio e Cosimo Solidoro (Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale – OGS) per il supporto ricevuto. Lo studio è stato realizzato nell'ambito di un tirocinio extracurricolare post lauream promosso dall'Università degli Studi di Trieste e finanziato dalla struttura ICAP (Servizio di Supporto Tecnico Scientifico per l'Internazionalizzazione, la Comunicazione, l'Alta formazione e la Promozione della ricerca) di OGS nell'ambito dell'iniziativa Blue Growth sponsorizzata dal Ministero dell'Istruzione dell'Università e della Ricerca (MIUR).

Bibliografia

BIBLIOGRAFIA PREFAZIONE

- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., Watson, R. 2008 A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*. **319**: 948.
- Hildebrand, J. A. 2009 Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar Ecol Prog Ser*. **395**: 5-20.
- Merchant, N. D., Brookes, K. L., Faulkner, R. C., Bicknell A. W. J., Godley, B. J., Witt, M. J. 2016 Underwater noise levels in UK waters. *Nature Sci Rep*. **6**: 36942.
- Richardson, W. J., Greene, C. R., Malme, C. I., Thomson, D. H. 1995 Marine Mammals and Noise. Academic Press, New York. 576 pp.

BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 1

- André, M., Morell, M., Mas, A., Solé, M., Van der Schaar, M., Houégnigan, L., Zaugg, S., Castell, J. V., Baquerizo, C. A., Roch, L. R. 2009 Best practices in management, assessment and control of underwater noise pollution. Report: <http://www.lab.upc.edu/papers/BestPracticesNoiseLAB.pdf>. 105 pp.
- André, M., Nachtigall, P. E. 2007 Electrophysiological measurements of hearing in marine mammals. *Aquatic Mammals*. **33**(1): 1-5.
- Boyd, I., Brownell, B., Cato, D., Clarke, C., Costa, D., Evans, P. G. H., Gedamke, J., Gentry, J., Gisiner, R., Gordon, J., Jepson, P., Miller, P., Rendell, L., Tasker, M., Tyack, P., Vos, E., Whitehead, H., Wartzok, D. & Zimmer, W. 2008 The effects of anthropogenic sound on marine mammals – a draft research strategy. European Marine Board position paper 13, Joint Marine Board-European Science Foundation and National Science Foundation workshop, Oxford, UK, 4–8 Oct 2005.
- Comini, G. 2005 Appunti di acustica applicata <www.dieg.uniud.it/prof-comini/app_acu.pdf>
- Fay, R. R., Popper, A. N. 2000 Evolution of hearing in vertebrates: the inner ears and processing. *Hearing Research*. **149**: 1-10.
- Greene, C. R. Jr., Richardson, W. J. 1998 Characteristics of marine seismic survey sounds in the Beaufort Sea. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **83**(6): 2246.
- Halpern, B. S., Walbridge, S., Selkoe, K. A., Kappel, C. V., Micheli, F., D'Agrosa, C., Bruno, J. F., Casey, K. S., Ebert, C., Fox, H. E., Fujita, R., Heinemann, D., Lenihan, H. S., Madin, E. M. P., Perry, M. T., Selig, E. R., Spalding, M., Steneck, R., Watson, R. 2008 A global map of human impact on marine ecosystems. *Science*. **319**: 948-952.
- Hildebrand, J. A. 2005 Impacts of Anthropogenic Sound on Cetaceans. *Mar Ecol Prog Ser*. **395**: 5-20.
- Hildebrand, J. A. 2009 Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar Ecol Prog Ser*. **395**: 5-20.
- National Research Council 2003 Ocean noise and marine mammals. Washington, DC: National Academies Press. 220 pp.
- Richardson, W. J., Greene, C. R., Malme, C. I., Thomson, D. H. 1995 Marine Mammals and Noise. Academic Press, New York. 576 pp.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Roger, G. L. 2007 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*. **33**(4): 411-521.
- Stocker, M. 2002 Fish, mollusks and other sea animals' use of sound, and the impact of anthropogenic noise in the marine acoustic environment. *J. Acoust. Soc. Am*. **112**: 2431–2424.
- Williams, R., Wright, A. J., Ashe, E., Blight, L. K., Bruintjes, R., Canessa, R., Clark, C.W., Cullis-Suzuki, S., Dakin, D.T., Erbe, C., Hammond, P.S., Merchant, N.D., O'Hara, P.D., Purser, J., Radford, A. N., Simpson, S.D., Thomas, L., Wale, M.A. 2015 Impacts of anthropogenic noise on marine life: Publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean & Coastal Management*. **115**: 17-24.
- WODA Technical guidance on underwater sound in relation to dredging. 2013 World Organization of Dredging Associations, Delft, The Netherlands. 1-8.

BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 2

- Almada, V.C., Carreiro, H., Faria, C., Gonc ,alves, E.J. 1996 The breeding season of *Coryphoblennius galerita* (Pisces: Blenniidae) in Portuguese waters. *Journal of Fish Biology*. **48**: 295-297.
- Amorim, M.C.P. 1996 Acoustic communication in triglids and other fishes. Ph.D. thesis. Univ. Aberdeen, UK.
- Amorim, M.C.P., Hawkins, A. D. 2000 Growling for food: acoustic emissions during competitive feeding of the streaked gurnard. *J. Fish Biol*. **57**: 895–907.

- Amorim, M.C.P., Stratoudakis, Y., Hawkins, A. D. 2004 Sound production during competitive feeding in the grey gurnard, *Eutrigla gurnardus* (Triglidae). *J. Fish Biol.* **65**: 182–194.
- Amorim, M.C.P. 2006 Diversity of sound production in fish. In *Communication in Fishes*. Vol. 1 (ed. F. Ladich, S. P. Collin, P. Moller and B. G. Kapoor). Enfield, NH: Science Publishers: 71-104.
- Asselin, S., Hammill, M. O., Barrette, C. 1993 Underwater vocalizations of ice breeding grey seals. *Can. J. Zool.* **71**: 2211-2219.
- Au, W.W.L. 1993 *The Sonar of Dolphins*, Springer-Verlag, New York, N.Y.
- Au, W.W.L. 2018 Echolocation. In: *Encyclopedia of marine mammals*. Third edition. Elsevier: Academic Press. 289-299.
- Aubin, T. 1986 Le phenomere ne deux voix et le codage de l'information dans les signaux acoustiques d'oiseaux. Etude appliquee aux cris de detresse de l'etourneau (*Sturnus vulgaris*). *C. R. Acad. Sci.* **302**: 553-556.
- Aubin, T., Jouventin, P. 1998 Cocktail-party effect in king penguin colonies. *Proc. R. Soc. Lond. B.* **265**: 1665-1673.
- Aubin, T., Jouventin, P., Hildebrand, C. 2000 Penguins use the two-voice system to recognize each other. *Proc. R. Soc. Lond. B.* **267**: 1081-1087.
- Ballantyne, P. K., Colgan, P.W. 1978 Sound production during agonistic and reproductive behaviour in the pumpkinseed (*Lepomis gibbosus*), the bluegill (*Lepomis macrochirus*), and their hybrid sunfish. *Biology of behaviour.* **3**(3): 221-232.
- Bartholomaeus, T., C., Larsen, C. F., O'Neel, S. 2013 Does calving matter? Evidence for significant submarine melt. *Earth and Planetary Science Letters.* **380**: 21-30.
- Bartlett, M. L. & Wilson, G. R. 2002 Characteristics of small boat signatures (Abstract only). *Journal of the Acoustical Society of America.* **112**(5): 2221.
- Bartol, S. M., Musick, J. A., Lenhardt, M. L. 1999 Auditory evoked potentials of the loggerhead sea turtle (*Caretta caretta*). *Copeia.* **3**: 836-840.
- Bass, A.H., Baker, R. 1991 Evolution of homologous vocal control traits. *Brain Behav. Evol.* **38**: 240–254.
- Bass, A.H., Bodnar, D. A., Marchaterre, M. A. 1999 Complementary explanations for existing phenotypes in an acoustic communication system. In: *Neural Mechanisms of Communication*. M. Hauser and M. Konishi (eds.) MIT Press, Cambridge, MA. 493–514.
- Bass, A. H., Marchaterre, M. A. 1989 Sound –generating (sonic) motor system in a teleost fish (*Porichthys notatus*) sexual polymorphism in the ultrastructure of myofibrils. *Journal of Comparative neurology.* **286**: 141-153.
- Bergert, B. A., Wainwright, P. C. 1997 Morphology and kinematics of prey capture in the syngnathid fishes *Hippocampus erectus* and *Syngnathus floridae*. *Marine Biology.* **127**: 563-570.
- Betke K., Schultz-von Glahn M., Matuschek R. 2004 Underwater noise emissions from offshore wind turbines. Proc CFA/DAGA 2004, Strasbourg.
- Blackburn, J., Daniels, J., Dingwall, S., Hampden-Smith, G., Leaney, S., Le Calvez, J., Nutt, L., Menkiti, H., Sanchez, A., Schinelli, M. 2007 Borehole seismic surveys: Beyond the vertical profile. *Oilfield Review.* **19**: 20-35.
- Blomqvist, C., Mello, I., Amundin, M. 2005 An acoustic play-fight signal in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) in human care. *Aquat. Mamm.* **31**: 187–194.
- Boyle, K. S., Riepe, S., Boen, G., Parmentier, E. 2015 Variation in swim bladder drumming sounds from three doradid catfish species with similar sonic morphologies. *Journal of Experimental Biology.* **218**: 2881-2891.
- Bradbury, J. W., Vehrencamp, S. L. 1998 Principles of animal communication. *Sites.sinauer.com*
- Brantley, R.K., Bass, A. H. 1994 Alternative male spawning tactics and acoustic signals in the plainfin midshipman fish, *Porichthys notatus* (Teleostei, Batrachoididae). *Ethology.* **96**: 213–232.
- Bremond, J. C., Aubin, T., Nyamsi, R. M., Robisson, P. 1990 Le chant du manchot empereur (*Aptenodytes forsteri*): recherche des parametres utilisables pour la reconnaissance individuelle. *C. R. Acad. Sci.* **311**: 31-35.
- Budelmann, B. U. 1992 Hearing in Crustacea. In *Evolutionary Biology of Hearing* (D. B. Webster, R. R. Fay, and A. N. Popper, eds.), pp. 131–139. Heidelberg: Springer-Verlag.
- Burkenroad, M. D. 1931 Notes on the sound-producing marine fishes of Louisiana. *Jstor.* **1**: 20-28.
- Butler, R. 2006 Observations of polarized seismoacoustic T waves at and beneath the seafloor in the abyssal Pacific Ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* **120**: 3599–3606.
- Caldwell, J., and Dragoset, W. 2000 A brief overview of seismic air-gun arrays. *The Leading Edge.* **19**: 898-902.
- Caplan-Auerbach, J., Duennebie, F. 2001 Seismic and acoustic signals detected at Lo`ihi Seamount by the Hawai`i Undersea Geo-Observatory, *Geochem. Geophys. Geosyst.* **2**(5).

- Carroll, A. G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., Bruce, B. 2017 A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Marine Pollution Bulletin*. **114**(5): 9-24.
- Carson, B. A., Bass, A. H. 2000 Sonic/Vocal Motor Pathways in Squirrelfish (Teleostei, Holocentridae). *Brain, behavior and evolution*. **56**: 14-28.
- Cato, D. H. 1992 The biological contribution to the ambient noise in waters near Australia. *Acoustic Australia*. **20**: 3-7.
- Cato, D. H., 1976 Ambient sea noise in waters near Australia. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **60** (2): 320-328.
- Cato, D. H., Bell, M. J. 1992 Ultrasonic ambient noise in Australian shallow waters at frequencies up to 200 kHz. Material Research Laboratory technical Report. MRL-TR-91-23.
- Cato, D. H., McCauley, R. D. 2002 Australian research in ambient sea noise. *Acoustics Australia*. **30**:1-13.
- Central Dredging Association 2011 CEDA position paper: underwater sound in relation to dredging. *Terra et Aqua*. **125**: 23-28.
- Chen, K.C., Mok, H. K. 1988 Sound production in the anemonefishes *Amphiprion clarkii* and *A. frenatus* (Pomacentridae) in captivity. *Jap. J. Ichthyol.* **35**: 90-97.
- Cherry, C. 1966 On human communication, a Review, a Survey, and a Criticism. Second Edition, the M.I.T. Press, Cambridge, Massachusetts. 337 pp.
- Christensen-Dalsgaard, J., Brandt, C., Willis, K. L., Christensen, C. B., Ketten, D., Edds-Walton, P., Fay, R. R., Madsen, P. T., Carr, C. E. 2012 Specialization for underwater hearing by the tympanic middle ear of the turtle, *Trachemys scripta elegans*. *Proc. R. Soc. B*. **279**: 2816-2824.
- Clark, C. W. 1983 Acoustic communication and behavior of the southern right whale (*Eubalaena australis*). In "Communication and Behavior in Whales" (R. Payne, ed.). Westview Press, Boulder. 163-198.
- Clode, D., Birks, J. D. S., Macdonald, D. W. 2000 The influence of risk and vulnerability on predator mobbing by terns (*Sterna spp.*) and gulls (*Larus spp.*). *J. Zool.* **252**: 53-59.
- Connaughton, M. A. 2004 Sound generation in the searobin (*Prionotus carolinus*), a fish with alternate sonic muscle contraction. *The Journal of experimental biology*. **207**: 1643- 1654.
- Connaughton, M. A., Fine, M. L., Taylor, M. H. 2000 Use of sound for localization of spawning weakfish in Delaware Bay (USA) and effects of fish size, temperature and season on sound parameters. *Bioacoustics*. **12**: 294-296.
- Cook, S. L., Forrest, T. G. 2005 Sounds produced by nesting leatherback sea turtles (*Dermochelys coriacea*). *Herpetological Review*. **36**(4): 387-390.
- Cosens, S. E., Dueck, L. P. 1993 Icebreaker noise in Lancaster sound, NWT; Canada: implications for marine mammal behavior. *Marine mammal science*. **9**(3): 285-300.
- Coste, E., Gerez, D., Groenaas, H., Hopperstad, J.-F., Larsen, O. P., Laws, R., Norton, J., Padula, M., Wolfstirn, M. 2014 *Attenuated High-Frequency Emission from a New Design of Air-Gun*. Society for Exploration Geophysics 2014 Annual Meeting, Denver, CO, October 26-31, 2014. 132-137.
- Crawford, J. D., Cook, A. P., Heberlein, A. S. 1997 Bioacoustic behavior of African fishes (*Mormyridae*): potential cues for species and individual recognition in *Pollimyrus*. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **102**(2): 1200-1212.
- Crawford, J. D., Huang, X. 1999 Communication signals and sound production mechanisms of Mormyrid electric fish. *The Journal of Experimental Biology*. **202**: 1417-1426.
- Deane, G. B. 1999 Air entrainment processes and bubble size distributions in the surf zone. *Journal of Physical oceanography*. **29**: 1393-1403.
- Deecke, V. B., Ford, J. K., Spong, P. 2000 Dialect change in resident killer whales: Implications for vocal learning and cultural transmission. *Anim. Behav.* **60**: 629-638.
- Demski, L. S., Gerald, J. W., Popper, A. N. 1973 Central and Peripheral Mechanisms of Teleost Sound Production. *American Zoologist*. **13**(4): 1141-1167.
- Derocher, A., Van Parijs, S., Wiig, O. 2010 Nursing vocalization of a polar bear cub. *Short communication Ursus*. **21**(2): 189-191.
- Devin, C. 1959 Survey of thermal, radiation, and viscous damping of pulsating air bubbles in water. *J Acoust Soc Am*. **31**: 1654-1667.
- Diachok, O. I., Winokur, R. S., 1974 Spatial variability of underwater ambient noise at the Arctic ice-water boundary. **55**(4): 750-753.
- Dragoset, B. 2000 Introduction to air guns and air-gun arrays. *The Leading Edge*. **19**: 892-897.

- Dragoset, W. 1984 A comprehensive method for evaluating the design of air guns and air gun arrays. *Geophys Lead Edge Explor.* **3**: 52–61.
- Dubrovsky, N. A., Kosterin, S. V. 1993 Noise in the ocean caused by lightning strokes. In: Kerman B.R. (eds) *Natural Physical Sources of Underwater Sound*. Springer. 697–709.
- Dudley, S. F. J., Cliff, G. 2010 Influence of the annual sardine run on catches of large sharks in the protective gillnets off KwaZulu-Natal, South Africa, and the occurrence of sardine in shark diet. *African Journal of Marine Science.* **32**(2): 383–397.
- Elowson, A. M. 1989 Mother/cub vocal communication in the captive spectacled bear *Tremarctos ornatus*. Proceedings of the first international symposium on the spectacled bear. M. Rosenthal, ed. Lincoln Park Zoo, Chicago. 131–155.
- Erbe, C. 2002 Underwater noise of whale-watching boats and potential effects on killer whales (*Orcinus orca*), based on an acoustic impact model. *Marine Mammal Science.* **18**(2): 394–418.
- Erbe, C. 2011 Noise and the Effects on Marine Mammals. Underwater acoustics. A pocket handbook 3rd Edition. JASCO Applied Sciences. 64 pp.
- Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., Dooling, R. 2016 Communication masking in marine mammals: A review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin.* **103** (1-2): 15–38.
- Etter, P. C., 2003 Underwater Acoustic Modeling and Simulation, 3rd ed. Spon, New York. 424 pp.
- Evans, R. R. 1973 The Swimbladder and Associated Structures in Western Atlantic Sea Robins (Triglidae) *Copeia.* **2**: 315–321.
- Evans, C. E., Votier, S. C., Dall, S. R. X. 2015 Information use in colonial living. *Biol. Rev.* **91**: 658–672.
- Everest, F. A., Young, R. W., Johnson, M. W. 1948 Acoustical characteristics of noise produced by snapping shrimp. *J Acoust Soc Am.* **20**:137–142.
- Ferrara, C. R., R. C. Vogt, and R. S. Sousa-Lima. 2012 Turtle vocalizations as the first evidence of post-hatching parental care in chelonians. *Quarterly Journal of Experimental Psychology B: Comparative and Physiological Psychology.* 1–9.
- Ferrara, C. R., Vogt, R. C., Harfush, M. R., Sousa-Lima, R. S., Albavera, E., Atavera, A. 2014 First Evidence of Leatherback Turtle (*Dermochelys coriacea*) Embryos and Hatchlings Emitting Sounds. **13**(1): 110–114.
- Ferreira, C.A., Ferreira, T. P. 1996 Population dynamics of white sharks in South Africa. In: Klimley A.P. & Ainley D.G. (ed.) *Great White Shark: The Biology of Carcharodon carcharias*, Academic Press, San Diego. 381–391.
- Fine, M. L. 1978 Seasonal and geographical variation of the mating call of the oyster toadfish. *Opsanus tau* L. *Oecologia.* **36**: 45–57.
- Fine, M. L. Burns, N. M., Harris, T. M. 1990 Ontogeny and sexual dimorphism of sonic muscles in the oyster toadfish. *Can. J. Zool.* **68**: 1374–1381.
- Fine, M. L., Malloy, K. L., King, C. B., Mitchell, S. L., & Cameron, T. M. 2001 Movement and sound generation by toadfish swimbladder. *Journal of Comparative Physiology A.* **187**: 371–379.
- Fish, M. P. 1954 The character and significance of sound production among fishes of the Western North Atlantic. *Atlantic Bull. Bingham. Oceanogr. Coll.* **14**: 1–109.
- Fish, J. F. 1972 The effect of sound playback on the toadfish. In: Behavior of marine animals: current perspectives in research. Vol2- vertebrates. (H.E.Winn and B.L. Olla, eds). Plenum Press; New York. 386–432.
- Fisher, F. H., Simmons, V. P. 1977 Sound absorption in sea water. *J Acoust Soc Am.* **62**: 558–564.
- Fitch, T. 2006 Production of Vocalizations in Mammals, University of St Andrews, St Andrews, UK, Elsevier Ltd.
- Francois, R. E., Garrison, G. R. 1982 Sound-absorption based on ocean measurements. 1. Pure water and magnesium-sulfate contributions. *J Acoust Soc Am.* **72**: 896–907.
- Frantzis, A. 1998 Does acoustic testing strand whales? *Nature.* **392**: 29.
- Franz, G. J. 1959 Splashes as sources of sound in liquids. *J Acoust Soc Am.* **31**: 1080–1096.
- Fréon, P., Coetzee, J. C., van der Lingen, C. D., Connell, A. D., O'Donoghue, S. H., Roberts, M. J., Demarcq, H., Attwood, C. G., Lamberth, S. J., Hutchings, L. 2010 A review and tests of hypotheses about causes of the KwaZulu-Natal sardine run. *African Journal of Marine Science.* **32**(2): 449–479.
- Gaunt, A. S., Gaunt, S. L. L., Casey, R. M. 1982 Syringeal mechanics reassessed: evidence from *Streptopelia*. *Auk.* **99**: 474–494.
- Giles, J., Davis, J. A., McCauley, R. D., Kuchling, G., 2009 Voice of the turtle: The underwater acoustic repertoire of the long-necked freshwater turtle, *Chelodina oblonga*. *J. Acoust. Soc. Am.* **126**: 434–443.
- Gisiner, R. C. 2016 Sound and Marine Seismic Surveys. *Acoustics Today.* **12**(4): 10–18.

- Goldman, K. J. 1997 Regulation of body temperature in the white shark, *Carcharodon carcharias*. *J Comp Physiol B*. **167**: 423-429.
- Goller, F., Larsen, O. N. 1997 A new mechanism of sound generation in songbirds. *PNAS*. **94**(26):14787-14791.
- Gray, G-A., Winn, H. E. 1961 Reproductive ecology and sound production of the toadfish, *Opsanus Tau*. *Ecology*. **42**: 274-282.
- Hambling, D. 2016 This colossal oil-hunter is the largest mobile man- made object in the world. *Popular Mechanics*, January 22, 2016. <<http://www.popularmechanics.com/technology/infrastructure/a19081/polarcus-largest-manmade-mobile-object/>>
- Hammerschlag, N., Martin, R. A., Fallows, C. 2006 Effects of environmental conditions on predator-prey interactions between white sharks (*Carcharodon carcharias*) and Cape fur seals (*Arctocephalus pusillus pusillus*) at Seal Island, South Africa. *Environ Biol Fish*. **76**: 341-350.
- Hastings, M. C., Popper, A. 2005 Effects of sound on fish. California Department of transportation. Final Report # CA05-0537. Project P476 Noise Thresholds for Endangered Fish. 85 pp.
- Hawkins, A. D., Rasmussen, K. J. 1978 The calls of gadoid fish. *Journal of the Marine Biological Association of the United Kingdom*. **58**(4): 891-911.
- Hauser, M. D. 1997 *The Evolution of Communication*. MIT Press, Cambridge. A Bradford Book; 1st Paperback Edition edition (May 27, 1997). 776 pp.
- Helfman, G. S., Collette, B. B., Defacey 1997 *The diversity of fishes. Biology, Evolution, and Ecology*. Wiley-Blackwell. Wiley & Sons, Ltd., Publication, London, England. 528pp.
- Herzing, D. L. 2004 Social and nonsocial uses of echolocation in free-ranging *Stenella frontalis* and *Tursiops truncatus*. In: *Echolocation in Bats and Dolphins* (J. A. Thomas, C. Moss, and M. Vater, eds), University of Chicago Press, Chicago. 404-409.
- Hester, K. C., Peltzer, E. T., Kirkwood, W. J., Brewer, P. G. 2008 Unanticipated consequences of ocean acidification: a noisier ocean at lower pH. *Geophys Res Lett*. **35**: 1-5.
- Hildebrand, J. A. 2009 Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar Ecol Prog Ser*. **395**: 5-20.
- Hollén, L. I., Bell, M. B. V. & Radford, A. N. 2008 Cooperative sentinel calling? Foragers gain increased biomass intake. *Curr. Biol*. **18**: 576-579.
- Howes, G. J. 1988 The cranial muscles and ligaments of macrourid fishes (Teleostei: Gadiformes); functional, ecological and phylogenetic inferences. *Bulletin of the British Museum of Natural History (Zoology)* 54, 1-62.
- Janik, V. M. Sayigh, L. S. 2013 Communication in bottlenose dolphins: 50 years of signature whistle research. *Journal of Comparative Physiology A*. **199**(6): 479-489.
- Jensen, Ø. 2007 The IMO guidelines for ships operating in arctic ice-covered waters: From voluntary to mandatory tool for navigation safety and environmental protection? FNI-rapport 2/2007 (The Fridtjof Nansen Institute, Lysaker, Norway).
- Jouventin, P. 1982 Visual and vocal signals in penguins, their evolution and adaptive characters. *Fortschritte der Verhaltensforschung*. **24**: 148.
- Kasumyan, A. O. 2003 The Lateral Line in Fish: Structure, Function, and Role in Behavior. *Journal of Ichthyology*. **43**(2): 175-213.
- Kenyon, K. W. 1981 Sea otter, *Enhydra lutris*. In: *Handbook of marine mammals* (S.H. Ridgway and R. J. Harrison (eds). Academic press, London. **1**: 209-223.
- Knudsen, V. O., Alford, R. S., Emling, J. W. 1948 Underwater ambient noise. *J Mar Res*. **7**: 410-442.
- Kuperman, W. A. 1988 Propagation Effects Associated with Ambient Noise. In: Kerman B.R. (eds) *Sea Surface Sound*. NATO ASI Series (Series C: Mathematical and Physical Sciences), vol 238. Springer, Dordrecht.
- Ibara, R. M., Penny, L. T., Ebeling, A. W., van Dykhuizen, G. Cailliet, G. 1983 The mating call of the plainfin midshipman fish, *Porichthys notatus*. *Predators and prey in fishes*. 205-212.
- Ladich, F. 1990 Vocalization during agonistic behavior in *Cottus gobio* L. (Cottidae): an acoustic threat display. *Ethology*. **84**: 193-201.
- Ladich, F., Bass, A. H. 2003 Underwater Sound Generation and Acoustic Reception in Fishes with Some Notes on Frogs. *Sensory Processing in Aquatic Environments*. 173-193.
- Ladich, F., Popper, A. N. 2004 Parallel evolution in fish hearing organs. Parallel evolution in fish hearing organs. *Evolution of the vertebrate auditory system*. In: Springer Handbook of Auditory Research. 95-127.
- Ladich, F., C. Bischof, G. Schleizer, Fuchs., A. 1992 Intra- and interspecific differences in agonistic vocalization in croaking gouramis (Genus: *Trichopsis*, Anabantoidei, Teleostei). *Bioacoustics*. **4**: 131-141.
- Ladich, F., Yan, H. Y. 1998 Correlation between auditory sensitivity and vocalization in anabantoid fishes. *J. Comp. Physiol. A*. **182**: 737-746.

- Ladich, F., Fine, M. L. 2006 Sound generating mechanisms in fishes: a unique diversity in vertebrates. *Communication in fishes*. 1-41.
- Landrø, M., Amundsen, L. 2010 Marine seismic sources. Part I. *Geo ExPro*. **7**(1): 32–34.
- Latour, P. 1981 Social behavior of polar bears (*Ursus maritimus* Phipps) concentrated on land during the ice-free season of Hudson Bay. Unpubl. M.A. thesis, Department of Zoology, University of Alberta, Edmonton, Alberta.
- Lauder, G.V. 1985 Aquatic feeding in lower vertebrates. In: M. Hildebrand, D. M. Bramble, K. F. Liem & D. B. Wake (ed.) *Functional Vertebrate Morphology*, Harvard University Press, Cambridge. 210-229.
- Laws, R. M., Hedgeland, D. 2008 The marine seismic air gun. *Bioacoustics*.**17**: 1-3.
- Lengagne, T., Jouventin, P., Lauga, J. 2000 Perceptual salience of individually distinctive features in the calls of adult king penguins. *J. Acoust. Soc. Am.* **107**(1).
- Licitra, G., Borsani, F., Marsico, G., Pavan, G. Riccobene, G. 2015 LA BIOACUSTICA MARINA PER LO STUDIO DEI CETACEI NELLA IMPLEMENTAZIONE DELLA MARINE STRATEGY IN ITALIA. *Rivista Italiana di Acustica*. **39**(3): 1-14.
- Lobel, P. S. 2001 Fish bioacoustics and behavior: passive acoustic detection and the application of a closed-circuit rebreather for field study. *Marine Technology Society Journal*. **35**(2): 19-28.
- Luh, H.K., Mok., H. K. 1986 Sound production in the domino damselfish *Dascyllus trimaculatus* (Pomacentridae), under laboratory conditions. *Jap. J. Ichthyol.* **33**: 70–74.
- Ma, B. B., Nystuen, J. A., Lien, R. C. 2005 Prediction of underwater sound levels from rain and wind. *J Acoust Soc Am.* **117**: 3555 – 3565.
- Marler, P. 2004 Bird calls, their potential for behavioral neurobiology. *Ann. N.Y. Acad. Sci.* **1016**: 31–44.
- Marshall, A. D., Bennett, M. B. 2010 The frequency and effect of shark-inflicted bite injuries to the reef manta ray *Manta alfredi*. *African Journal of Marine Science*-8. **32**(3): 1.
- Martin, R. A., Hammerschlag, N., Collier, R. S., Fallows, C. 2005 Predatory behaviour of white sharks (*Carcharodon carcharias*) at Seal Island, South Africa. *J. Mar. Biol. Ass. U.K.* **85**: 1121-1135.
- Matsumoto, H., Haxel, J. H., Dziak, R. P. 2011 Mapping the sound field of an erupting submarine volcano using an acoustic glider. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **129**.
- Mazzariol, S., Marsili, L., Di Guardo, G. 2016 Discussion: Cetacean mass strandings and multidisciplinary work. *Chemosphere*. **148**: 32-33.
- McCauley, R. D., Fewtrell, J., Duncan, A. J., Jenner, C., Jenner, M-N., Pensore, J. D., Prince, R. I. T., Adhitya, A., Murdoch, J., McCabe, K. 2000 Marine seismic surveys: Analysis of airgun signals; and effects of air gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Prepared for Australian Petroleum Production Exploration Association. Project CMST 163, Report R99-15. 198 pp.
- McShane, L. J., Estes, J. A., Riedman, M. L., Staedler, M. M. 1995 Repertoire, structure, and individual variation of vocalizations in the sea otter. *Journal of Mammalogy*. **75** (2): 414-427.
- Mellen, R. H., 1952 The thermal-noise limit in the detection of underwater acoustic signals. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **24**(478).
- Miksis-Olds, J., Bradley, D. L. 2013 Decadal trends in Indian Ocean ambient sound. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **134**.
- Miksis-Olds, J., Donaghay, P. L., Miller, J. H., Tyack, P. L., Nystuen, J. A. 2007 Noise level correlates with manatee use of foraging habitats. *J. Acoust. Soc. Amer.* **121**: 3011–3020.
- Milne, A. R. 1967 Thermal tension cracking in sea ice: a source of underice noise. *Journal of geophysical research*. **77**(12).
- Minnaert, M. 1933 On musical air-bubbles and the sounds of running water. *The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of science. Series 7*. **16** (104).
- Mooney, T. A., Hanlon, R.T., Christensen-Dalsgaard, J., Madsen, P. T., Ketten, D. R., Nachtigall, P. E. 2012 Sound detection by the longfin squid (*Loligo pealeii*) studied with auditory evoked potentials: sensitivity to low-frequency particle motion and not pressure. *Journal of Experimental Biology*. **213**: 3748– 3759.
- Morisaka, T., Connor, R. C. 2007 Predation by killer whales (*Orcinus orca*) and the evolution of whistle loss and narrow-band high frequency clicks in odontocetes. *Journal of evolutionary biology*. **20**: 1439-1458.
- Morton, E. S. 1977 On the occurrence and significance of motivation structural rules in some bird and mammal sounds. *The American Naturalist*. **111**(981).
- Morton, A. B. Symonds, H. K. 2002 Displacement of *Orcinus orca* (L.) by high amplitude sound in British Columbia, Canada. ICES. *Journal of Marine Science*. **59**: 71-80.
- Moulton, J.M. 1958 The acoustical behavior of some fishes in the Bimini area. *Biol. Bull.* **114**: 357–374.

- Moulton, J. M. 1963 Acoustic orientation of marine fishes and invertebrates. *Orientierung der Tiere/Animal Orientation*. In *Ergebnisse der Biologie/Advances in Biology*. **26**: 27-39.
- Munk, W. H., O'Reilly, W. C., Reid, J. L. 1988 Australia- Bermuda sound transmission experiment (1960) revisited. *Journal of Physical Oceanography*. **18**.
- Myrberg, A. A., Fuiman, L. A. 2002 The sensory world of coral reef fishes. In: *Coral Reef Fishes: Dynamics and Diversity in a Complex Ecosystem*, Academic Press, San Diego, California. USA. 123-148.
- Myrberg, Jr, A. A., Gordon, C. R., Klimley, A. P. 1976 Attraction of free ranging sharks by low frequency sound, with comments on its biological significance. *Sound reception in fish*. Elsevier, Amsterdam.
- Myrberg, Jr. A. A., Kramer, E., Heinecke, P. 1965 Sound production by cichlid fishes. *Science*. **149**: 555–558.
- Myrberg, A. A. Jr., Samuel, J.H.A., Walewski, S., Banbury, J.C. 1972 Effectiveness of acoustic signals in attracting epipelagic sharks to an underwater sound source. *Bull. Mar. Sci.* **22**: 926-949.
- Myrberg, A. A., Ha, S. J., Shablott, H. 1993 The sounds of bicolor damselfish (*Pomacentrus partitus*): Predictors of body size and a spectral basis for individual recognition and assessment. *J. Acoust. Soc. Amer.* **94**: 3067–3070.
- Myrick, A. C., Cassano, E. R., Oliver, C. W. 1990 Potential for physical injury, other than hearing damage, to dolphins from seal bombs used in the yellowfin tuna purse-seine fishery: results from open-water tests. In: *Administrative report LJ-90-07* (Southwest Fisheries Center, National Marine Fisheries Service, NOAA, La Jolla, California 92038).
- National Research Council 2003 *Ocean noise and marine mammals*. Washington, DC: National Academies Press. 220 pp.
- Nedwell, J., Howell, D. 2004 A review of offshore windfarm related underwater noise sources. Cowrie Rep. Report No. 554 R 0308. 57 pp.
- Nedwell, J. R., Parvin, S. J., Edwards, B., Workman, R., Brooker, A. G., Kynoch, J. E. 2007 Measurement and interpretation of underwater noise during construction and operation of offshore windfarms in UK waters. Report commissioned by COWRIE Ltd.
- Neukirk, S.L., Stafford, K., M., Mellinger, D. K., Dziak, R. P., Fox, C. G. 2004 Low-frequency whale and seismic airgun sounds recorded in the mid-Atlantic Ocean. *J. Acoust. Soc. Am.* **115**(4).
- Nowacek, D. P., Casper, B. M., Wells, R. S., Nowacek, S. M., Mann, D. A. 2003 Intraspecific and geographic variation of West Indian manatee (*Trichechus manatus* spp.) vocalizations. *J. Acoust. Soc. Am.* **114**: 66–69.
- Nowicki, S., Capranica, R. R. 1986 Bilateral interaction in vocal production of an oscine bird sound. *Science*. **231**: 1297-1299.
- Nystuen, J. A., Farmer, D. M. 1987 The influence of wind on the underwater sound generated by light rain. *J Acoust Soc Am.* **82**: 270-274.
- O'Donoghue, S. H., Whittington, P. A., Dyer, B. M., Peddemors, V. M. 2010 Abundance and distribution of avian and marine mammal predators of sardine observed during the 2005 KwaZulu-Natal sardine run survey. *African Journal of Marine Science*. **32**(2): 361-374.
- O'Neel, S., Marshall, H. P., McNamara, D. E., Pfeffer, W. T. 2007 Seismic detection and analysis of icequakes at Columbia Glacier, Alaska. *Journal of geophysical research*. **112**.
- Onuki, A., Somiya, H. 2007 Innervation of Sonic Muscles in Teleosts: Occipital vs. Spinal Nerves. *Brain Behav Evol.* **69**:132–141.
- Ovsyanikov, N. 1996 *Polar Bear: Living with the White Bear*. Voyageur, Stillwater, Minnesota, USA. 144 pp.
- Parkes, G. E., Hatton, L. 1986 *The Marine Seismic Source*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht. 114 pp.
- Parmentier, E., Vandewalle, Lagardère, J. P. 2003 Sound-producing mechanisms and recordings in Carapini species (Teleostei, Pisces). *J. Comp. Physiol. A.* **189**: 283–292.
- Parvin, S. J., Nedwell, J. R., Workman, R. 2006 Underwater noise impact modelling in support of the London Array, Greater Gabbard and Thanet offshore wind farm developments. Subacoustech Report No. 710R0515.
- Pavan G., Hayward, T., Borsani, J. F., Priano, M., Manghi, M., Fossati, C., Gordon, J. 2000 Time Pattern of Sperm Whale Codos Recorded in the Mediterranean Sea 1985–1996. *J. Acoustic.Soc.Am.* **107**(6): 3487-3495.
- Pavan, G. 2014 The noise issue: case studies in Italian seas. In: *Proceedings of the ECS/ASCOBANS/ACCOBAMS Joint workshop on Introducing noise into the marine environment – what are the requirements for an impact assessment for marine mammals?* Evans P.G.H. (ed), ECS Special Publication Series. **58**: 82-90.
- Peters, G., Wozencraft, W. C. 1989 Acoustic communication by fissioned carnivores. In: Gittleman JL (ed) *Carnivore behavior, ecology, and evolution*. Chapman and Hall, London. 14-56.
- Peters, G., Owen, M., Rogers, L. 2007 Humming in bears: a peculiar sustained mammalian vocalization. *Acta Theriologica*. **52**(4): 379-389.

- Pettit, E. C. 2012 Passive underwater acoustic evolution of a calving event. *Ann. Glaciol.* **53**: 113–122.
- Podestà, M., D'Amico, A., Pavan, G., Drougas, A., Komnenou, A., Fortunato, N. 2006 A review of Cuvier's beaked whale strandings in the Mediterranean Sea. *J. Cetacean Res. Manage.* **7**(3): 251–261.
- Popper, A. N., Fay, R. R. 1993 Sound detection and processing by fish: critical review and major research questions. *Brain Behav. Evol.* **41**: 14–38.
- Pranzini, E. 2004 La forma delle coste. Geomorfologia costiera, impatto antropico e difesa dei litorali. Zanichelli. 245 pp.
- Prevost, J. 1961 Écologie du manchot empereur *Aptenodytes forsteri* Grey. *Expéditions Polaires Françaises*, Hermann, Paris. 208 pp.
- Pyle, P., Anderson, S. D., Klimley, A. P., Henderson, R. P. 1996 Environmental effects and white shark occurrence and behaviour at the South Farallon Islands, California. *The Biology of the white shark*. Academic Press. 281–291.
- Radford, A. N. & Ridley, A. R. 2006 Recruitment calling: A novel form of extended parental care in an altricial species. *Curr. Biol.* **16**: 1–5.
- Rassenfoss, S. 2016 Offshore seismic feeling pressures to change. *Journal of Petroleum Technology.* **68**(01).
- Reyes Reyes, M. V., Baumann-Pickering, S., Simonis, A., Melcón, Trickey, J., Hildebrand, J., Iñiguez, M. 2017 High-Frequency Modulated Signals Recorded Off the Antarctic Peninsula Area: Are Killer Whales Emitting Them? *Acoust Aust.* **45**(2): 253–260.
- Reynolds, J. E., III, Odell, D. K. 1991 Manatees and Dugongs. Facts on File, New York.
- Rendell, L. E., Whitehead, H. 2003 Vocal clans in sperm whales (*Physeter macrocephalus*). *Proc. R. Soc. Lond. B Biol. Sci.* **270**: 225–231.
- Richardson, W. J., Greene, C. R., Malme, C. I., Thomson, D. H. 1995 Marine Mammals and Noise. Academic Press, New York.
- Richardson, W. J., Greene, C. R., Malme, C. I., Thomson, D. H., 2013 Marine mammals and noise. Academic press.
- Riedman, M. L., Estes, J. A. 1990 The sea otter (*Enhydra lutris*): Behavior, ecology, and natural history. *US Fish Wildlife Serv., Biol. Rep.* **90**(14).
- Rome, L. C., Lindstedt, S. L. 1998 The quest for speed: muscles built for high-frequency contractions. *Physiology.* **13**(6): 261–268.
- Ross, D. 1976 *Mechanics of underwater noise*. Elmsford, NY: Pergamon Press.
- Roth, E. H., Schmidt, V. E., Hildebrand, J. A., Wiggins, S. M. 2013 Underwater radiated noise levels of a research icebreaker in the central Arctic Ocean. *The Journal of the Acoustical Society of America.* **133**(4): 1971–1980.
- Schevill, W. E., Watkins, W. A. 1965 Underwater calls of *Trichechus* (manatee). *Nature.* **205**: 373–374.
- Schneider, J. 1974 Description and probable behavior significance of grey seal (*Halichoerus grypus*) vocalizations. M.Sc. thesis, University of Rhode Island.
- Schusterman, R.J. 1981 Behavioural capabilities of seals and sea lions: a review of their hearing, visual, learning and diving skills. *The psychological record.* **31**(2): 125–143.
- Schusterman, R. J., Balliet, R. F., Nixon, J. 1972 Underwater audiogram of the California sea lion by the conditioned vocalization technique. *Journal of the Experimental analysis of behavior.* **17**: 339–350.
- Schusterman, R. J., Kastak, D., Levenson, D. H., Reichmuth, C. J., Southall, B. L. 2000 Why pinnipeds don't echolocate. *Acoust. Soc. Am.* **107**.
- Schusterman, R. J., Southall, B. L., Kastak, D., Kastak, C. R. 2001 Pinniped Vocal Communication: Form and Function. In: Proceedings of the 17 The International Congress on Acoustics, Rome, Italy. 1–2.
- Screiner, A. E., Fox, C. G. Dziak, R. P. 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.
- Short, J. R. 2005 High-frequency ambient noise and its impact on underwater tracking ranges. *IEEE J. Oceanic. Eng.* **30**: 267 – 274.
- Simpson, S. D., Meekan, M. G., McCauley, R. D., Jeffs, A. 2004 Attraction of settlement-stage coral reef fishes to reef noise. *Mar Ecol Prog Se.* **276**: 263–268.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W., T., Finneran, J. J., Roger, G. L. 2007 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals.* **33**(4): 411–521.
- Spencer, R-J, Janzen, F. J. 2011 Hatching behaviour in turtles. *Integrative and Comparative Biology.* **51**(1): 100–110.
- Sprague, M. W. 2000 The single sonic muscle twitch model for the sound-production mechanism in the weakfish, *Cynoscion regalis*. *The Journal of the Acoustical Society of America.* **108**(5).

- Staaterman, E. R., Clark, C. W., Gallagher, A. J., deVries, M. S., Claverie, T., Patek, S. N. 2011 Rumbling in the benthos: acoustic ecology of the California mantis shrimp *Hemisquilla californiensis*. *Aquatic Biology*. **13**: 97-105.
- Stirling, I., Thomas, J. A. 2003 Relationships between underwater vocalizations and mating systems in phocid seals. *Aquatic Mammals* 2003. **29**(2): 227–246.
- Stocker, M. 2002 Fish, mollusks and other sea animals' use of sound, and the impact of anthropogenic noise in the marine acoustic environment. In: Sea animals and sound. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1-26.
- Suthers, R. A. 1990 Contributions to birdsong from the left and right sides of the intact syrinx. *Nature* 347: 473-477.
- Tavolga, W. N. 1962 Mechanisms of sound production in the arid catfishes *Galeichthys* and *Bagre*. *Bulletin of the AMNH*. **124**(1): 1-30.
- Tavolga, W. N. 1964 Review of marine bioacoustics. Technical Report: NAVTRADEVCEEN 1212-1. Department of Animal Behavior, American Museum of Natural History.
- Tavolga, W. N. 1958 Underwater sounds produced by two species of toadfish, *Opsanus tau* and *Opsanus beta*. *Bull. Mar. Sci. Gulf. Carib.* **8**: 278–285.
- Tegowski, J., Deane, G. B., Lisimenka, A. 2011 Detecting and analyzing underwater ambient noise of glaciers on Svalbard as indicator of dynamic processes in the arctic, in 4th International Conference and Exhibition on "Underwater Acoustic Measurements: Technologies & Results", edited by J. Popodokis and L. Djorno. 1149–1154.
- Terhune, J. M., Healey, S. R., Burton, H. R. 2001 Easily measured call attributes can detect vocal differences between Weddell seals from two areas. *Bioacoustics*. **11**: 211–222.
- Thomas, J. A., Moss, C., F., Vater, M. 2004 Echolocation in Bats and Dolphins. University of Chicago Press, Chicago.
- Thompson, P., O., Friedl, W. A. 1982 A long-term study of low-frequency sounds from several species of whales off Oahu, Hawaii. *Cetology*. **45**:1-19.
- Thorne, P. D. 1986 Laboratory and marine measurements on the acoustic detection of sediment transport. *The Journal of Acoustical Society of America*. **80**(3): 2671- 2689.
- Thorson, R. F., Fine, M. L. 2002 Crepuscular changes in emission rate and parameters of the boat whistle advertisement call of the gulf toadfish, *Opsanus beta*. *Environ. Biol. Fishes*. **63**: 321–331.
- Titze, I. R. 1994 Principles of voice production. Englewood Cliffs, NJ: Prentice Hall.
- Tricas, T. C., McCosker, J. E. 1984 Predatory behaviour of the white shark (*Carcharodon carcharias*) with notes on its biology. *Proc. Calif. Acad. Sci.* **43**: 221-238.
- Tyack, P. L. 1986 Whistle repertoires of two bottlenosed dolphins, *Tursiops truncatus*: mimicry of signature whistles? *Behav. Ecol. Sociobiol.* **18**: 251–257.
- Tyack, P. L. 1998 Acoustic Communication Under the Sea. *Animal Acoustic Communication*.163-220.
- University of California Division of War Research 1946 Underwater noise caused by snapping shrimp. Tech. Rep. U337. Scripps Institute of Oceanography Library, University of California, San Diego.
- Urick, R. J. 1983 Principles of underwater sound. 3rd ed. Los Altos, CA: Peninsula Publishing.
- Urick, R. J. 1984 Ambient noise in the sea. Peninsula Publishing.
- Valinsky, W., Rigley, L. 1981 Function of sound production by the shunk loach *Botia horae* (Pisces, Cobitidae). *Zeitschrift für Tierpsychologie*. **55**: 161–172.
- Veirs, S., Veirs, V. 2006 Vessel noise measurements underwater in the Haro Strait, WA. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **120**(5).
- Vella, G., Rushforth, I., Mason, E., Hough, A., England, R., Styles, P., Holt, T., Thorne, P. 2001 Assessment of the effects of noise and vibration from offshore wind farms on marine wildlife. ETSU W/13/00566/REP. DTI/Pub URN 01/1341. 107 pp.
- Verboom, W. C., Kastelein, R. A. 1995 Acoustic signals by harbor porpoises (*Phocoena phocoena*). In: Harbour porpoises- laboratory studies to reduce bycatch. Editors: P.E. Nachtigall, J. Lien, W.W.L. Au, A.J. Read. De Spil Publishers, Woerden, The Netherlands. 39 pp.
- Vergne, A. L., Pritz, M. B., Mathevon, N. 2009 Acoustic communication in crocodylians: form behavior to brain. *Biological Reviews*. **84**: 391-411.
- Verluis, M., Schmitz, B., von der Heydt, A., Lohse, D. 2000 How snapping shrimp snap: through cavitating bubbles. *Science*. **289**: 2114-2117.
- Wales, S. C., Heitmeyer, R. M. 2001 An ensemble source spectra model for merchant ship-radiated noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **111**(3).
- Watkins, W. A., Schevill, W. E. 1977 Sperm whale codas. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **62**(6): 1485-1490.

- Watkins, W. A., Wartzok, D. 1985 Sensory biophysics of marine mammals. *Marine mammal science*. **1**(3): 219-260.
- Wartzok, D., Ketten, D. R. 1999 Marine mammal sensory systems. In: *Biology of marine mammals*. J. Reynolds and S. Rommel (eds.), Smithsonian Institution Press. 117-175.
- Wartzok, D., Schusterman, R. J., Gailey-Phillips, J., 1984 Seal echolocation? *Nature*. **308**: 753.
- Webb, S. C. 1998 Broadband seismology and noise under the ocean. *Rev. Geophys.* **36**: 105-142.
- Wemmer, C., Ebers, M., Scow, K. 1976 An analysis of the chuffing vocalization in the Polar bear (*Ursus maritimus*). *Journal of Zoology*. **180**(3): 425-439.
- Wenz, G. M. 1962 Acoustic ambient noise in the ocean: spectra and sources. *J Acoust Soc Am*. **34**: 1936-1956.
- Wenz, G. M. 1972 Review of Underwater Acoustics Research: Noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **51**: 1010.
- Wiggins, S. M., Krumpel, A., Dorman, L.M., Hildebrand, J. A., Baumann-Pickering, S. 2019 Seal Bomb Sound Source Characterization. MPL Technical Memorandum 633. 23 pp.
- Wilson, O. B., Wolf, S. N., Ingenito, F. 1985 Measurements of acoustic ambient noise in shallow water due to breaking surf. *The Journal of the acoustical society of America*. 33 pp.
- Winn, H.E. 1964 The biological significance of fish sounds. In: *Marine Bio-Acoustics*. W.N. Tavolga (ed.). Pergamon Press, New York, NY. 213-231.
- WODA Technical guidance on underwater sound in relation to dredging. 2013 World Organization of Dredging Associations, Delft, The Netherlands. 1-8.
- Young, I. S., Rome, L. C. 2001 Mutually exclusive muscle designs: The power output of the locomotory and sonic muscles of the oyster toadfish (*Opsanus tau*). *Proceedings of the Royal Society of London Series B: Biological Sciences*. **268**(1480): 1965-1970.
- Zelick, R., Mann, D. A., Popper, A. N. 1999 Acoustic communication in fishes and frogs. *Comparative hearing: fish and amphibians*. 363-411.

BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 3

- Aguilar de Soto, N., Delorme, N., Atkins, J., Howard, S., Williams, J., Johnson, M. 2013 Anthropogenic noise causes body malformations and delays development in marine larvae. *Sci. Rep.* **3**(2831): 1-5.
- Aguilar de Soto, N., Johnson, M., Madsen, P. T., Tyack, P. L., A. Bocconcelli, A., Borsani, J. F. 2006 Does intense ship noise disrupt foraging in deep-diving Cuvier's beaked whales (*Ziphius cavirostris*)? *Mar. Mammal Sci.* **22**: 690-699.
- André, M., Nachtigall, P. E. 2007 Electrophysiological Measurements of Hearing in Marine Mammals. *Aquatic Mammals*. **33**(1): 1-5.
- André, M., Delory, E., Degollda, E., Alonso, J.-M., del Rio, J., van der Schaar, M., Castell, J. V., Morell, M. 2007 Identifying Cetacean Hearing Impairment at Stranding Sites. *Aquatic Mammals*. **33**(1): 100-109.
- André, M., Morell, M., Mas, A., Solé, M., Van der Schaar, M., Houégnigan, L., Zaugg, S., Castell, J. V., Baquerizo, C. A., Roch, L. R. 2009 Best practices in management, assessment and control of underwater noise pollution. Report: <http://www.lab.upc.edu/papers/BestPracticesNoiseLAB.pdf>. 105 pp.
- Au, W.W.L. 1993 *The Sonar of Dolphins*, Springer-Verlag, New York, N.Y.
- Bailey, H., Senior, B., Simmons, D., Rusin, J., Picken, G., M. Thompson, P. M. 2010 Assessing underwater noise levels during pile-driving at an offshore windfarm and its potential effects on marine mammals. *Marine Pollution Bulletin*. **60**: 888-897.
- Blackwell, S. B., Lawson, J. W., Williams, M. T. 2004 Tolerance by ringed seals (*Phoca hispida*) to impact pipe-driving and construction sounds at an oil production island. *J. Acousti. Soc. Am.* **115**(5).
- Boehlert, G. W., Gill, A. B. 2010 Environmental and ecological effects of ocean renewable energy development: a current synthesis. *Oceanography*. **23**(2): 68-81.
- Booman, C., Dalen, J., Leivestad, H., Levsen, A. van der Meeren, T., Toklum, K. 1996 Effekter av luftkanonskyting på egg, larver og yngel. *Undersøkelser ved Havforskningsinstituttet og Zoologisk laboratorium, UIB. Havforskningsinstituttet, Bergen. Fisken og Havet*. **3**. 83 pp.
- Bowles, A. E., Smultea, M., Würsig, B., DeMaster, D. P., & Palka, D. 1994 Relative abundance and behavior of marine mammals exposed to transmissions from the Heard Island Feasibility Test. *Journal of the Acoustical Society of America*, **96**: 2469-2484.
- Boyd, I., Brownell, R., Cato, D., Clark, C., Costa, D. P., Evans, P., Gedamke, J., Gentry, R., Gisiner, R., Gordon, J., Jepson, P., Miller, P., Rendell, L., Tasker, M., Tyack, P., Vos, E., Whitehead, H., Wartzok, D., Zimmer, W. 2008 The effects of anthropogenic sound on marine mammals: A draft research strategy. European Science Foundation Marine Board Position Paper. 13-24.

- Bregman, A. S. 1994 Auditory scene analysis: The perceptual organization of sound. Boston, MA: MIT Press.
- Byrne, M., Przeslawski, R. 2013 Multistressor Impacts of Warming and Acidification of the Ocean on Marine Invertebrates' Life Histories. *Integrative and Comparative Biology*. **53**(4): 582–596.
- Campana, S. 2004 Atlas of fish otoliths of the Northwest Atlantic Ocean Canadian special publications of fisheries and aquatic sciences. No 133. NRC Research Press.
- Carroll, A. G., Przeslawski, R., Duncan, A., Gunning, M., Bruce, B. 2017 A critical review of the potential impacts of marine seismic surveys on fish & invertebrates. *Marine Pollution Bulletin*. **114**(5): 9-24.
- Carlson, T. J., Hastings, M. C. & Popper, A. N. 2007 Update on recommendations for revised interim sound exposure criteria for fish during pile driving activities. Memo to Suzanne Theiss, California Department of Transportation and Paul Wagner, Washington Department of Transportation Caltrans, dated December 21, 2007.
- Castellote, M., Clark, C.W., Lammers, M.O. 2012 Acoustic and behavioural changes by fin whales (*Balaenoptera physalus*) in response to shipping and airgun noise. *Biol. Conserv.* **147**: 115- 122.
- Celi, M., Filicetto, F., Parrinello, D., Buscaino, G., Damiano, M. A., Cuttitta, A., D'Angelo, S., Mazzola, S., Vazzana, M. 2013 Physiological and agonistic behavioural response of *Procambarus clarkii* to an acoustic stimulus. *J. Exp. Biol.* **216**: 709-718.
- Chapman, C., Hawkins, A. 1969 The importance of sound in fish behaviour in relation to capture by trawls. FAO Fisheries and Aquaculture Report (FAO). **62**(3): 717-729.
- Christian, J. R., Mathieu, A., Thompson, D. H., White, D., Buchanan, R. A. 2003 Effect of Seismic Energy on Snow Crab (*Chionoecetes opilio*). Environmental Funds Project No. 144. Fisheries and Oceans Canada. Calgary. 106 pp.
- Christensen-Dalsgaard, J., Brandt, C., Willis, K. L., Christensen, C. B., Ketten, D., Edds- Walton, P., Fay, R. R., Madsen, P. T., Carr, C. E. 2012 Specialization for underwater hearing by the tympanic middle ear of the turtle, *Trachemys scripta elegans*. *Proc. R. Soc. B.* **279**: 2816– 2824.
- Corwin, J. T. 1981 Postembryonic production and aging of inner ear hair cells in sharks. *Journal of comparative neurology*. **201**(4): 541-553.
- Croll, D. A., Acevedo-Gutiérrez, A., Tershy, B. R., Urbán-Ramírez, J. 2001 The diving behavior of blue and fin whales: is dive duration shorter than expected based on oxygen stores? *Comparative Biochemistry and Physiology Part A*. **129**: 797-809.
- Dahlheim, M. E. 1987 Bio-acoustics of the grey whale (*Eschrichtius robustus*). PhD Thesis University of British Columbia. Vancouver, B.C. 315pp.
- Dalen, J., Dragsund, E., Naess, A., Sand, O. 2007 Effects of Seismic Surveys on Fish, Fish Catches and Sea Mammals. Report for the Cooperation group – Fishery Industry and Petroleum Industry. DNV Report no.: 2007-0512.
- Edmonds, N. J., Firmin, C. J., Goldsmith, D., Faulkner, R. C., Wood, D. T. 2016 A review of crustacean sensitivity to high amplitude underwater noise: Data needs for effective risk assessment in relation to UK commercial species. *Marine Pollution Bulletin*. **108**(1-2): 5-11.
- Edrén, S.M.C., Teilmann, J., Dietz, R., Carstensen, J., 2004 Effect from the construction of Nysted offshore wind farm on seals in Rødsand seal Sanctuary based on remote video monitoring. National Environmental Research Institute (NERI) technical report to Energy E2 A/S, Ministry of the Environment, Denmark: 26 pp.
- Engås, A., Løkkeborg, S., Ona, E., Soldal, A. V. 1996 Effects of seismic shooting on local abundance and catch rates of cod (*Gadus morhua*) and haddock (*Melanogrammus aeglefinus*). *Can. J. Fish. Aquat. Sci.* **53**: 2238-2249.
- Erbe, C. 2002 Underwater noise of whale-watching boats and potential effects on killer whales (*Orcinus orca*), based on an acoustic impact model. *Marine mammal science*. **18**(2): 394-418.
- Erbe, C., Farmer, D. M. 2000 A software model to estimate zones of impact on marine mammals around anthropogenic noise. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **108**(3): 1327-1331.
- Erbe, C., Reichmuth, C., Cunningham, K., Lucke, K., and Dooling, R. 2016 Communication masking in marine mammals: a review and research strategy. *Marine Pollution Bulletin*. **103**: 15–38.
- Evans, D. L., G. R. England, G. R. 2001 Joint Interim Report, Bahamas Marine Mammal Stranding, Event of 15–16 March 2000. U.S. Department of Commerce and Secretary of the Navy. 59 pp.
- Evans, P. G. H., Fisher, Q. C. P., Jordon, W., Limer, R. Rees, I. 1994 A study of the reactions of harbour porpoises to various boats in the coastal waters of Southeast Shetland. In *European Research on Cetaceans—8. Proceedings of the 8th Annual Conference of the European Cetacean Society, Montpellier, France*. Cambridge: European Cetacean Society. 60–64.
- Evans, C. S., Evans, L., Marler, P. 1993 On the meaning of alarm calls: functional reference in an avian vocal system. *Animal behaviour*. **46**(1): 23-38.
- Fay, R. R. 2005 Sound source localization by fishes. In A. N. Popper & R. R. Fay (Eds.), *Sound source localization*. New York, NY: Springer-Verlag.

- Fay, R. R. 2009. Soundscapes and the sense of hearing of fishes. *Integrative Zoology*, **4**: 26– 32.
- Fay, R. R., Simmons, M. A. 1999 The sense of hearing in fishes and amphibians. In R. R. Fay & A. N. Popper (Eds.), *Comparative hearing: Fish and amphibians*. New York, NY: Springer-Verlag. 269-318.
- Fernández, A., Edwards, J. F., Rodríguez, F., Espinosa de los Monteros, A., Herráez, P., Castro, P., Jaber, J. R., Martín, Arbelo, M. 2005 Gas and Fat Embolic Syndrome. Involving a Mass Stranding of Beaked Whales (Family Ziphiidae) Exposed to Anthropogenic Sonar Signals. *Vet. Pathol.* **42**: 446-457.
- Finley, K.J., Miller, G.W., Davis, R.A. and Greene, C.R. 1990 Reactions of belugas, *Delphinapterus leucas*, and narwhals, *Monodon monoceros*, to ice-breaking ships in the Canadian high arctic. *Can. Bull. Fish. Aquatic Sci.* **224**: 97-117.
- Finneran, J. J. 2016 Auditory Weighting Functions and TTS/PTS Exposure Functions for Marine Mammals Exposed to Underwater Noise TECHNICAL REPORT 3026.
- Finneran, J. J., Schlundt, C. E., Dear, R., Carder, D. A., Ridgway, S. H. 2002 Temporary shift in masked hearing thresholds in odontocetes after exposure to single underwater impulses from a seismic watergun. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **111**(6): 2929-2940.
- Finneran, J. J. 2015 Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for cetaceans and marine carnivores. Technical Report. SSC Pacific, San Diego, CA, USA.
- Fleischer, G. 1980 Low-frequency receiver of the middle ear in mysticetes and odontocetes. *Animal sonar systems*. In: NATO Advanced Study Institutes Series. **28**: 891-893.
- Footo, A. D., Osborne, R. W., Hoelzel, A. R. 2004 Environment: Whale-call response to masking boat noise. *Nature*. **428**: 910.
- Frantzis, A. 1998 Does acoustic testing strand whales? *Nature*. **392**: 29.
- Fristrup, K. M., Hatch, L. T., Clark, C. W. 2003 Variation in humpback whale (*Megaptera novaeangliae*) song length in relation to low-frequency sound broadcasts. *J Acoust Soc Am*. **113**(6): 3411-3424.
- Geraci, J. R. 1990 Physiologic and toxic effects on cetaceans. In: *Sea Mammals and Oil: Confronting the Risks*. Joseph R. Geraci, David J. St. Aubin (eds.), Academic Press. 167-197.
- Gisiner, R. C. 1998 Proceedings-workshop on the effects of anthropogenic noise in the marine environment. *Marine Mammals Science Program., Office of Naval Research* 145 pp.
- Goldbogen, J. A., Southall, B. L., DeRuiter, S. L., Calambokidis, J., Friedlaender, A. S., Hazen, E. L., Falcone, E., A. Schorr, G. S., Douglas, A. Moretti, D. J., Kyburg, C., McKenna, M. F. Tyack, P. L. 2013 Blue whales respond to simulated mid-frequency military sonar. In: *Proceedings of the Royal Society B*. **280**(1765): 1-8.
- Gordon, J., Moscrop, A. 1996 Underwater noise pollution and its significance for whales and dolphins. In: *Conservation of whales and dolphins*. Simmonds, M. P., Hutchinson, J. D. (eds.) 281-319.
- 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. National Research Council, Washington, D. C.
- Hall, J.D., Johnson, C.S., Greenwood, D. D. 1961 Critical bandwidth and the frequency coordinates of the basilar membrane. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **33**(10).
- Hall, J.D., Johnson, C. S. 1972 Auditory thresholds of a killer whale *Orcinus orca* Linnaeus. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **51**(2B): 515-517.
- Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Matthews, F., Carlson, T. J., & Popper, A. N. (2012b). Effects of exposure to pile-driving sounds on the lake sturgeon, Nile tilapia and hogchoker. *Proceedings of the Royal Society B*, **279**, 4705–4714.
- Halvorsen, M. B., Casper, B. M., Woodley, C. M., Carlson, T. J., & Popper, A. N. 2012c Threshold for onset of injury in Chinook salmon from exposure to impulsive pile driving sounds. *PLoS One*. **7**.
- Hassel, A., Knutsen, T., Dalen, J., Skaar, K., Løkkeborg, S., Misund, O.A., Østensen, Ø., Fonn, M., Haugland, E. K. 2004 Influence of seismic shooting on the lesser sandeel (*Ammodytes marinus*) ICES. *J. Mar. Sci.* **6**: 1165-1173.
- Hastings, M. C., Popper, A. 2005 Effects of sound on fish. California Department of transportation. Final Report CA05-0537, project P476. 85 pp.
- Hawkins, A. D., Popper, A. N. 2018 Directional hearing and sound source localization by fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **144**: 3329–3350.
- Hawkins, A. D., Johnstone, A. D. F. 1978 The hearing of the Atlantic salmon, *Salmo salar*. *Journal of Fish Biology* **13**: 655–673.
- Henderson, E. E., Smith, M. H., Gassmann, M., Wiggins, S. M., Douglas, A. B., Hildebrand, J. A. 2014 Delphinid behavioral responses to incidental mid-frequency active sonar. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **136**(4): 2003-2014.

- Houser, D., Crocker, D. E. Finneran, J. J. 2008 Click-evoked potentials in a large marine mammal, the adult male northern elephant seal (*Mirounga angustirostris*). *The Journal of the Acoustical Society of America*. **124**(1): 44-46.
- Kastak, D., Schusterman, R. J. 1998 Low-frequency amphibious hearing in pinnipeds: methods, measurement, noise, and ecology. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **103**(4).
- Kastak, D., Reichmuth, C., Holt, M. M., Mulsow, J., Southall, B. L., Schusterman, R. J. 2007 Onset, growth, and recovery of in-air temporary threshold shift in a California sea lion (*Zalophus californianus*). *The Journal of the Acoustical Society of America*. **122**(5): 2916-2924.
- Kastelein, R. A., Gransier, R., Hoek, L., de Jong, C. A. 2012 The hearing threshold of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) for impulsive sounds (L). *The Journal of the Acoustical Society of America*. **132**(2): 607-610.
- Kastelein, R. A., van Heerden, D., Gransier, R., Hoek, L. 2013 Behavioral responses of a harbor porpoise (*Phocoena phocoena*) to playbacks of broadband pile driving sounds. *Marine Environmental Research*. **92**: 206-214.
- Kastelein, R. A., Hoek, L., Gransier, R., Rambags, M., Claeys, N. 2014 Effect of level, duration, and inter-pulse interval of 1-2 kHz sonar signal exposures on harbor porpoise hearing. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **136**(1): 412-422.
- Kastelein, R. A., Gransier, R., Marijt, M. A., Hoek, L. 2015 Hearing frequency thresholds of harbor porpoises (*Phocoena phocoena*) temporarily affected by played back offshore pile driving sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **137**(2): 556-564.
- Ketten, D. R. 1992 The marine mammal ear: Specializations for aquatic audition and echolocation. In: D. B. Webster, R. R. Fay, & A. N. Popper (Eds.), *The evolutionary biology of hearing*. New York: Springer-Verlag. 717-750.
- Ketten, D. R. 1994 Functional analyses of whale ears: adaptations for underwater hearing, I.E.E.E. In: Proceedings in Underwater Acoustics. **1**: 264-270.
- Ketten, D. R. 2000 Cetacean ears. In: W. W. L. Au, A. N. Popper, & R. R. Fay (Eds.), *Hearing by whales and dolphins*. New York: Springer. 43-108.
- Ketten, D. R., Arruda, J., Cramer, S., Yamato, M. 2016 Great ears: Low-frequency sensitivity correlates in land and marine leviathans. In: A. N. Popper & A. Hawkins (Eds.), *The effects of noise on aquatic life II*. New York: Springer. 529-528.
- Ladich, F., Schulz-Mirbach, T. 2016 Diversity in fish auditory systems: One of the riddles of sensory biology. *Frontiers in Ecology and Evolution*. **4**: 1-26.
- Leonhard, S.B. 2000 Horns Rev Offshore Wind Power Farm. Environmental Impact Assessment of Sea Bottom and Marine Biology. Bio/consult. Report request. Commissioned by Elsam I/S. 1-36.
- Lesage, V., Barrette, C. 1999 The effect of vessel noise on the vocal behavior of belugas in the St. Lawrence river estuary, Canada. *Marine mammal science*. **15**(1): 65-84.
- Lisney, Y. J. 2010. A review of the sensory biology of chimaeroid fishes (*Chondrichthyes; Holocephali*). *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. **20**: 571-590.
- Lusseau, D., Bain, D., Williams, R., Smith, J. C. 2009 Vessel traffic disrupts the foraging behavior of southern resident killer whales *Orcinus orca*. *Endangered Species Research*. **6**(3): 211-221.
- Madsen, P. T., Wahlberg, M., Tougaard, J., Lucke, K., Tyack, P. 2006 Wind turbine underwater noise and marine mammals: implications of current knowledge and data needs. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* **309**: 279-295.
- Mann, D. A., Higgs, D. M., Tavalga, W. N., Souza, M. J., Popper, A. N. 2001 Ultrasound detection by clupeiform fishes. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **109**: 3048-3054.
- Mate, B. R., Stafford, K. M., Ljungblad, D.K. 1994 A change in sperm whale (*Physeter macrocephalus*) distribution correlated to seismic surveys in the Gulf of Mexico. *J. Acoust. Soc. Am.* **96**: 3268-3269.
- Maybaum, H. L. 1993 Responses of humpback whales to sonar sounds. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **94**: 184.
- McCauley, R. D., Fewtrell, J., Duncan, A. J., Jenner, C., Jenner, M-N., Pensore, J. D., Prince, R. I. T., Adhitya, A., Murdoch, J., McCabe, K. 2000 Marine seismic surveys: Analysis of airgun signals; and effects of air gun exposure on humpback whales, sea turtles, fishes and squid. Rep. from Centre for Marine Science and Technology, Curtin Univ., Perth, WA, for Austral. Petrol. Prod. Assoc., Sydney, NSW, 8-5.
- Miller, P. J. O., Biassoni, N., Samuels, A., Tyack, P. L. 2000 Whale songs lengthen in response to sonar. *Nature*. **405**.
- Mooney, T. A., Nachtigall, P. E., Vlachos, S. 2009 Sonar-induced temporary hearing loss in dolphins. *Biology Letters*. **5**(4): 565-567.
- Myrberg, Jr, A. A., Gordon, C. R., Klimley, A. P. 1976 Attraction of free ranging sharks by low frequency sound, with comments on its biological significance. *Sound reception in fish*. Elsevier, Amsterdam. 205-228.
- National Marine Fisheries Service (NMFS) 2018 Marine mammal acoustic technical guidance. Revision to technical guidance for assessing the effects of anthropogenic sound on marine mammal hearing. 178pp.

- National Marine Fisheries Service 2018 Revisions to: Technical Guidance for Assessing the Effects of Anthropogenic Sound on Marine Mammal Hearing (Version 2.0): Underwater Thresholds for Onset of Permanent and Temporary Threshold Shifts. U.S. Dept. of Commer., NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59, 167 p.
- National Research Council 2003 Ocean noise and marine mammals. Washington, DC: National Academies Press. 220 pp.
- Norris, K. S. 1969 The echolocation of marine mammals. In: The biology of marine mammals. H.T. Anderson (eds). Academic Press, New York. 391-423.
- Norris, K. S. 1980 peripheral sound processing in odontocetes. In R.G. Busnel and J.F. Fish (eds): Animal Sonar Systems. New York Plenum Publishing Corporation. 495-509.
- Nowacek, D. P., Johnson, M. P., Tyack, P. L., 2004 North Atlantic right whales (*Eubalaena glacialis*) ignore ships but respond to alerting stimuli. In: Proceedings of the Royal Society of London. Series B: Biological Sciences. **271**: 227–231.
- Parry, G. D., Heislors, S., Werner, G. F., Asplin, M. D., Gason, A. 2002 Assessment of Environmental Effects of Seismic Testing on Scallop Fisheries in Bass Strait. *Marine and Freshwater Resources Institute* (Report No. 50).
- Pearson, W. H., Skalski, J. R., Sulkin, S. D., Malme, C. I. 1994 Effects of seismic energy releases on the survival and development of zoael larvae of dungeness crab (*Cancer magister*). *Marine Environmental Research*. **38**(2): 93-113.
- Pickles, J. O. 1982 An Introduction to the Physiology of Hearing. London: Academic Press.
- Podestà, M., D'Amico, A., Pavan, G., Drougas, A., Komnenou, A., Fortunato, N. 2006 A review of Cuvier's beaked whale strandings in the Mediterranean Sea. *J. Cetacean Res. Manage.* **7**(3): 251-261.
- Polacheck, T., Thorpe, L. 1990 The swimming direction of harbor porpoise in relationship to a survey vessel. Report of the International Whaling Commission. **40**: 463-470.
- Popov, V. V., Supin, A. Ya., Wang, D., Wang, K., Dong, L., Wang, S. 2011 Noise-induced temporary threshold shift and recovery in Yangtze finless porpoises *Neophocaena phocaenoides asiaorientalis*. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **130**(1): 574-584.
- Popov, V. V., Supin, A. Ya., Rozhnov, V. V., Nechaev, D. I., Sysueva, E. V. 2014 The limits of applicability of the sound exposure level (SEL) metric to temporal threshold shifts (TTS) in beluga whales, *Delphinapterus leucas*. *Journal of Experimental Biology*. **217**(10): 1804-1810.
- Popper, A. N., Fay, R. R. 2011 Rethinking sound detection by fishes. *Hearing Research*. **273**(1–2): 25–36.
- Popper, A. N., Smith, M. E., Cott, P. A., Hanna, B. W., MacGillivray, A. O., Austin, M. E., Mann, D. A. 2005 Effects of exposure to seismic airgun use on hearing of three fish species. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **117**: 3958–3971.
- Popper, A. N., Carlson, T. J., Hawkins, A. D., Southall, B. L. & Gentry, R. L. 2006 Interim criteria for injury of fish exposed to pile driving operations: A white paper. In: Report to the Fisheries Hydroacoustic Working Group, California Department of Transportation, USA. 15 pp.
- Popper, A. N., Hastings, M. C. 2009 The effects of anthropogenic sources of sound on fishes. *Journal of Fish Biology*. **75**: 455–489.
- Popper, A. N., Hawkins, A. D. 2019 An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Journal of Fish Biology*. **94**(5): 692-713.
- Popper, A. N., Coombs, S. 1982 The morphology and evolution of the ear in actinopterygian fishes. *American Zoologist*. **22**: 311–328.
- Popper, A. N., Hawkins, A. D., Fay, R. R., Mann, D. A., Bartol, S., Carlson, Coombs, S., Ellison, W. T., Gentry, R. L., Halvorsen, M. B., Lokkeborg, S., Rogers, P. H., Southall, B. L., Zeddies, D. G., Tavolga, W. N. 2014 ASA S3/SC1.4 TR-2014 Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report Prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and Registered with ANSI. American National Standards Institute. 33-51.
- Ramcharitar, J., Gannon, D. P., Popper, A. N. 2006 Bioacoustics of the family Sciaenidae (croakers and drumfishes). *Transactions of the American Fisheries Society*. **135**: 1409–1431.
- Ramprasad, F., Corey, S., Ronald, K. 1973 The harp seal, *Pagophilus groenlandicus*, (Erxleben 1777). XIV. The gross and microscopic structure of the middle ear. *Canadian Journal of Zoology*. **51**(6): 589-600.
- Reeves, R.R. 1977 The problem of gray whale (*Eschrichtius robustus*): harassment at the breeding lagoons and during migration. Final report to US Marine Mammal Commission, MMC- 76/06. 60 pp.
- Repenning, C. A. 1972 Underwater hearing in seals: functional morphology. *Functional anatomy of marine mammals*. Harrison, R. J. (ed.). Academic, London. **1**: 307-331.
- Richardson, W. J., Da Vis, R. A., Evans, C. R., Ljungblad, D. K., Norton, P. 1987 Summer distribution of bowhead whales, *Balaena mysticetus*, relative to oil industry activities in the Canadian Beaufort Sea, 1980 – 84. *Arctic*. **40**(2): 93-104.

- Richardson, W. J., Greene, C. R., Malme, C. I., Thomson, D. H. 1995 Marine Mammals and Noise. Academic Press, New York.
- Ridgway, S., Carder, D. 2000 A preliminary study of loudness at frequencies of 5 to 120 kHz based on whistle response time (RT) in a dolphin. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **108**(5):2515.
- Rolland, R.M., Parks, S. E., Hunt, K. E., Castellote, M., Corkeron, P. J., Nowacek, D. P., Wasser, S. K., Kraus, S. D. 2012 Evidence that ship noise increases stress in right whales. In: Proceedings of the Royal Society B: Biological Sciences. **279**(1737): 2363-2368.
- Sand, O., Bleckmann, H. 2008 Orientation to auditory and lateral line stimuli. In: J. F. Webb, R. R. Fay, & A. N. Popper (Eds.) Fish bioacoustics. New York, NY: Springer Science+Business Media, LLC. 183-222.
- Sand, O., Hawkins, A. D. 1973 Acoustic properties of the cod swimbladder. *J. Exp. Biol.* **58**: 797-820.
- Sand, O., Karlsen, H. E. 2000 Detection of infrasound and linear acceleration in fishes. *Philosophical Transactions of the Royal Society B*. **355**: 1295-1298.
- Santulli, A., Modica, A., Messina, C., Ceffa, L., Curatolo, A., Rivas, G., Fabi, G., D'Amelio, V. 1999 Biochemical responses of European Sea Bass (*Dicentrarchus labrax* L.) to the stress induced by off shore experimental seismic prospecting. *Mar. Pollut. Bull.* **38**: 1105-1114.
- Schulz-Mirbach, T., & Ladich, F. 2016 Diversity of inner ears in fishes: Possible contribution towards hearing improvements and evolutionary considerations. In: J. A. Sisneros (Eds.), Fish hearing and bioacoustics: An anthology in honor of Arthur N. Popper & Richard R. Fay. Cham: Springer International Publishing. 341-391.
- Schulz-Mirbach, T., Ladich, F., Plath, M., Heß, M. 2019 Enigmatic ear stones: What we know about the functional role and evolution of fish otoliths. *Biological Reviews*. **94**: 457-482.
- Sivle, D. L., Wensveen, P. J. Kvaldheim, P. H. 2016 Naval sonar disrupts foraging in humpback whales. *Marine Ecology Progress Series*. **562**: 211-220.
- Slabbekoorn, H. 2018 Soundscape ecology of the Anthropocene. *Acoustics Today*. **14**: 42-49.
- Slotte, K. Hansen, J. Dalen, E. Ona 2004 Acoustic mapping of pelagic fish distribution and abundance in relation to a seismic shooting area off the Norwegian west coast. *Fish. Res.* **67**: 143-150.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Roger, G. L. 2007 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*. **33**(4): 411-521.
- Southall, B. L., DeRuiter, S. L., Friedlander, A., Stimpert, A. K., Goldbogen, J. A., Hazen, E., Casey, C., Fregosi, S., Cade, D. E., Allen, A. N., Harris, C. M., Schorr, G., Moretti, D., Guan, S., Calambokidis, J. 2019 Behavioral responses of individual blue whales (*Balaenoptera musculus*) to mid-frequency military sonar. *Journal of Experimental Biology*. **222**.
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., Tyack, P. L. 2019 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals*. **45**(2): 125-232.
- Stocker, M. 2002 Fish, mollusks and other sea animals' use of sound, and the impact of anthropogenic noise in the marine acoustic environment. In: Sea animals and sound. *Journal of the Acoustical Society of America*. 1-26.
- Tyack, P. 1981 Interactions between singing Hawaiian humpback whales and conspecifics nearby. *Behavioural ecology and sociobiology*. **8**: 105-116.
- Valdemarsen, J. W. 1979 Behaviour aspects of fish in relation to oil platforms in the North Sea. Int Councl Explor Sea CM B 27.
- Varanasi, U., Malins, D.C. 1971 Unique lipids of the porpoise (*Tursiops gilli*): differences in triacylglycerols and wax esters of acoustic (mandibular canal and melon) and blubber tissues. *Biochim. Biophys. Acta*. **231**: 415-418.
- Vella, G., Rushforth, I., Mason, E., Hough, A., England, R., Styles, P., Holt, T., Thorne, P. 2001 Assessment of the effects of noise and vibration from offshore wind farms on marine wildlife. ETSU W/13/00566/REP, DTI/Pub URN 01/1341. 107 pp.
- Wahlberg, M., Westerberg, H. 2005 Hearing in fish and their reactions to sounds from offshore wind farms. *Ma. Ecol. Prog. Ser.* **288**: 295-309.
- Wardle, C. S., Carter, T. J., Urquhart, G. G., Johnstone, A. D. F., Ziolkowski, A. M., Hampson, G., Mackie, D. 2001 Effects of seismic air guns on marine fish. *Cont. Shelf Res.* **21**: 1005-1027.
- Wartzok D, Popper A. N., Gordon J., Merrill, J. 2004 Factors affecting the responses of marine mammals to acoustic disturbance. *Marine Technology Society Journal*. **37**: 6-15
- Weber, K H. 1820 De Aur et Auditu Hominis et Animalium. Pars I. De Aure Animalium aquatiliium. Lipsaie.

- Weir, C. R., Dolman, S. J. 2007 Comparative review of the regional marine mammal mitigation guidelines implemented during industrial seismic surveys, and guidance towards a worldwide standard. *Journal of International Wildlife Law and Policy*. **10**:1–27.
- Westerberg, H. 2000 Impact Studies of Sea-Based Windpower in Sweden. Technische Eingriffe in marine Lebensräume. In: Merck, T. and Nordheim, H. von (eds.), Technische Eingriffe in marine Lebensräume. BFN-Skripten 29, Bundesamt für Naturschutz. 163-168.
- Wever, E. G., Vernon, J. A. 1956 Sound transmission in the turtle's ear. *Proc. Natl. Acad. Sci. USA*. **42**(5): 292-299.
- Würsig, B., Richardson, W. J. 2009 Noise, effects of. In: Perrin WF, Würsig B, Thewissen JGM, editors. Encyclopedia of Marine Mammals. San Diego: Academic Press. 794–802.

BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 4

- ACCOBAMS 2007 Guidelines to address the impact of anthropogenic noise on marine mammals in the ACCOBAMS area. ACCOBAMS-MOP3/2007/Res.3.10. Adopted at the Third Meeting of Parties. 3 pp.
- Agardy, T., Aguilar, N., Cañadas, A., Engel, M., Frantzis, A., Hatch, L., Hoyt, E., Kaschner, K., LaBrecque, E., Martin, V., Notarbartolo di Sciarra, G., Pavan, G., Servidio, A., Smith, B., Wang, J., Weilgart, L., Wintle, B. and Wright, A. 2007. A Global Scientific Workshop on Spatio-Temporal Management of Noise. Report of the Scientific Workshop. 44 pp.
- ANSI/ASA (2009). S12.64/Part 1, *American National Standard Quantities and Procedures for Description and Measurement of Underwater Sound from Ships Part 1: General Requirements* (American National Standards Institute and Acoustical Society of America, New York)
- ASCOBANS, 2009 Report of the Intersessional Working Group on the assessment of acoustic disturbance. Noise Working Group, ASCOBANS, Bonn, 24pp.
- Askeland, B., Hobaek, H., Mjelde, R. 2007 Marine seismic with a pulsed combustion source and pseudo noise codes. *Marine Geophysical Researches*. **28**: 109-117.
- Barlow, J., Gisinier, R. 2006 Mitigating, monitoring and assessing the effects of anthropogenic sound on beaked whales. *J. Cetacean Res. Manage*. **7**(3): 239-249.
- COMMISSION DECISION 2017/848/EU <<http://data.europa.eu/eli/dec/2017/848/oj>>
- Dekeling, R.P.A., Tasker, M.L., Van der Graaf, A.J., Ainslie, M.A., Andersson, M.H., André, M., Borsani, J.F., Brensing, K., Castellote, M., Cronin, D., Dalen, J., Folegot, T., Leaper, R., Pajala, J., Redman, P., Robinson, S.P., Sigray, P., Sutton, G., Thomsen, F., Werner, S., Wittekind, D., Young, J.V., 2014 Monitoring Guidance for Underwater Noise in European Seas, Part I: Executive Summary, ICES Document JRC Scientific and Policy Report EUR 26557 EN.
- Dekeling, R., Mark Tasker, M., Ainslie, M., Andersson M., André, M., Borsani, F., Brensing, K., Castellote, M., Dalen, J., Folegot, T., van der Graaf, S., Leaper, R., Liebschner, A., Pajala, J., Robinson, S., Sigray, P., Sutton, G., Thomsen, F., Werner, S., Wittekind, D., Young, V. J. 2016 The European Marine Strategy: Noise Monitoring in European Marine Waters from 2014. In: The effects of noise on aquatic life II, Popper A., Hawkins A. (eds). Springer, New York. 205-215.
- Directive 2008/56/EC of the European Parliament <<http://data.europa.eu/eli/dir/2008/56/oj>>
- Dolman, S. J., Evans, P. G. H., Notarbartolo-di-Sciarra, G., Frisch, H. 2010 Active sonar, beaked whales and European regional policy. *Marine Pollution Bulletin*. **63**(1-4): 27-34.
- Drira, A., Bouzidi, M., Maglio, A., Pavan, G., Salivas, M. 2018 Modelling underwater sound fields from noise events contained in the ACCOBAMS impulsive noise register to address cumulative impact and acoustic pollution assessment. EEA Proceedings EuroNoise 2018.
- Farcas, A., Thompson, P. M., Merchant, N. D. 2016 Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental impact assessment Review*. 114-122.
- Fossati, C., Mussi, B., Tizzi, R., Pavan, Pace, D.S. 2017 Italy introduces pre and post operation monitoring phases for offshore seismic exploration activities. *Marine Pollution Bulletin*. **120**(1-2): 376-378.
- Gisinier, R.C. 1998 Workshop on the effects of anthropogenic noise in the marine environment. 117 pp.
- Guan, S., Fossati, C., Pavan, G., Caltavuturo, G. 2011 Challenges of using passive acoustic monitoring for marine mammal during anthropogenic activities. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **129**(4).
- Heise, K. A., Barrett-Lennard, L. G., Chapman, N. R., Dakin, D. T., Erbe, C., Hannay, D. E., Merchant, N. D., Pilkington, J. S., Thornton, S. J., Tollit, D. J., Vagle, S., Veirs, V. R., Vergara, V., Wood, J. D., Wright, B. M., Yurk, H. 2017 Proposed Metrics for the Management of Underwater Noise for Southern Resident Killer Whales Coastal Ocean Report Series (2), Ocean Wise, Vancouver, 31pp.

- Hildebrand, J. A. 2009 Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar Ecol Prog Ser.* **395**:5-20.
- House, I. and Street, B., 2017. JNCC guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from geophysical surveys.
- International Maritime Organization. 2014 GUIDELINES FOR THE REDUCTION OF UNDERWATER NOISE FROM COMMERCIAL SHIPPING TO ADDRESS ADVERSE IMPACTS ON MARINE LIFE. London, England: International Maritime Organization.
- ISO 2016. 17208-1:2016, I. “ Underwater acoustics—Quantities and procedures for description and measurement of underwater sound from ships—Part 1: Requirements for precision measurements in deep water used for comparison purposes” (International Organization for Standardization, Geneva, Switzerland).
- JNCC (U.K. Joint Nature Conservation Committee) 2010 JNCC guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from seismic surveys. Joint Nature Conservation Committee, Aberdeen, UK.
- JNCC (U.K. Joint Nature Conservation Committee) 2003 *Handbook for Phase 1 Habitat Survey – A Technique for Environmental Audit*. Joint Nature Conservation Committee, Peterborough, UK.
- JNCC (U.K. Joint Nature Conservation Committee) 2017 JNCC guidelines for minimising the risk of injury to marine mammals from geophysical surveys. Joint Nature Conservation Committee, Aberdeen, UK.
- Laist, D. W., Knowlton, A. R. Mead, J. G. Collet, A. S. 2001 Collisions between ships and whales. *Marine Mammal Science.* **17**(1): 35-75.
- Maglio, A., Drira, A., Fossati, C., Pavan, G. 2017 Modelli di previsione della propagazione sonora in ambiente marino per il monitoraggio del rumore subacqueo e del suo impatto sui cetacei. *Associazione italiana di acustica.* 44° Convegno Nazionale. 2 pp.
- Merchant, N. D. 2019 Underwater noise abatement: Economic factors and policy options. *Environmental Science and Policy.* **92**: 116-123.
- Nedwell, J., Langworthy, J., Howell, D., 2003 Assessment of sub-sea acoustic noise and vibration from offshore wind turbines and its impact on marine wildlife; initial measurements of underwater noise during construction of offshore windfarms, and comparison with background noise. Cowrie Rep 544 R 0424:1 – 68.
- Nedwell, J. R., Lovell, Turmpenny, W. H. 2005 Experimental validation of a species-specific behavioral impact metric for underwater noise. Proceedings of the 50th Meeting of the Acoustical Society of America/NOISE-CON 2005, 17--21 October 2005b, Minneapolis, Minnesota.
- Pavan, G., Righini, R., Salvalaggio, E. 2018 LE FONOTECHE PER DOCUMENTARE LA COMPLESSITA' DEL PAESAGGIO SONORO FRA BIOFONIA E ANTROPOFONIA. *Associazione Italiana di Acustica.* 45° Convegno Nazionale, Aosta.
- Popper, A. N., Hawkins, A. D. 2019 An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *Fish Biology.* 1-22.
- Southall, B. L. 2005 Shipping Noise and Marine Mammals: A Forum for Science, Management, and Technology. Final Report of the National Oceanic and Atmospheric Administration (NOAA) International Symposium. 40 pp.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Finneran, J. J., Roger, G. L. 2007 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals.* **33**(4): 411-521
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., Tyack, P. L. 2019 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals.* **45**(2): 125-232.
- Spence, J., Fischer, R., Bahtiarian, M., Boroditsky, L., Jones, N., Dempsey, R. 2007 Review of existing and future potential treatments for reducing underwater sound from oil and gas industry activities. *NCE Report*, pp.07-001.
- Tenghamn, S., Stenzel, A. 2006 Apparatus for attenuating noise in marine seismic streamers. US Patent App. 11/059, 497.
- Tyack, P. L., Zimmer, W. M. X., Moretti D., Southall, B. L., Claridge, D. E., Durban, J. W., Clark, C. W., D'Amico, A., DiMarzio, N., Jarvis, S., McCarthy, E., Morrissey, R., Ward, J., Boyd, I. L. 2011 Beaked whales respond to simulated and actual naval sonar. *PLoS ONE.* **6**(3): 1-15.
- Urick, R. J. 1983 Principles of underwater sound. Peninsula, Los Altos, CA.
- Van der Graaf, A. J., Ainslie, M. A., André, M., Brensing, K., Dalen, J., Dekeling, R. P. A., Robinson, S., Tasker, M. L., Thomsen, F., Werner, S. 2012 European Marine Strategy Framework Directive - Good Environmental Status (MSFD GES): Report of the Technical Subgroup on Underwater noise and other forms of energy.

- Viola, S., Grammatta, R., Sciacca, V., Bellia, G., Beranzoli, L., Buscaino, G., Caruso, F., Chierici, F., Cuttone, G., D'Amico, A., De Luca, V., Embriaco, D., Favali, P., Giovanetti, G., Marinaro, G., Mazzola, S., Filiciotto, F., Pavan, G., Pellegrino, C., Pulvirenti, S., Simeone, F., Speciale, F., Riccobene, G. 2017 Continuous monitoring of noise levels in the Gulf of Catania (Ionian Sea). Study of correlation with ship traffic. *Marine Pollution Bulletin*. **121**: 97-103.
- Weir, C. R., Dolman, S. J. 2007 Comparative Review of the Regional Marine Mammal Mitigation Guidelines Implemented During Industrial Seismic Surveys, and Guidance Towards a Worldwide Standard. *Journal of International Wildlife Law & Policy*. **10**(1): 1-27.
- Williams, R., Wright, A.J., Ashe, E., Blight, L.K., Bruintjes, R., Canessa, R., Clark, C. W., Cullis-Suzuki, S., Dakin, D. T., Erbe, C., Hammond, P. S., Merchant, N. D., O'Hara, P. D., Purser, J., Radford, A. N., Simpson, S. D., Thomas, L., Wale, M. A. 2015 Impacts of anthropogenic noise on marine life: publication patterns, new discoveries, and future directions in research and management. *Ocean & Coastal Management*. **115**: 17-24.
- Wright, A. J., Cosentino, A. M. 2010 JNCC guidelines for minimising the risk of injury and disturbance to marine mammals from seismic surveys: we can do better. *Marine Pollution Bulletin*. **100**(1): 231-239.
- Wright, A.J. 2014 Reducing Impacts of Human Ocean Noise on Cetaceans: Knowledge Gap Analysis and Recommendations. Ottawa, Canada: World Wildlife Fund Global Arctic Programme. 98 pp.
- <www.isprambiente.it>
- <www.skysails.info>

BIBLIOGRAFIA CAPITOLO 5

- Barbier, M., Reitz, A., Pabortsava, K., Wöfl, A.-C., Hahn, T., Whoriskey, F. 2018 Ethical recommendations for ocean observation. *B Adv. Geosci.* **45**: 343-361.
- Chami, R., Cosimano, T., Fullenkamp, C., Sena Oztosun, S. 2019 Nature's Solution to Climate Change. *Finance & Development*. **56**(4): 34-38.
- COM 2000 Comunicazione della Commissione sul ricorso al principio di precauzione. Versione consolidata del trattato sul funzionamento dell'Unione europea, PARTE TERZA - POLITICHE E AZIONI INTERNE DELL'UNIONE, TITOLO XX – AMBIENTE, Articolo 191 (ex articolo 174 del TCE) < http://data.europa.eu/eli/treaty/tfeu_2016/art_191/oj >
- Finneran, J. J. 2015 Noise-induced hearing loss in marine mammals: A review of temporary threshold shift studies from 1996 to 2015. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **138**(3): 1702-1726.
- Hawkins, A. D., Pembroke A. E., Popper A. N. 2015 Information gaps in understanding the effects of noise on fishes and invertebrates. *Reviews in Fish Biology and Fisheries*. **25**: 39-64.
- Hildebrand, J. A. 2009 Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar Ecol Prog Ser*. **395**: 5-20.
- Licitra, G., Borsani, F., Marsico, G., Pavan, G., Riccobene, G. 2015 The marine bioacoustics for the study of cetaceans in the implementation in Italy of marine strategy. *Rivista Italiana di Acustica*. **39**(3): 1-14.
- Lucke, K., Siebert, U., Lepper, P.A., Blanchet, M. A. 2011 Temporary shift in masked hearing thresholds in a harbour porpoise (*Phocoena phocoena*) after exposure to seismic airgun stimuli. *The Journal of the Acoustical Society of America*. **125**(6): 4060-4070.
- Normandeau Associates, Inc. 2012 Effects of noise on fish, fisheries, and invertebrates in the U.S. Atlantic and Arctic from energy industry sound-generating activities. A literature synthesis for the U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. Contract #M11PC00031. Bedford (NH): U.S. Dept. of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. 153 pp.
- Pavan, G., Righini, R., Salvalaggio, E. 2018 LE FONOTECHE PER DOCUMENTARE LA COMPLESSITA' DEL PAESAGGIO SONORO FRA BIOFONIA E ANTROPOFONIA. Associazione Italiana di Acustica. 45° Convegno Nazionale, Aosta.
- Reichmuth, C., Holt, M. M., Sills, J., M., Southall, B. L. 2013 Comparative assessment of amphibious hearing in pinnipeds. *Journal of Comparative Physiology A*. **199**(6): 491-507.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W., T., Finneran, J. J., Roger, G. L. 2007 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*. **33**(4): 411-521.
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., Tyack, P. L. 2019 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals*. **45**(2): 125-232.

BIBLIOGRAFIA APPENDICE A

- Good Practice Guide for Underwater Noise Measurement, 2014 National Measurement Office, Marine Scotland, The Crown Estate, Robinson, S.P., Lepper, P. A. and Hazelwood, R.A., NPL Good Practice Guide No. 133, ISSN: 1368-6550.
- Hansen, C. H. 1951 Fundamentals of acoustics. *American Journal of Physics*. **19**.
- Heise, K. A., Barrett-Lennard, L. G., Chapman, N. R., Dakin, D. T., Erbe, C., Hannay, D. E., Merchant, N. D., Pilkington, J. S., Thornton, S. J., Tollit, D. J., Vagle, S., Veirs, V. R., Vergara, V., Wood, J. D., Wright, B. M., Yurk, H. 2017 Proposed Metrics for the Management of Underwater Noise for Southern Resident Killer Whales Coastal Ocean Report Series (2), Ocean Wise, Vancouver, 31pp.
- Southall, B. L., Bowles, A. E., Ellison, W., T., Finneran, J. J., Roger, G. L. 2007 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals*. **33**(4): 411-521.
- Southall, B. L., Finneran, J. J., Reichmuth, C., Nachtigall, P. E., Ketten, D. R., Bowles, A. E., Ellison, W. T., Nowacek, D. P., Tyack, P. L. 2019 Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals*. **45**(2): 125-232.

Appendice A

L'obiettivo più importante è quello di individuare unità di misura e procedure che siano universalmente utilizzabili, riconosciute e non ambigue.

In questa appendice vengono definite le principali quantità utilizzate in oceanografia acustica (Hansen, 1951; Southall *et al.*, 2007, 2019; GPG, 2014).

Suono: è una perturbazione della pressione che si propaga in un mezzo comprimibile tramite l'azione degli stress elastici che richiedono compressione ed espansione locale del mezzo.

Frequenza: è il *rate* di vibrazione [Hertz (Hz)] o cicli per secondo. Percepriamo la frequenza come “tono” del suono di una frequenza costante che continua per un lasso di tempo sostanziale. Un impulso è un suono di breve durata, e può includere un ampio *range* di frequenze.

Durata dell'impulso o del segnale: tempo durante il quale si manifesta una specifica percentuale dell'energia sonora in un segnale [s].

Pressione sonora [Pa]: è l'ampiezza dell'onda di pressione. Può essere misurata in acqua utilizzando un idrofono.

Frequenza di ripetizione dell'impulso (*pulse repetition rate*): il numero di impulsi o eventi al secondo [Hz].

Intensità del suono (istantaneo): il prodotto della pressione sonora e la velocità della particella ad un punto nel campo sonoro [W/m^2]. Quantità vettoriale.

Audiogrammi: plot di rilevamento di soglie uditive assolute (dB) in condizioni di quiete in funzione della frequenza (kHz) (Heise *et al.*, 2017).

Curve di risposta comportamentale: grafici basati sulle stime delle percentuali di una popolazione che possa rispondere dal punto di vista comportamentale se esposta a differenti livelli o dosi di un agente stressante potenziale (nel nostro caso il rumore).

Banda di frequenza 1/3 d'ottava: frequenza di banda la cui larghezza di banda è un terzo di ottava, con un ottavo che rappresenta un raddoppiamento della frequenza. Questi terzi di ottavi di banda, che derivano da uno studio sull'udito umano, sono divisioni delle frequenze in bande che riflettono la dimensione dei filtri uditivi (bande citiche) nell'udito della maggior parte dei mammiferi terrestri e degli uccelli. La Marine Strategy Framework Directive, per quanto riguarda il rumore sottomarino, si basa sulle bande di 1/3 d'ottava che hanno frequenze centrali all'interno della banda (Heise *et al.*, 2017) (Tabella A1).

Uso dei decibel: In acustica, è normale esprimere alcune quantità come livelli, usando i decibel [dB]. Un livello è un metodo di esprimere la grandezza di una quantità come un rapporto logaritmico rispetto ad un valore di riferimento (20 μPa in aria, 1 μPa in acqua). I decibel usano i logaritmi in base 10 (metodo accettato dal *Committee International des Poids et Measures* per

Tabella A1 - La Marine Strategy Framework Directive ha selezionato 1/3 di ottava di banda come focus del loro programma di monitoraggio a lungo termine del rumore sottomarino, perché si suppone che il rumore navale abbia i livelli di pressione acustica più elevati in quelle bande (tabella modificata da Heise *et al.*, 2017).

Frequenza [Hz]					
Ottavi di banda			1/3 di ottava di banda		
Limite inferiore della banda [Hz]	Frequenza centrale [Hz]	Banda superiore [Hz]	Limite inferiore della banda [Hz]	Frequenza centrale [Hz]	Banda superiore [Hz]
44	63	88	56.2	63	70.8
88	125	177	112	125	141

l'uso del Sistema Internazionale). Il livello di riferimento per l'aria è "dB re 20 microPa", che è il limite dell'udibilità umana. In acqua, dove l'udito umano non è efficiente, viene misurato un livello arbitrario di 1 microPa, cioè il suono di una data intensità sarà maggiore di 26 dB in acqua rispetto a quello percepito in aria. Inoltre, siccome l'acqua ha un'impedenza maggiore, i suoni di pressione uguale varranno 36 dB in più rispetto all'aria. Essi sembreranno più forti, tuttavia, questa esperienza sarà soggettiva e molto difficile da quantificare. Inoltre, il suono di uguale pressione può essere maggiore di 62 dB in acqua rispetto all'aria (26 dB più 36 dB) (ad esempio, i mammiferi terrestri hanno un limite di danno intorno a 100-120 dB, mentre i mammiferi marini attorno 180-190 dB. Questi valori sono in linea con la differenza di 62 dB).

Radice della media dei quadrati (*root mean square - RMS*) della pressione sonora [dB re 1 microPa]. Può essere espressa come:

$$\hat{p} = \left\{ \frac{1}{t_2 - t_1} \int_{t_1}^{t_2} p(t)^2 dt \right\}^{\frac{1}{2}}$$

con t_1 e t_2 tempi di inizio e di fine dell'intervallo temporale.

Descrive come la pressione acustica sia mediata su un periodo specifico di tempo ed è una metrica utilizzata soprattutto per i suoni continui.

Livello di pressione sonora (SPL): può essere calcolata come: 10 volte il logaritmo in base 10 del rapporto della pressione quadratica media su un intervallo di tempo rispetto al valore di riferimento del quadrato della pressione acustica. Oppure 20 volte il logaritmo in base 10 del rapporto della radice quadrata media della pressione sonora su un intervallo di tempo rispetto al valore della pressione sonora.

$$SPL = 10 \log_{10} \left(\frac{\hat{p}^2}{p_0^2} \right) = 20 \log_{10} \left(\frac{\hat{p}}{p_0} \right)$$

con p_0 valore di riferimento della pressione sonora. Il valore di riferimento di SPL per il suono in acqua è 1 μ Pa dB re 1 μ Pa.

Livello di esposizione sonora (SEL): è calcolata da dieci volte il logaritmo in base 10 del rapporto dell'esposizione sonora, E, rispetto ad un valore di riferimento E_0 .

$$SEL = 10 \log_{10} \left(\frac{E}{E_0} \right)$$

Il valore di riferimento è 1 μ Pa²s.

I decibel non misurano una quantità assoluta, ma piuttosto rappresentano un aumento proporzionale sopra un livello di riferimento arbitrario dell'intensità del suono. Ogni aumento di 10 dB rappresenta un aumento di 10-fold nell'intensità del suono. Tuttavia, la nostra percezione della rumorosità relativa diminuisce man mano che il livello di intensità sonora aumenta. C'è molta soggettività nella rumorosità percepita.

Confrontare le misure di dB in aria ed in acqua comprende due correzioni. A volte è possibile che, non applicandole, si possano sovrastimare gli impatti del rumore marino.

Pressione acustica di picco *zero-to-peak*: pressione sonora massima durante un intervallo di tempo [Pa].

Pressione acustica *peak-to-peak*: la somma della pressione compressiva e rarefazionale durante un intervallo.

Posizione dell'Istituto Nazionale di Oceanografia e di Geofisica Sperimentale - OGS riguardo al rumore antropico in ambiente marino

- 1) La direzione di OGS è consapevole del progressivo aumento del livello di inquinamento acustico nell'ambiente marino dovuto ad una varietà di sorgenti di rumore antropico, sia continuo - come il traffico navale - che impulsivo - come attività di palificazione offshore e prospezione geofisiche.
- 2) La direzione di OGS è consapevole delle problematiche legate agli effetti del rumore antropico sugli ecosistemi marini. Considera cruciale ricordare che la sensibilità acustica di molti animali marini è tuttora poco nota e ritiene corretto applicare il principio di precauzione e stabilire degli standard di mitigazione degli impatti in modo da essere certi di non recare danno agli altri esseri viventi.
- 3) A causa delle difficoltà oggettive nel condurre ricerca sperimentale e clinica sui grandi mammiferi e su altre classi animali, la direzione di OGS riconosce la necessità di promuovere ricerca scientifica allo scopo di colmare le molte lacune di conoscenza tuttora esistenti.
- 4) La comunità scientifica di OGS si impegna a promuovere e a condurre ricerca scientifica finalizzata al continuo miglioramento della normativa ed è a disposizione delle autorità preposte all'implementazione della direttiva europea per i mari italiani e per le aree antartiche.
- 5) In particolare, OGS ritiene prioritario promuovere ed eseguire ricerca scientifica e tecnologica finalizzata allo sviluppo di sorgenti acustiche impulsive e continue alternative a quelle esistenti, coniugando efficienza e minore impatto.
- 6) La comunità scientifica di OGS è consapevole del ruolo imprescindibile della ricerca scientifica oceanografica sia per le sue ricadute sulla conoscenza integrata del pianeta terra (idrosfera, litosfera, criosfera e biosfera) che per le ricadute sulla sicurezza della società e delle attività umane nell'ambiente marino.
- 7) La comunità scientifica di OGS è consapevole che l'utilizzo di tecniche di indagine oceanografica che comportano emissioni sonore, di varia frequenza e intensità nell'ambiente marino richiede di conciliare l'irrinunciabilità della ricerca scientifica oceanografica con l'irrinunciabilità del rispetto dell'ambiente e della difesa del buono stato della vita marina.
- 8) Come propria politica ambientale quindi, OGS opera mettendo in atto misure di mitigazione a salvaguardia degli impatti di ogni tipo secondo le migliori conoscenze scientifiche disponibili nel rispetto delle normative, assicurando che l'impatto residuo risulti minimo e sostenibile secondo le conoscenze attuali.
- 9) Nel caso specifico delle sorgenti impulsive pneumatiche dette comunemente '*airgun*', esse sono utilizzate per scopi di ricerca scientifica da enti di ricerca ed università con importanti applicazioni per discipline quali paleo-clima, rischio sismico, naturale e geologico e sulla

conoscenza di base della struttura interna della terra. È estremamente importante che con le adeguate misure di mitigazione dell'impatto ambientale la ricerca scientifica possa continuare a svolgere la propria missione di progresso della conoscenza al servizio della società.

10) Come dimostrato in molti casi al mondo, la normativa deve consentire un utilizzo sostenibile per l'ambiente marino delle sorgenti di rumore, minimizzando quanto più possibile, secondo quanto suggerisce l'attività di ricerca scientifica, gli effetti sulla fauna marina e gli ecosistemi in generale. OGS riconosce il ruolo fondamentale del *Technical Group on Noise (TG Noise)* istituito dalla Commissione Europea per agevolare l'implementazione della *Marine Strategy Framework Directive* in relazione al Descrittore 11 (Energia/Rumore) con l'integrazione ed armonizzazione della normativa nazionale all'interno delle regioni e sottoregioni marine.

Il Presidente di OGS, Prof. Nicola Casagli

I Direttori delle sezioni scientifiche di Geofisica (Angelo Camerlenghi), Infrastrutture (Franco Coren), Ricerche Sismologiche (Stefano Parolai), Oceanografia (Cosimo Solidoro) e del servizio di Cooperazione Internazionale, Comunicazione, Sviluppo delle professionalità e Promozione della Ricerca (Mounir Ghribi).