

UNIVERSITÁ DEGLI STUDI DI PADOVA

DIPARTIMENTO DI BIOLOGIA

Corso di Laurea in Biologia



Elaborato di laurea

**Inquinamento acustico nel Mar Mediterraneo
e conseguenze per la fauna marina**

Tutor: Prof.ssa Maria Gabriella Marin

Dipartimento di Biologia

Laureanda: Noemi Vallortigara

Anno Accademico 2022/2023

INDICE

1. Introduzione.....	1
2. Il suono e la sua trasmissione in acque marine.....	2
2.1. Che cos'è il suono.....	2
2.2. Caratteristiche del suono	2
2.3. Misurazione del suono.....	3
2.4. Trasmissione del suono in mare.....	3
2.5. Utilità e utilizzo del suono in mare nelle componenti biologiche.....	5
2.6. Percezione del suono.....	5
3. L'inquinamento acustico marino.....	6
3.1. Il <i>soundscape</i> marino.....	6
3.2. L'aumento del rumore nel mare mediterraneo.....	8
3.3. Classificazione delle fonti di rumore antropogenico.....	8
3.3.1. Acuto.....	8
3.3.2. Cronico.....	9
4. Effetti dell'inquinamento acustico sulla fauna marina.....	10
4.1. Impatto sui pesci.....	10
4.1.1. <i>Dicentrarchus labrax</i>	10
4.1.2. <i>Sparus aurata</i>	12
4.2. Impatto sugli invertebrati.....	13
4.2.1. <i>Mytilus spp</i>	13
4.2.2. Cefalopodi.....	15
4.2.3. <i>Palaemus serratus</i>	17
4.2.4. Cnidari.....	18
4.3. Impatto sui cetacei.....	18
4.3.1. <i>Tursiops truncatus</i>	19
4.3.2. <i>Ziphius cavirostris</i>	19
5. Soluzioni per mitigare gli effetti dell'inquinamento acustico marino.....	21
5.1. Provvedimenti politici.....	22
5.1.1. Misure di riduzione dell'impatto acustico navale.....	23
5.2. Istituzione di aree marine protette.....	24
6. Conclusioni.....	25
7. Letteratura citata.....	26

1. Introduzione

Il suono, definito come un'onda di compressione che si propaga in un mezzo, è una componente fondamentale dell'ambiente marino. Nel mare la propagazione del suono è diversa rispetto all'aria: la velocità del suono è maggiore e la sua intensità si esprime con una differenza di 61,5 dB; inoltre, la trasmissione del suono è influenzata da vari fattori quali riflessione, rifrazione e *scattering* causati dall'acqua. L'insieme di tutti i suoni presenti nel mare, provenienti da fonti biotiche o abiotiche, si definisce *soundscape*. Molti animali marini percepiscono i suoni e molti sono anche in grado di produrli, per cui contribuiscono al *soundscape* marino e allo stesso tempo lo utilizzano per ottenere informazioni dall'ambiente e per scambiare informazioni tra loro. Al *soundscape* marino contribuisce però anche la componente antropogenica, la quale negli ultimi decenni è aumentata notevolmente, generando l'inquinamento acustico marino e influenzando negativamente molti aspetti della vita di diversi organismi, soprattutto invertebrati, pesci e cetacei. I rumori antropogenici derivano soprattutto da imbarcazioni e trasporti navali, ma anche da operazioni di costruzione, sonar ed esplosioni sottomarine. L'inquinamento acustico comporta mascheramento dei segnali utilizzati dagli animali marini, risposte comportamentali anomale, risposte di stress e conseguenti danni fisiologici, danneggiamento dei tessuti e in estremi casi la morte. Diversi spiaggiamenti di zifi (*Ziphius cavirostris*) si sono verificati a causa di forti sonar che hanno provocato loro evidenti danni ai tessuti corporei deputati all'udito. La maggior parte degli studi è stata condotta sui mammiferi marini, ma in realtà anche i pesci e gli invertebrati sono colpiti da questo tipo di inquinamento, che sta diventando sempre più presente. È fondamentale studiare l'inquinamento acustico, poiché colpisce una grande varietà di taxa, i quali comprendono specie chiave per gli ecosistemi e specie importanti dal punto di vista socioeconomico e commerciale. In questo elaborato si indagano le caratteristiche del suono nel mare e le componenti del *soundscape* marino, per poi analizzare le cause e soprattutto le conseguenze dell'inquinamento acustico (specialmente proveniente da navi e operazioni di costruzione) su alcune specie caratteristiche del Mediterraneo di pesci, invertebrati e cetacei. Infine, si riportano in breve i provvedimenti politici e le misure di mitigazione volti a diminuire gli effetti negativi dell'immissione di rumore nell'acqua del mar Mediterraneo, tra cui l'istituzione di aree marine protette.

2. Il suono e la sua trasmissione in acque marine

2.1. Che cos'è il suono?

Il suono è un disturbo meccanico generato dalla vibrazione di un oggetto che si propaga attraverso un mezzo (liquido, solido o gassoso) come onda di compressione. Le particelle del mezzo non viaggiano con l'onda, ma vibrano con un movimento avanti-indietro attorno alla loro posizione di equilibrio, in direzione parallela a quella della propagazione, generando regioni di alta pressione corrispondenti alle compressioni e regioni di bassa pressione corrispondenti alle espansioni dell'onda. (Bradley and Stern, 2008). Il suono, quindi, ha due componenti: una di pressione e una di movimento delle particelle. (Bradley and Stern, 2008).

2.2. Le caratteristiche del suono

La conoscenza delle caratteristiche del suono è fondamentale per la comprensione del suo ruolo nell'ambiente marino. Le principali caratteristiche del suono sono frequenza, lunghezza d'onda, intensità e trasmissibilità.

La rappresentazione dell'onda sonora come onda sinusoidale permette di capire i parametri di frequenza e lunghezza d'onda. L'onda ha un andamento ripetitivo, in cui ogni ripetizione si definisce ciclo. Il tempo impiegato per completare un ciclo è il periodo, mentre la frequenza è il numero di cicli compiuti per secondo e si ottiene dal reciproco del periodo. L'unità di misura della frequenza è l'hertz (Hz) e indica il numero di cicli in un secondo. Dalla frequenza dell'onda dipende il tono del suono: una frequenza maggiore porta a un suono più alto, una frequenza minore produce un suono più basso (Bradley and Stern, 2008).

La lunghezza d'onda, λ , rappresenta la distanza che il suono percorre durante il periodo dell'onda. Lunghezza d'onda e frequenza sono correlate, infatti il

Tabella 1. Ponendo la velocità del suono in mare a 1500 m/s si ottengono le relazioni seguenti tra frequenza e lunghezza d'onda, calcolate usando l'equazione *lunghezza d'onda = velocità del suono / frequenza* (da DOSITS - University of Rhode Island and Inner Space Center <https://dosits.org/>)

Frequenza (Hertz)	Lunghezza d'onda (metri)
100	15
1.000	1,5
10.000	0,15

prodotto tra questi due parametri dà la velocità di propagazione dell'onda sonora. Un suono con un'elevata frequenza ha una lunghezza d'onda minore rispetto a un suono con frequenza bassa (Tab. 1) (DOSITS - University of Rhode Island and Inner Space Center <https://dosits.org/>).

L'intensità del suono si definisce come l'energia trasportata dall'onda per un'unità di area in un'unità di tempo. L'intensità del suono è correlata all'ampiezza dell'onda, infatti un'onda con un'ampiezza maggiore (data da una pressione

maggiore) trasporta una grande quantità di energia e quindi avrà un'intensità più elevata rispetto a un suono con ampiezza minore. I suoni con intensità maggiore sono percepiti come più forti, mentre quelli con intensità minore sono percepiti come più deboli.

2.3. Misurazione del suono

Il livello di intensità dei suoni si misura in decibel (dB), un'unità di misura relativa definita come 10 volte il logaritmo del rapporto tra l'intensità di un'onda sonora e un'intensità di riferimento. L'intensità solitamente viene però misurata indirettamente, infatti gli strumenti misurano la pressione (ampiezza) di un suono (in quanto l'intensità di un suono è proporzionale al quadrato della pressione). Il decibel è dunque un'unità che compara due pressioni, di cui una è una pressione di riferimento. Nell'acustica subacquea la pressione di riferimento è 1 μPa , mentre nell'acustica aerea è 20 μPa . Il risultato è che l'intensità del suono data in decibel sott'acqua è diversa dall'intensità del suono data in decibel nell'aria (DOSITS - University of Rhode Island and Inner Space Center <https://dosits.org/>). Inoltre, l'intensità di un'onda sonora dipende non solo dalla pressione dell'onda, ma anche dalla densità del mezzo e dalla velocità del suono. Il risultato è che le onde sonore con la stessa intensità assoluta nell'acqua e nell'aria (misurata in potenza w/m^2 , watt su metro quadrato) hanno intensità relative che differiscono di 61,5 dB (per ottenere l'intensità in decibel a 1 μPa in acqua è necessario sottrarre il fattore 61,5 dB all'intensità relativa in aria a 20 μPa). La differenza di 61,5 dB è spiegata per 26 dB dalla differenza nelle pressioni di riferimento e per i restanti 35,5 dB da differenze di densità e velocità del suono. Di conseguenza, per poter comparare i livelli sonori in aria e acqua tra di loro, è fondamentale esprimere le intensità sonore relative in decibel accompagnate dalla pressione di riferimento utilizzata (Finfer et al., 2008).

Gli idrofoni sono gli strumenti utilizzati per misurare la pressione delle onde sonore in acqua e quindi tutte le caratteristiche del suono. Esistono due tipi di idrofoni: omnidirezionali, che ricevono suoni da tutte le direzioni, e direzionali che sono sensibili a suoni provenienti da una determinata direzione (DOSITS - University of Rhode Island and Inner Space Center <https://dosits.org/>).

2.4. Trasmissione del suono in mare

Il movimento del suono attraverso un mezzo è definito propagazione. In mare il suono si propaga a una velocità quasi cinque volte superiore rispetto all'aria, circa 1500 m/s in acqua rispetto a 340 m/s in aria. La velocità del suono nelle acque marine però non è costante, varia nel tempo e con la profondità perché influenzata da parametri oceanografici come temperatura, salinità e pressione. La velocità aumenta all'aumentare della temperatura (circa +4,0 m/s ogni +1°C), della salinità (+1,4 m/s ogni +1 PSU) e della pressione (+17 m/s ogni +1000 m di profondità) (Fig.1). A circa -1000 metri di profondità il suono raggiunge la sua velocità

minima, in questa zona si crea un canale sonoro che permette ai suoni con bassa frequenza di propagarsi per lunghe distanze. Questo canale è definito in inglese *SOFAR channel* (*Sound Fixing And Ranging*). Il suono si focalizza nel canale a causa della rifrazione delle onde verso il suo interno (Jochum and Murtugudde, 2006). Questo canale sonoro viene utilizzato dai cetacei misticeti durante le loro migrazioni per comunicare a distanze di centinaia o addirittura migliaia di miglia (NOAA - <https://oceanservice.noaa.gov/facts/>).

In mare il suono non si propaga in linea retta poiché le interazioni tra il suono e l'acqua provocano riflessione, rifrazione e *scattering*. La riflessione è la deflessione dell'onda sonora dovuta all'incontro con un oggetto (per esempio una montagna sottomarina) o con il confine tra due mezzi (per esempio la superficie dell'acqua o il fondo dell'oceano). La rifrazione rappresenta invece il piegamento di un'onda sonora verso una regione caratterizzata da minore velocità del suono e si verifica quando il suono incontra un cambiamento dei parametri temperatura, salinità e pressione che provoca un cambiamento nella velocità. Lo *scattering* si verifica quando un'onda sonora viene interrotta dall'incontro con un oggetto (particelle, bolle d'aria, organismi...) o con una superficie (come il fondale) e rappresenta la diffusione dell'onda in varie direzioni (<https://dosits.org/>). Mentre il suono si propaga attraverso un mezzo la sua ampiezza diminuisce come risultato dell'assorbimento, un fenomeno per cui il mezzo trasforma parte dell'energia acustica dell'onda in calore. Nell'acqua di mare l'assorbimento è considerevole a causa della viscosità dell'acqua e della salinità. Un suono a bassa frequenza subisce un assorbimento minore perché porta con sé meno energia e quindi viene propagato per distanze elevate (<https://dosits.org/>).

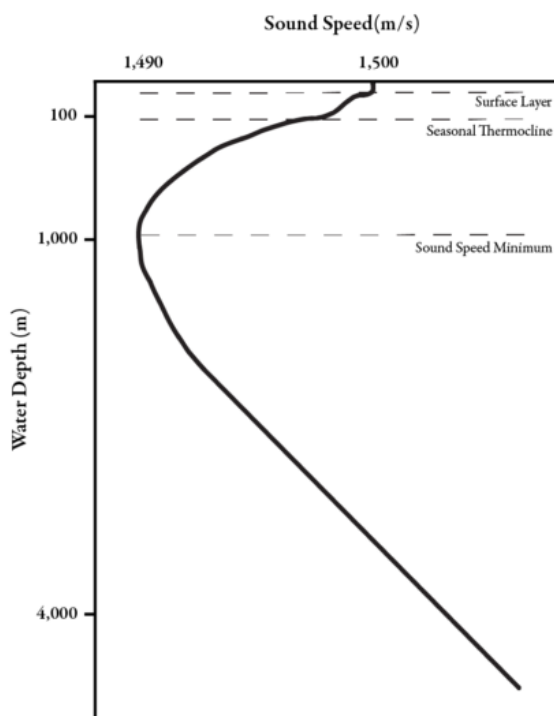


Figura 1. Tipico profilo verticale della velocità del suono in oceano aperto, media latitudine. La temperatura elevata in superficie (dovuta al riscaldamento del sole) comporta una velocità di 1500 m/s. Con l'aumentare della profondità la temperatura si abbassa e così anche la velocità. A livello del termoclino permanente (circa 1000 m) si colloca la velocità minima del suono. Sotto al termoclino la temperatura raggiunge un valore costante, quindi la pressione ha l'effetto preponderante sulla velocità del suono, che aumenta con la profondità. La salinità in oceano aperto ha un contributo trascurabile (da <https://dosits.org/>).

2.5. Utilizzo del suono da parte degli organismi marini

Il suono tra gli organismi marini è un elemento essenziale, viene utilizzato non solo per ottenere informazioni sull'ambiente circostante, ma anche per svolgere diverse funzioni vitali. Attraverso la capacità di discriminare i suoni e riconoscere così i membri della propria specie il suono è utile per la comunicazione e il comportamento riproduttivo. La capacità di determinare la direzione e la provenienza di un suono, invece, sostiene la ricerca del cibo o delle prede e la difesa dai predatori. Altri utilizzi del suono sono nell'ambito della migrazione e della selezione dell'habitat. (Popper and Hawkins, 2019).

I pesci percepiscono suoni in un range di frequenze che va da 30 Hz a 1000 Hz, i più specializzati raggiungono anche i 3000/5000 Hz e in alcuni casi vengono percepiti ultrasuoni e infrasuoni (Slabbekoorn et al., 2010) (Fig.2). Molti pesci possono sentire i suoni, ma non produrli; si è a conoscenza di almeno 800 specie appartenenti a 100 famiglie di pesci che possono produrre suoni, a frequenze minori di 4000 Hz, principalmente minori di 1000 Hz. (Popper and Hawkins, 2019).

I mammiferi marini usano il suono sia attivamente sia passivamente per comunicare e percepire il loro habitat, coprendo frequenze da pochi hertz a più di 100 kHz, a seconda della specie. I cetacei odontoceti, specialmente, hanno evoluto la capacità di utilizzare il suono in tutti i comportamenti biologicamente importanti, tra cui la socializzazione, i viaggi, la caccia, l'allevamento e le cure parentali (Erbe et al., 2018).

2.6. Percezione del suono

Gli organismi marini percepiscono le due componenti del suono: il movimento delle particelle e la pressione. Gli invertebrati percepiscono in prevalenza il movimento delle particelle, mentre i pesci possono percepire entrambe le componenti, anche contemporaneamente. L'udito dei pesci varia in base alla specie, si può attuare una categorizzazione in base alla presenza di organi più o meno specializzati per la percezione dei suoni (Di Franco et al., 2020). La vescica natatoria è un organo cavo ripieno di gas sensibile alla pressione dei suoni, che può essere connessa meccanicamente all'orecchio interno tramite una serie di ossicini, gli ossicini di Weber. È un organo fondamentale per la percezione dei suoni nei pesci che la possiedono, ma livelli sonori eccessivi possono provocare la sua rottura e quindi il danneggiamento di tessuti interni adiacenti (Di Franco et al., 2020; Slabbekoorn et al., 2010). I pesci hanno due sistemi uditivi: l'orecchio interno e la linea laterale. Entrambi i sistemi percepiscono il moto delle particelle, grazie alla presenza di cellule sensoriali ciliate che ricevono il segnale e lo trasmettono come impulso nervoso al cervello. La linea laterale decorre sui lati del corpo fino alla testa e percepisce principalmente il moto delle particelle generato da un suono a bassa frequenza, a breve distanza. L'orecchio interno, invece, può percepire anche suoni a frequenza elevata provenienti da grandi distanze attraverso la percezione della componente della pressione (Slabbekoorn et al., 2010). La componente del moto delle particelle è la più importante in tutti gli organismi marini. È utilizzata per determinare la direzione del suono e la

posizione della fonte, anche nei pesci sensibili alla pressione (Popper and Hawkins, 2019).

Gli odontoceti hanno sviluppato un sofisticato sistema biosonar sottomarino in grado di fornire informazioni nell'oscurità ambientale, penetrare dentro o attraverso alcuni oggetti e andare oltre il normale raggio visivo. Questo sistema biosonar può essere suddiviso in tre parti: apparati di produzione del suono, apparato di ricezione del suono e componenti del sistema nervoso centrale che integrano i sottosistemi e ne interpretano i risultati. Si ritiene che il suono venga recepito a livello del capo dell'odontoceto attraverso una varietà di percorsi nei tessuti molli che includono porzioni laterali della mascella e della gola e corpi specializzati di "grasso acustico" che trasportano il suono (Ary et al., 2016).

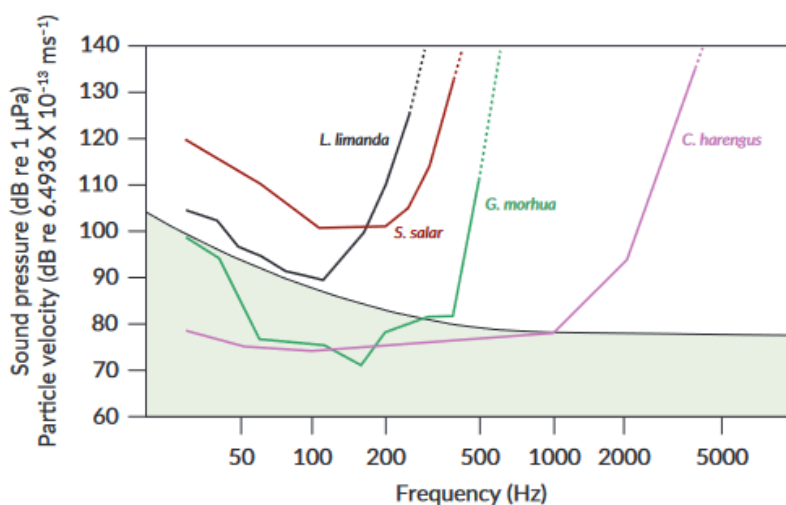


Figura 2. Le soglie uditive dei pesci sono conosciute in dettaglio solo per poche specie. Ecco alcuni esempi di soglie uditive ottenute in mare aperto tramite stimoli a diverse frequenze. Minore è una soglia uditiva, più è sensibile il pesce a quel suono. *C. harengus* ha il migliore udito. *C. harengus* e *G. morhua* sono sensibili sia alla pressione sia al movimento delle particelle, mentre *L. limanda* e *S. salar* sono sensibili solo al movimento delle particelle (è stata utilizzata una velocità del moto delle particelle di riferimento) (Fonte: Hawkins 2018)

3. L'inquinamento acustico marino

3.1. Il soundscape marino

Il mare è un ambiente tutt'altro che silenzioso. Il *soundscape* marino, detto anche paesaggio sonoro marino, comprende l'insieme di tutte le fonti di rumore presenti nel mare rispetto alla posizione di un organismo che le riceve (o di uno strumento registratore) (Miksis-Olds et al., n.d.). Tali fonti si suddividono in fonti naturali e fonti antropogeniche (Fig.3). I *soundscapes* sottomarini sono dinamici, variano nello spazio e nel tempo e tra i vari habitat; gli organismi marini utilizzano i suoni per ricavare informazioni sull'ambiente che li circonda (Chahouri et al., 2022).

Le fonti naturali si suddividono in due categorie: abiotiche e biotiche. Le fonti abiotiche derivano prevalentemente da moto ondoso generato dal vento, terremoti

sottomarini, precipitazioni e tempeste e agitazione dell'acqua marina (Hildebrand, 2009); ma vanno ricordati anche eruzioni vulcaniche sottomarine e movimento dei ghiacci polari (Slabbekoorn et al., 2010). Tutte queste componenti abiotiche sono importanti per gli organismi marini in quanto permettono loro un controllo pressoché costante sull'ambiente circostante (Chahouri et al., 2022).

Le fonti biotiche derivano invece dalla generazione di suoni bioacustici da parte della fauna marina come pesci, invertebrati e mammiferi marini. Questo tipo di suono è essenziale per la comunicazione, l'orientamento, la predazione l'accoppiamento e l'ecolocazione negli organismi marini ed è continuo. Nel *soundscape* marino esiste un loop a feedback: la componente biologica influenza il paesaggio sonoro marino e a sua volta il paesaggio sonoro marino influenza la componente biologica del suono (Miksis-Olds et al., n.d.).

Le fonti antropogeniche sono generate da varie attività tra cui il trasporto commerciale, la produzione di petrolio e gas, le operazioni navali tra cui anche quelle militari, la pesca (come per esempio l'utilizzo di deterrenti acustici e di sonar), la ricerca sui fondali (tramite sonar e fucili ad aria compressa) e altre attività, comprese quelle di costruzione di vari tipi di impianti più o meno lontani dalle coste (Hildebrand, 2009; Slabbekoorn et al., 2010). Le fonti di rumore antropogenico possono essere suddivise anche dal punto di vista del grado di intenzionalità con cui il suono è stato prodotto; esistono quindi fonti antropogeniche non intenzionali, emesse soprattutto dal trasporto navale e dalla pesca e fonti antropogeniche intenzionali, utilizzate soprattutto come strumento di misurazione e di ricerca (Slabbekoorn et al., 2010).

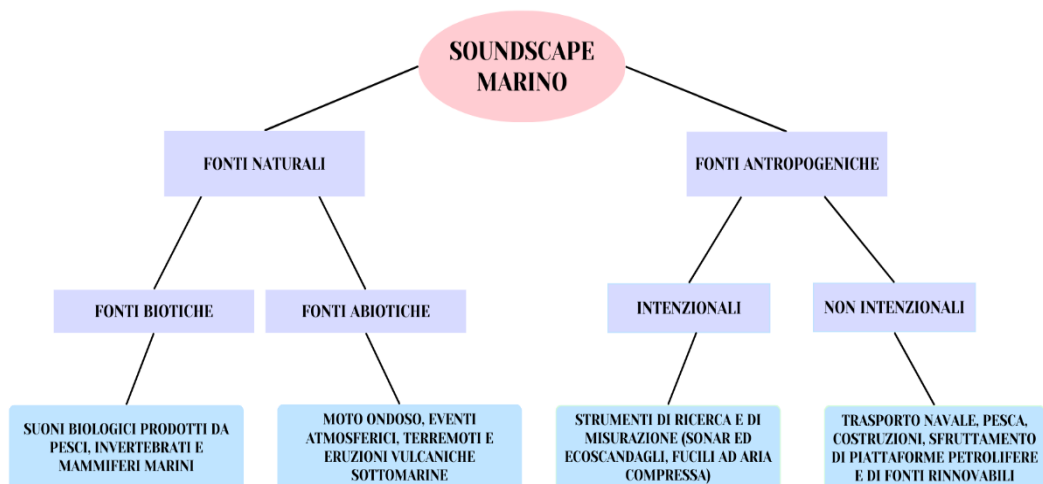


Figura 3. Rappresentazione concettuale del *soundscape* marino. Suddivisione delle fonti sonore in fonti naturali e antropogeniche e seguente categorizzazione.

3.2. L'aumento del rumore antropogenico in mare

Il rumore generato in mare dalle attività antropiche è aumentato notevolmente dalla prima rivoluzione industriale e ancora di più dalla Seconda guerra mondiale. Ad oggi si pensa che l'oceano sia fino a 10 volte più rumoroso rispetto al periodo preindustriale (Hildebrand, 2009). Per inquinamento acustico si intende qualsiasi fonte di suono antropico presente nell'ambiente marino in grado di produrre effetti deleteri sulla vita marina (MSDF; European Union 2008).

3.3. Classificazione delle fonti di rumore antropogenico

Esistono due tipi principali di rumore antropogenico: acuto e cronico. Il rumore acuto è caratterizzato da suoni impulsivi, di breve durata e ad alta intensità, spesso emessi ripetutamente e su frequenze da pochi hertz a centinaia di migliaia di hertz, come nel caso dei sonar. Il rumore cronico è caratterizzato da intensità inferiore, ma durata maggiore, con frequenze generalmente inferiori a 1000 Hz (Di Franco et al., 2020). Il rumore cronico è quello maggiormente diffuso ed è considerato come la principale causa di aumento del rumore di fondo oceanico (Hildebrand, 2009).

Il rumore acuto è correlato principalmente a esplosioni subacquee, all'esplorazione sismica e a sonar, mentre il rumore cronico è prevalentemente generato da navi commerciali, imbarcazioni ricreative e navi cargo. Le fonti antropogeniche possono emettere rumore in modo intenzionale oppure come sottoprodotto non intenzionale di altre attività. Tra quelle fonti che producono suono intenzionalmente ci sono esplosioni, esplorazione sismica, sonar e dispositivi di deterrenza acustica. Le fonti in cui il suono è un sottoprodotto involontario includono le attività di trasporto e industriali (Hildebrand, 2009). Tutte queste fonti sono in aumento, specialmente in ambiente costiero ed entro la piattaforma continentale, habitat importantissimi per gli organismi marini (Hildebrand, 2009). L'incremento delle attività antropogeniche ha condotto a un aumento del livello del rumore ambientale marino, la cui conseguenza è il mascheramento dei suoni biologici, con la progressiva crescita dell'inquinamento acustico marino (Slabbekoorn et al., 2010). In (Fig.4) sono illustrati i range uditivi di alcuni organismi marini e i range di frequenze emessi dalle fonti antropiche, con le loro sovrapposizioni.

3.3.1. Fonti di rumore acuto

Gli esplosivi sono utilizzati per diversi scopi, tra cui la rimozione di strutture e il rilevamento sismico. Hanno un livello sonoro elevato all'origine (tra i 280 e i 300 dB re 1 μ Pa) e creano un impulso di pressione rapido. Il suono si propaga in tutte le direzioni ugualmente (Hildebrand, 2009).

I cannoni ad aria compressa o *air-guns* sono utilizzati nell'esplorazione petrolifera. Questi strumenti vengono trainati da navi e ogni 10-20 secondi rilasciano un volume d'aria ad alta pressione, creando un'onda sonora. Spesso

vengono utilizzati in schiere per produrre alte intensità acustiche, che raggiungono i 260 dB re 1 μ Pa, con frequenze da 5 a 300 Hz (Hildebrand, 2009).

I sonar possono essere utilizzati per scopo militare, commerciale o di ricerca. I sonar con ecoscandaglio civili e commerciali sono utilizzati per il rilevamento, la localizzazione e la classificazione di vari bersagli sottomarini (come fondali oceanici, plancton, pesci), con frequenze da 12.000 Hz in acque profonde a 100.000 Hz in acque basse, con intensità attorno ai 230 dB re 1 μ Pa.

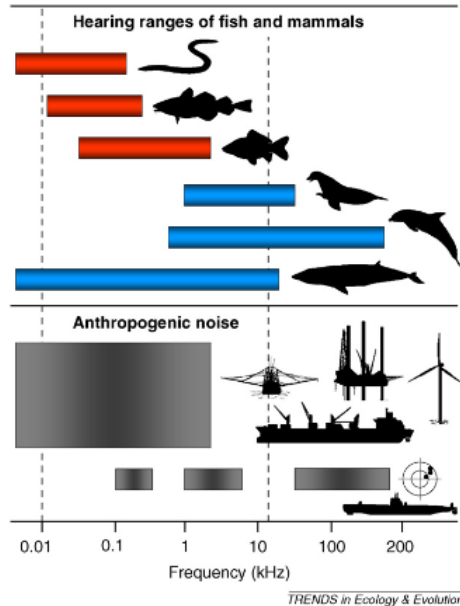


Figura 4. Range uditivi di alcune specie di pesci (anguilla europea, merluzzo atlantico e pesce rosso) e di mammiferi marini (leone marino californiano *Zalophus californianus*, delfino tursiope *Tursiops truncatus*, e balenottera comune *Balaenoptera physalus*), accompagnati dai range di frequenze occupati dai rumori antropogenici. Fonte: Slabbekoorn et al., 2010

I deterrenti acustici per tenere lontani i mammiferi marini da attrezzature da pesca e dagli impianti di acquacoltura sono sorgenti acustiche a frequenze medio-alte con bassi livelli sonori. Gli impulsi della durata di millisecondi possiedono frequenze da 5 a 160.000 Hz e livelli sonori attorno a 150 dB re 1 μ Pa (Hildebrand, 2009). Nel mar Mediterraneo le risorse ittiche sono molto sfruttate, di conseguenza i sonar per ispezioni idroacustiche e i deterrenti acustici sono una minaccia considerevole per la fauna marina (Di Franco et al., 2020).

3.3.2. Fonti di rumore cronico

Le principali fonti di rumore cronico sono le navi commerciali; precisamente le cause del rumore sono i loro sistemi di propulsione (frequenze minori di 200 Hz), con l'effetto di cavitazione dato dalle pale delle eliche. Ulteriori fonti di rumore della nave sono macchinari che producono rumori costanti su frequenze da 10 a 50 Hz. In media nelle navi più grandi i livelli sonori sono più elevati e l'aumento della velocità comporta un aumento del rumore prodotto. Il mar Mediterraneo è attraversato da numerose rotte commerciali che portano a un consistente traffico marittimo (Fig.5) (Di Franco et al., 2020).

Il rumore proveniente dalle attività industriali stazionarie, come le trivellazioni petrolifere, l'infissione di pali da costruzione e i parchi eolici offshore, è un rumore continuo a bassa e media frequenza con livelli sonori di sorgente spesso moderati, la cui propagazione lontano dal sito di impatto varia a seconda del tipo di fondale (Hildebrand, 2009). Le aree costiere del mar Mediterraneo sono

altamente urbanizzate e ricche di attività antropiche, di conseguenza l'inquinamento acustico marino è una minaccia reale (Di Franco et al., 2020).

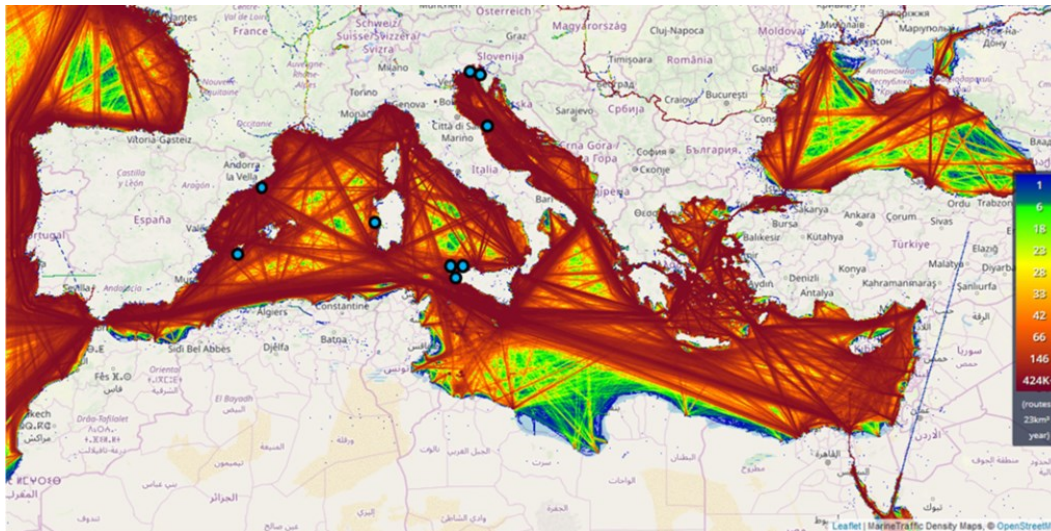


Figura 5. Mappa che rappresenta le principali rotte di traffico marittimo nel Mar Mediterraneo e la distribuzione degli studi sul campo (pallini blu) (MarineTraffic – Global Ship Tracking Intelligence; www.marinetraffic.com).

4. Effetti dell'inquinamento acustico sulla fauna marina

Gli impatti dell'inquinamento acustico sugli animali marini, tra cui invertebrati, pesci e cetacei, si registrano a livello anatomico, fisiologico e comportamentale. Nell'individuo, a livello fisico e fisiologico, si possono riscontrare danni all'udito, come lo spostamento transitorio o permanente della soglia uditiva, danni a tessuti sensoriali o ad altri tessuti, cambiamenti nei livelli ormonali e aumento di risposte allo stress, aumento della mortalità. Il mascheramento delle informazioni acustiche scambiate dagli animali marini ha conseguenze sulle interazioni di predazione, sulla formazione di aggregazioni e sui comportamenti riproduttivi, come il corteggiamento e la scelta del partner. La gravità e il grado di permanenza degli effetti negativi sono variabili, dipendono dalla distanza dell'individuo dalla sorgente sonora, dall'intensità del suono e dalla durata dell'esposizione al suono (Chahouri et al., 2022; Slabbekoorn et al., 2010).

4.1. Impatto sui pesci

Sui pesci caratteristici del Mar Mediterraneo sono stati condotti diversi studi ed esperimenti, prevalentemente in cattività con condizioni ambientali controllate, la cui maggior parte riguarda due specie in particolare, *Dicentrarchus labrax* e *Sparus aurata*, e l'effetto del rumore dato da traffico navale e costruzioni, come l'impianto di pali sul fondale.

4.1.1. *Dicentrarchus labrax*

La specie principalmente studiata e utilizzata come modello è il branzino (*Dicentrarchus labrax*), un pesce con una sensibilità uditiva acuta a frequenze

sonore basse, tra 100 e 1000 Hz, che coincidono anche con molti suoni antropogenici (Spiga et al., 2017). Il branzino è dotato di vescica natatoria e di linea laterale, quindi, è in grado di percepire sia il cambiamento di pressione sia il moto delle particelle d'acqua dovuti a un suono. Lo studio di Buscaino et al. (2010) dimostra come la motilità del branzino e i suoi parametri sanguigni vengono influenzati dal rumore del traffico navale (un rumore cronico a basse frequenze con un livello sonoro massimo di 150 dB re1 μ Pa). La motilità dei branzini esposti al rumore aumenta, mentre la concentrazione di lattato nel sangue e l'ematocrito sono più elevati rispetto al gruppo di controllo. Questi risultati indicano un aumento nell'attività muscolare e un'intensa attività metabolica con il coinvolgimento delle fibre muscolari bianche anaerobiche, come conseguenza del disturbo derivante dalla stimolazione sonora. I pesci hanno diversi tipi di fibre muscolari con differenti proprietà, tra cui due tipi di fibre che sono importanti per la motilità: le fibre rosse ossidative (aerobiche) per il nuoto di routine poco potente e costante e le fibre bianche glicolitiche (anaerobiche) che vengono attivate per uno sprint o un'accelerazione. C'è correlazione significativa tra i valori del movimento e i parametri sanguigni ottenuti; infatti, le fibre bianche ricavano energia dalle riserve di glicogeno, ma con il rapido consumo del glicogeno avviene la produzione e l'accumulo nel sangue del lattato. Inoltre, l'aumento dell'attività metabolica richiede una maggiore quantità di ossigeno che si risolve con l'aumento del tasso respiratorio e la maggiore produzione di globuli rossi, ciò porta all'aumento della componente corpuscolare del sangue e quindi dell'ematocrito. La presenza di rumore antropogenico costante a bassa frequenza dovuto al traffico navale causa dunque l'aumento dell'attività muscolare nel branzino, portando come conseguenza al consumo di molta energia che viene sottratta a importanti funzioni vitali, con la compromissione di attività biologiche fondamentali come il foraggiamento, la riproduzione e la deposizione delle uova. Il risultato finale, anche se non letale, può essere una diminuzione generale della fitness.

Nello studio di Spiga et al. (2017) vengono analizzati, invece, gli effetti del rumore a impulsi ripetuti prodotto dall'infissione di pali (*pile driving*). Tale rumore genera una risposta di spavento, una risposta di riflesso involontaria data dall'attivazione dei neuroni di Mauthner. Probabilmente il suono prodotto dall'infissione di pali genera questa risposta in quanto è caratterizzato da un aumento rapido dei livelli di pressione sonora (es. +164 dB re1 μ Pa in 0,04 secondi). Probabilmente la risposta di sorpresa è attivata in questa specie solo da rumori con un livello di pressione sonora sufficientemente elevato. Si osserva inoltre un aumento nel tasso di ventilazione determinato tramite la frequenza di apertura dell'opercolo, che indica uno stato di stress quando il pesce è esposto a una sorgente di suono antropogenica. Un'altra conseguenza riscontrata è che il rumore influenza la componente cinematica della risposta anti-predatoria (percorso e velocità del nuoto). Normalmente i pesci alla vista di un predatore si immobilizzano, come comportamento anti-predatorio; quindi, riducono la velocità del nuoto e riducono la distanza percorsa. I pesci esposti ai suoni antropogenici, invece, non adottano questo comportamento, ma aumentano i cambi di direzione nel nuoto, segno di comportamento di allerta, senza tuttavia muoversi verso una

zona sicura. I livelli di allerta sono quindi elevati, ma l'esplorazione è ridotta probabilmente per via della distrazione causata dal rumore. L'attività anti-predatoria risulta quindi compromessa, inoltre l'aumento del cambio di direzione nel nuoto può risultare energeticamente costoso e portare svantaggio ad altre attività vitali come la migrazione o lo spostamento in gruppo. I risultati, quindi, mostrano che un rumore elevato ha il potenziale non solo di indurre una reazione di spavento, ma anche di indurre una maggiore vigilanza verso un predatore e una risposta anti-predatoria alterata, probabilmente come conseguenza di una maggiore ansia.

Herbert-Read et al. (2017) studiano le conseguenze sullo *shoaling* di *Dicentrarchus labrax*. Il comportamento di aggregazione o *shoaling* consiste nella formazione di banchi in cui i pesci si muovono in modo coordinato nella direzione e nella velocità. L'informazione riguardo alla posizione e ai movimenti del vicino è acquisita da ciascun pesce tramite la linea laterale, oltre che dai sistemi visivi. Lo *shoaling* con alta coesione conferisce benefici anti-predatori, inoltre, lo *shoaling* consente l'accesso degli individui del gruppo all'informazione sociale su minacce percepite o risorse trovate, che può essere acquisita copiando il movimento degli altri pesci. I rumori dati da *pile driving* nel fondale marino influenzano l'organizzazione spaziale e direzionale e la coordinazione dei banchi di pesci. Il rumore causa la diminuzione della coesione del banco, infatti, i pesci esposti al suono aumentano la distanza tra loro e aumentano la loro velocità di nuoto, mentre la reazione che ci si aspetta da un banco in risposta a una minaccia percepita è l'aumento della coesione e la diminuzione della velocità dei movimenti, con l'assunzione di uno stato di allerta. Inoltre, la coordinazione nella velocità e nella direzione tra pesci vicini diminuisce, all'opposto di quello che dovrebbe accadere. Poiché la coordinazione dei movimenti tra gli individui si considera modulata prevalentemente tramite la linea laterale e l'occhio, potrebbe essere in corso un effetto di mascheramento dell'informazione uditiva da parte del rumore antropogenico e ciò potrebbe spiegare la diminuzione della coordinazione tra gli individui nel gruppo. Si aggiungono inoltre anche gli effetti negativi di stress e distrazione che possono verificarsi alla presenza di un rumore addizionale rispetto a quello dello sfondo naturale. Tutto ciò porta conseguenze negative alla vita di gruppo e alla sopravvivenza dei singoli individui, perché la formazione di banchi è funzionale non solo alla difesa dai predatori, ma anche al foraggiamento e alla riproduzione.

4.1.2. *Sparus aurata*

Sparus aurata, l'orata, è un pesce molto comune nel mar Mediterraneo di grande importanza dal punto di vista commerciale, che vive in acque basse ed è dotato di linea laterale e vescica natatoria. Nello studio di Celi et al. (2016) è stato osservato che il rumore può influenzare i tipici biomarcatori dello stress a livello ematologico, inclusi cortisolo, glucosio, lattato ed ematocrito. Le orate oggetto di studio sono state esposte a una sequenza di rumori prodotti da imbarcazioni, registrati e poi riprodotti durante l'esperimento, e sono stati quindi analizzati i livelli di ACTH, cortisolo, glucosio, lattato, ematocrito, Hsp70, proteine totali,

colesterolo, trigliceridi e osmolarità. Il livello massimo di pressione sonora nella banda di frequenza registrata di 0,13 kHz era 128 dB re $1\mu\text{Pa}$. In seguito all'esposizione per 10 giorni al rumore si riscontra una risposta acuta di stress nei pesci, con cambiamenti biochimici. La risposta di stress è determinata dalla gravità e dalla durata dello stimolo e dalla salute dell'individuo. Ci sono tre livelli di risposta allo stress: primaria, secondaria e terziaria. Quella primaria è una risposta a livello neuroendocrino e consiste nel rilascio nel circolo sanguigno di catecolamine e corticosteroidi, mentre la risposta secondaria è attivata da questi ormoni e consiste nel cambiamento di fattori biochimici, ematologici e immunologici. Quella terziaria si estende oltre il livello cellulare a tutto l'animale, inibisce la risposta immunitaria, la riproduzione, la crescita e la tolleranza ad altri agenti stressanti. Questa ricerca conferma le risposte primaria e secondaria di stress; dopo 10 giorni di esposizione al rumore gli esemplari mostrano un aumento in ACTH e cortisolo e alterazione del metabolismo (data dal cortisolo) con variazioni dei livelli di glucosio, lattato, trigliceridi e colesterolo. Il rumore antropogenico, quindi, provoca stress con cambiamenti biochimici e fisiologici e l'esposizione prolungata allo stress può compromettere altri aspetti come il tasso di riproduzione e di crescita. Gli effetti, inoltre, si possono avere non solo sugli adulti, ma anche sui giovanili e sugli stadi larvali con conseguenze sulle dinamiche di popolazione.

4.2. Impatto sugli invertebrati

Molte specie di invertebrati occupano nell'ecosistema o nella catena trofica ruoli significativi, alcune sono specie di consumatori primari, alcune di predatori, altre contribuiscono nella costruzione dell'habitat, come alcuni molluschi bivalvi. Molte specie di invertebrati inoltre sono importanti anche dal punto di vista commerciale. Capire le conseguenze dell'inquinamento acustico marino su queste specie è fondamentale per studiare e adottare misure di gestione e conservazione.

4.2.1. *Mytilus spp.*

I mitili sono organismi diffusi a livello costiero in tutti i mari, incluso il Mediterraneo, e rivestono una grande importanza commerciale ed ecologica. Si insediano creando formazioni biogeniche, su coste sia riparate sia esposte alle onde, e rappresentano una comune componente del *biofouling*. I mitili sono sensibili alle vibrazioni sonore nella frequenza dai 5 ai 410 Hz (Roberts et al., 2015) e possono percepire il moto delle particelle e la vibrazione del substrato, in quanto organismi bentonici. A causa della mancanza di una specifica struttura simile a un orecchio, è probabile che due sistemi di recettori siano coinvolti nella rilevazione delle vibrazioni nei molluschi non cefalopodi: il sistema interno (statocisti) e il sistema esterno (recettori superficiali come i meccanorecettori nello strato epidermico) (Roberts et al., 2015). Lo studio di Spiga et al. (2016) investiga gli effetti del rumore dato dall'infissione di pali sul tasso di filtrazione

dei mitili. Il tasso di filtrazione è il tasso con cui i filtratori rimuovono, alimentandosi, le particelle sospese in acqua ed è un indicatore dell'attività di nutrizione dei mitili. Attraverso la filtrazione questi molluschi rimuovono il particolato dalla colonna d'acqua migliorando la qualità dell'acqua e trasportando nutrienti essenziali al benthos (Wale et al., 2019). Spiga et al. (2016) riportano che un aumento del tasso di filtrazione può essere connesso all'aumento della domanda metabolica, per esempio in presenza di condizioni stressanti. Questo studio dimostra che i mitili aumentano il loro tasso di filtrazione in seguito all'esposizione al rumore dell'infissione di pali, indicando che il rumore impulsivo influenza l'alimentazione dei bivalvi. I livelli di pressione sonora, la velocità delle particelle d'acqua e la vibrazione del substrato sono le componenti del suono che possono influire sulla risposta dei mitili, ma sembra che la componente della vibrazione del substrato sia quella con il maggior contributo. L'aumento del tasso di filtrazione osservato da Spiga et al. (2016) può essere dovuto a un aumento nel metabolismo come conseguenza allo stress durante l'esposizione al rumore. Tuttavia, altri autori hanno rilevato una diversa risposta riguardante il grado di apertura delle valve: i mitili esposti al rumore impulsivo attuano una chiusura delle valve durante l'esposizione al suono e ciò può risultare costoso dal punto di vista energetico (comporta infatti riduzione della ventilazione e del pompaggio di acqua, quindi della filtrazione, con un calo anche della frequenza respiratoria e cardiaca e una ridotta capacità di escrezione). Il bilancio energetico cambia sulla base di alimentazione, respirazione ed escrezione; se la loro entità subisce variazioni, è probabile che anche il potenziale di crescita sia influenzato dai cambiamenti del movimento valvare (Roberts et al., 2015). Nello studio di Wale et al. (2019) i mitili vengono esposti per sei ore a rumore di traffico navale e dimostrano danneggiamento del DNA nelle cellule epiteliali della branchia e negli emociti. Una probabile causa del danneggiamento del DNA è un aumento di fenomeni ossidativi e la formazione di molecole pro-ossidanti come la malondialdeide, prodotto finale della perossidazione dei lipidi di membrana nella branchia. I mitili esposti al rumore consumano meno ossigeno rispetto a quelli non esposti e consumano meno microalghe, lo spazio tra le due valve, però, non resta chiuso come osservato nello studio precedente, ma aumenta significativamente in questi animali esposti al rumore cronico. Le cozze sembrano aver tentato di risparmiare energia riducendo così la richiesta di ossigeno attraverso il rilassamento dei muscoli adduttori, provocando l'apertura osservata delle valve. Tuttavia, l'attività di pompaggio dell'acqua è interrotta o fortemente ridotta, quindi anche l'apporto energetico per filtrazione viene limitato. Oltre agli effetti a livello dell'organismo, che possono influenzare la crescita, la sopravvivenza e il successo riproduttivo dei mitili, il calo osservato nel tasso di filtrazione delle alghe indica che il rumore può anche ridurre le prestazioni ecologiche dei mitili. Una riduzione della velocità di filtrazione complessiva

causata dal rumore avrebbe quindi importanti effetti riducendo il ruolo dei mitili nell'accoppiamento bentonico-pelagico.

4.2.2. Cefalopodi

Si conosce ancora poco sulla capacità di percezione del suono negli invertebrati, ma ci sono delle prove che suggeriscono che i cefalopodi possono essere sensibili a suoni a basse frequenze. Tutti i cefalopodi possiedono una statocisti nella regione cefalica. La statocisti è una struttura sensoriale sofisticata che permette all'animale di determinare la sua posizione e mantenere l'equilibrio nella colonna d'acqua. Le statocisti sono strutture sferoidali che contengono cellule sensoriali ciliate e includono due sistemi recettoriali: il sistema macula-statolite, che indica cambiamenti nella posizione in base alla gravità e all'accelerazione lineare e la cupola crista che determina l'accelerazione angolare (André et al., 2011; Solé et al., 2017). La statocisti recepisce suoni a bassa frequenza fino a 400 Hz, con un meccanismo connesso al movimento delle particelle d'acqua determinato dall'arrivo dell'onda sonora. Tale movimento si riverbera su tutto il corpo dell'animale e l'oscillazione viene trasmessa ai tessuti con la stessa ampiezza. La statocisti, quindi, sembra essere stimolata dagli spostamenti dell'intero corpo e quando il corpo dell'animale vibra gli statoliti si muovono piegando le cellule sensoriali ciliate; in questo modo lo statolite potrebbe fungere da recettore delle componenti cinetiche del suono. Nello studio di André et al. (2011) sono state studiate 4 specie di cefalopodi (*Loligo vulgaris*, *Sepia officinalis*, *Octopus vulgaris*, e *Illex coindetii*). Gli esemplari sono stati sottoposti a suoni impulsivi a basse frequenze con livelli massimi di 175 dB re 1μ Pa. Come conseguenza dell'esposizione al rumore tutte le specie presentano le stesse lesioni alla statocisti, che aumentano nella gravità all'aumentare del tempo di esposizione. Si verificano danni a livello della macula e sull'epitelio della crista: le ciglia sono piegate, flaccide, fuse o addirittura mancanti. Alcune cellule ciliate presentano rottura della membrana cellulare ed estrusione del materiale citoplasmatico. Le cellule vengono estromesse dall'epitelio sensoriale lasciando dei buchi (Fig. 5). I nervi afferenti al di sotto delle cellule sensoriali sono gonfi e mostrano degenerazione o danneggiamento dei mitocondri. Le lesioni più pronunciate si osservano dopo 96 ore di esposizione al suono. Questi risultati dimostrano che l'impatto del rumore (con intensità moderate) è acuto e il danneggiamento delle cellule ciliate immediato, con deformazione della componente ciliare e conseguente morte cellulare dopo giorni o settimane (mentre nei pesci e nei mammiferi marini un danno così drammatico si osserva solo dopo l'esposizione a un suono estremamente intenso). Anche i neuroni presentano gli effetti del trauma. Gli impatti osservati sugli organi statoacustici dei cefalopodi esposti al rumore suggeriscono il verificarsi di un processo eccitotossico dovuto a un eccesso di glutammato, che è stato identificato come neurotrasmettitore anche nei cefalopodi.

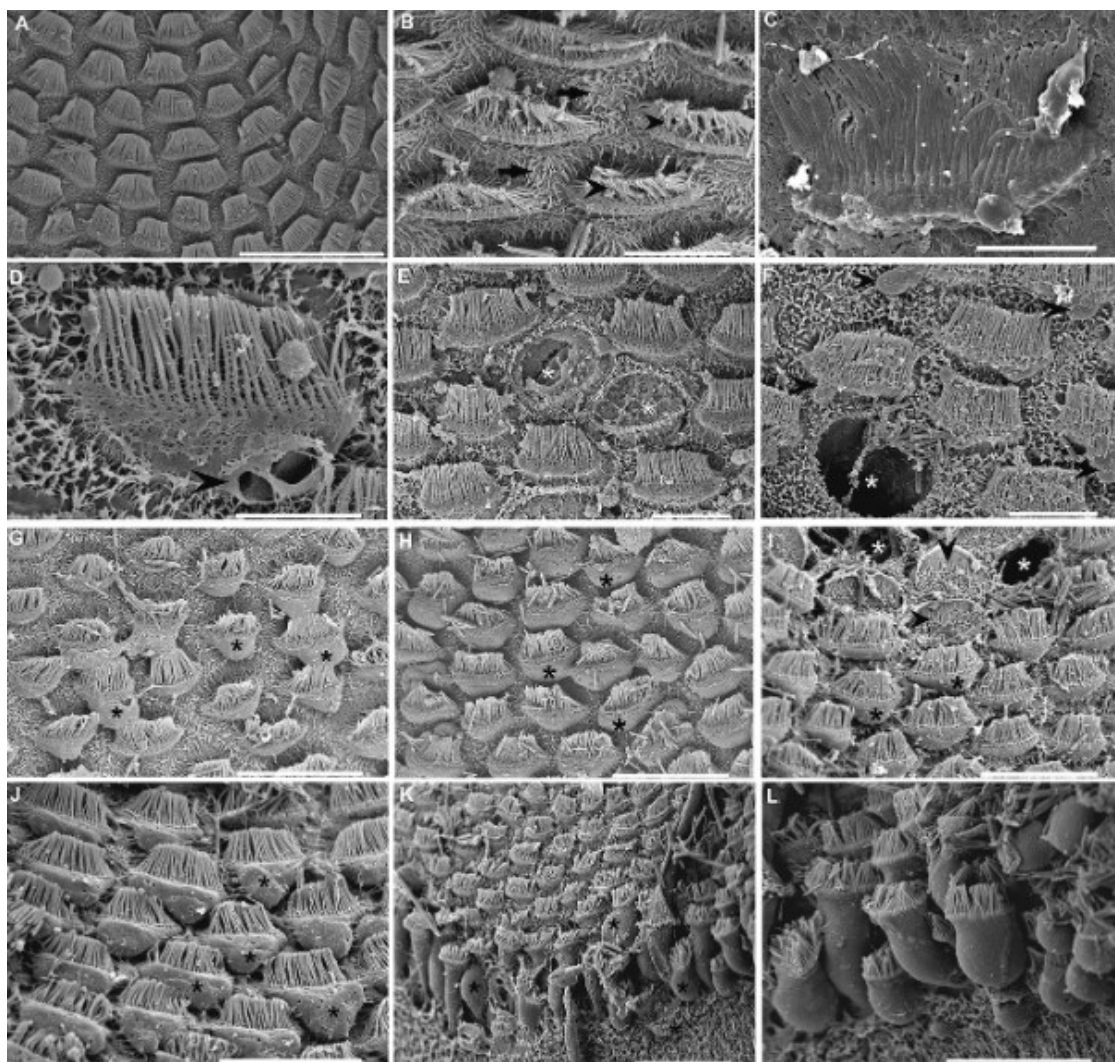


Figura 5. SEM. *S. officinalis macula statica princeps*. (A) animali di controllo. (B–H) immediatamente dopo l'esposizione al suono. (I–L) 48 h dopo l'esposizione al suono. (A) Sono visibili le disposizioni dei gruppi cinociliari delle cellule ciliate in linee regolari che seguono la forma dell'epitelio. (B) Le cellule ciliate presentano cinocilia piegate e flaccide (punta di freccia) e microvilli disorganizzati (freccia). (C) Una cellula ciliata presenta il suo fascio di cinocilia totalmente fuso. (D) Una cellula ciliata mostra fori sferici sulla base e rompe la membrana plasmatica (punta di freccia). (E) Alcune cellule ciliate hanno perso il fascio di cinocilia (asterisco bianco). (F) È visibile un foro sull'epitelio dovuto a un'estrusione di cellule ciliate (asterisco bianco). (G, H) Sono visibili i poli apicali delle cellule ciliate estruse sopra l'epitelio nella cavità statocistica (asterisco nero). In G sono fuse alcune cinocilia di diverse cellule ciliate. (I) Il polo apicale di alcune cellule ciliate viene estruso nella cavità statocistica (asterischi neri). Alcune cellule ciliate sono state completamente espulse lasciando dei buchi sull'epitelio sensoriale (asterischi bianchi). Segni di punte di freccia ad alcune cellule ciliate che hanno perso il fascio di cinocilia. (J) Un'ampia sezione di epitelio sensoriale presenta tutte le sue cellule ciliate estruse sopra l'epitelio (asterischi neri). (K) Quasi tutto il corpo cellulare delle cellule ciliate viene espulso da un'ampia regione dell'epitelio sensoriale (asterischi neri). (L) Dettaglio da (K) mostra il corpo cellulare delle cellule ciliate estruse. Barre della scala: (A, K) = 30 μm . (B, E, F) = 10 micron. (C, D) = 5 micron. (G–J, L) = 20 μm . Fonte: (Solé et al. 2017)

La presenza di danni alla statocisti in seguito all'esposizione al rumore dimostra che quest'organo è coinvolto nella percezione del suono (André et al., 2011). Il rumore influenza gli animali a livello fisiologico e patologico, alterando i

meccanismi di percezione del suono e compromettendo il loro comportamento, nonché la capacità di sopravvivenza (Solé et al., 2017).

4.2.3. *Palaemon serratus*

Il gambero comune *Palaemon serratus* è una specie sublitorale con ampia distribuzione nel Mar Mediterraneo, che gioca un ruolo importante nella rete trofica marina. È un crostaceo decapode con capacità di percepire la componente di cinetica del suono. (Lovell et al., 2005). Il gambero possiede meccanismi recettoriali specializzati, in particolare un paio di statocisti localizzate nel segmento basale di ciascuna antennula oppure posteriormente all'interno degli uropodi, dell'addome o del telson. Le cellule sensoriali possono essere stimolate da disturbi meccanici come l'accelerazione, la velocità e il flusso idrodinamico. È stata dimostrata la capacità del gambero di percepire i suoni con frequenze da 100 a 3000 Hz (le stesse frequenze del rumore prodotto dalle navi) (Lovell et al., 2005). Lo studio di Filiciotto et al. (2016) testa gli effetti comportamentali e biochimici degli stimoli acustici provenienti da imbarcazioni a motore sul gambero comune, che ha un importante ruolo non solo ecologico ma anche commerciale. Il rumore dato dalle imbarcazioni provoca cambiamenti nel comportamento; infatti, i gamberi esposti al rumore passano molto più tempo fuori dai ripari, sono tuttavia meno mobili, e realizzano un numero significativamente minore di incontri tra individui in entrambi i sessi rispetto agli animali non esposti al rumore. All'interno del rifugio si sono registrati valori di pressione sonora superiori (nel range di frequenze da 100 a 3000 Hz) rispetto all'esterno e ciò sembra essere il motivo per cui i gamberi restano all'esterno del riparo durante l'esposizione al suono. La diminuzione della motilità ha implicazioni negative per la crescita, la riproduzione e la sopravvivenza nei crostacei decapodi in quanto comportamenti come la territorialità, il nomadismo, la migrazione e la fuga dai predatori dipendono dalla locomozione. Dal punto di vista biochimico si sono rilevati negli animali esposti al suono livelli elevati di proteine plasmatiche nell'emolinfa, a suggerire un peggioramento delle condizioni fisiche del decapode. Anche nel cervello si osservano livelli raddoppiati di proteine indicatrici di stress dopo l'esposizione al rumore. Queste proteine vengono chiamate HSP, *heat shock proteins*, e normalmente costituiscono il 5% del totale delle proteine intracellulari, ma in seguito a uno stress possono aumentare fino al 15%. Le HSP possono essere suddivise in quattro famiglie principali in base al loro peso molecolare, alle omologie e alle funzioni della sequenza degli amminoacidi: HSP 90, HSP 70, HSP 60 e le HSP più piccole. In particolare, è stata rilevata una significativa sovra regolazione dell'espressione di HSP 27 e HSP 70; probabilmente queste due HSP sono maggiormente coinvolte nella protezione cellulare dopo l'esposizione al suono. Ulteriori risultati mostrano come nel tessuto cerebrale dei gamberi esposti al rumore si verifichi la frammentazione del DNA per processi apoptotici. In conclusione, è stato

chiaramente osservato come l'esposizione a breve termine al rumore delle imbarcazioni modifichi alcuni modelli comportamentali e indici biochimici di stress in *P. serratus*.

4.2.4. Cnidari

I celenterati giocano un ruolo importante negli ecosistemi marini e nelle reti trofiche e sono importanti per il mantenimento della biodiversità; inoltre, i polipi possono formare le barriere coralline, habitat per numerosi organismi. Gli cnidari come le due meduse caratteristiche del Mediterraneo *Cotylorhiza tuberculata* e *Rhizostoma pulmo* possiedono un sistema sensoriale capace di percepire le vibrazioni dell'acqua associate al movimento delle prede e alle condizioni dell'ambiente. Ogni scifomedusa possiede delle statocisti nelle terminazioni dei rophalia presenti sul margine ventrale della cupola. I rophalia sono organi sensoriali che agiscono come gravicettori e permettono alla medusa di orientarsi e nuotare con una posizione verticale nell'acqua. In seguito all'esposizione al suono le statocisti di queste meduse risultano danneggiate in modo analogo alle statocisti dei cefalopodi, con le ciglia piegate o fuse e le cellule estromesse dall'epitelio. A differenza dei cefalopodi però, in cui le vibrazioni vengono trasmesse tramite tutto il corpo, nelle meduse le statocisti sono direttamente esposte al movimento dell'acqua quindi le vibrazioni stimolano direttamente lo statolite (Solé et al., 2016).

4.3. Impatto sui cetacei

L'udito nei cetacei è utilizzato per la comunicazione nei comportamenti sociali, per la navigazione e l'esplorazione, per l'ecolocalizzazione e la fuga dai predatori. Ogni specie di cetaceo ha un repertorio unico di vocalizzazioni, richiami, fischi e click. Le conseguenze dell'inquinamento acustico sui cetacei si riscontrano su diversi aspetti. Può avvenire un fenomeno di mascheramento dei suoni: il mascheramento è una condizione in cui la presenza di un suono aumenta la soglia uditiva per un secondo suono e quindi riduce l'abilità dell'animale di percepirlo (Bradley and Stern, 2008). Il rumore può influenzare comportamenti naturali dei cetacei, come l'interruzione del foraggiamento, il cambiamento nella frequenza e profondità di immersione, lo spostamento in aree più silenziose; il rumore può causare danni all'udito, transitori o permanenti, e quindi causare un aumento della soglia uditiva temporaneo (TTS, "*temporary threshold shift*") o un aumento della soglia uditiva permanente (PTS, "*permanent threshold shift*") fino a causare la sordità. I sonar e i suoni con grandi ampiezze possono anche causare danni fisici e fisiologici (danno ai tessuti o agli organi, sanguinamento) e all'estremo la morte, in modo diretto o indiretto tramite la risposta dell'animale. Lo stress continuo causato dall'inquinamento acustico può infine compromettere il sistema immunitario dei cetacei e aumentare così il rischio di infezioni. Tutte le conseguenze elencate portano, a lungo termine, a una minore sopravvivenza degli

individui, a cambiamenti nella distribuzione delle popolazioni e da ultimo a squilibri nella catena trofica marina (Bradley and Stern, 2008; Reckendorf et al., 2023)

4.3.1. *Tursiops truncatus*

Il tursiopo è un cetaceo odontoceto caratteristico del Mediterraneo appartenente alla famiglia dei Delfinidi, che vive in gruppi e caccia attraverso la tecnica dell'ecolocalizzazione. Questi delfini utilizzano i fischi per comunicare con i compagni, suoni della durata di circa un secondo emessi entro un range di frequenza tra i 3 e i 23 kHz con pattern ascendenti e discendenti, distintivi per ogni individuo. Una delle principali funzioni dei fischi è annunciare la posizione degli individui e questo può essere utile per facilitare la coesione del gruppo. Ci sono prove che evidenziano l'impatto negativo dell'inquinamento acustico prodotto dalle barche, soprattutto su aspetti comportamentali dei delfini: aumento della velocità del nuoto, immersioni più lunghe, gruppi più coesi (Buckstaff, 2004).

Il passaggio di una nave può influenzare il comportamento acustico dei tursiopi, i quali nel periodo di avvicinamento della nave aumentano la frequenza di produzione di fischi, mentre durante il passaggio dell'imbarcazione la diminuiscono e riducono le distanze per formare un gruppo coeso (Buckstaff, 2004). Il rumore emesso dalla barca è sulle frequenze da 0,5 a 12 kHz, quindi, si sovrappone parzialmente ai segnali di comunicazione dei tursiopi causando un fenomeno di mascheramento. I delfini aumentano la loro frequenza di fischi mentre una barca si avvicina per aumentare la probabilità di rilevazione dei richiami da parte degli altri individui prima che il rumore della barca li mascheri completamente. I delfini possono inoltre spostare l'intervallo di frequenza dei fischi a seconda dell'intervallo di frequenza del rumore dell'imbarcazione per evitare in parte il mascheramento. Durante il passaggio della barca i tursiopi interrompono i richiami. Questo insieme di reazioni potrebbe essere una tattica per assicurarsi che tutti gli individui ricevano il segnale e si avvicinino tra loro a formare un gruppo più coeso, che permette una migliore comunicazione in un ambiente più rumoroso (Buckstaff, 2004).

I tursiopi inoltre sono sensibili allo spostamento della soglia uditiva, causato da suoni impulsivi come i sonar. Variazioni transitorie della soglia uditiva (TTS) pari a 3-5 dB sono state osservate nei tursiopi per esposizioni a livelli di intensità sonora da 195 dB re 1 μ Pa a 203 dB re 1 μ Pa, con recupero completo dopo almeno 10 min dall'esposizione (Finneran et al., 2005).

4.3.2 *Ziphius cavirostris*

La balena dal becco di Cuvier (*Ziphius cavirostris*) è l'unica specie di zifio che si trova comunemente nel Mar Mediterraneo. Lo zifio è uno dei mammiferi marini meno conosciuti: trascorre poco tempo in superficie, solitamente si muove in

solitario e si trova quasi esclusivamente in acque profonde oltre la piattaforma continentale, spesso in associazione con i canyon e le ripide scarpate comuni in quelle zone. Tuttavia, dal 1960 sono stati segnalati spiaggiamenti di massa di zifi in tutto il mondo. Alcuni di questi spiaggiamenti sono stati inequivocabilmente concomitanti a manovre navali ed esercitazioni militari con l'uso di sonar attivi a media frequenza (2.6kHz – 8.2kHz), chiamati MFAS (*high-power medium frequency active sonar*) (D'Amico et al., 2009). Il modello generale degli spiaggiamenti associati a queste attività antropiche ha sollevato la preoccupazione

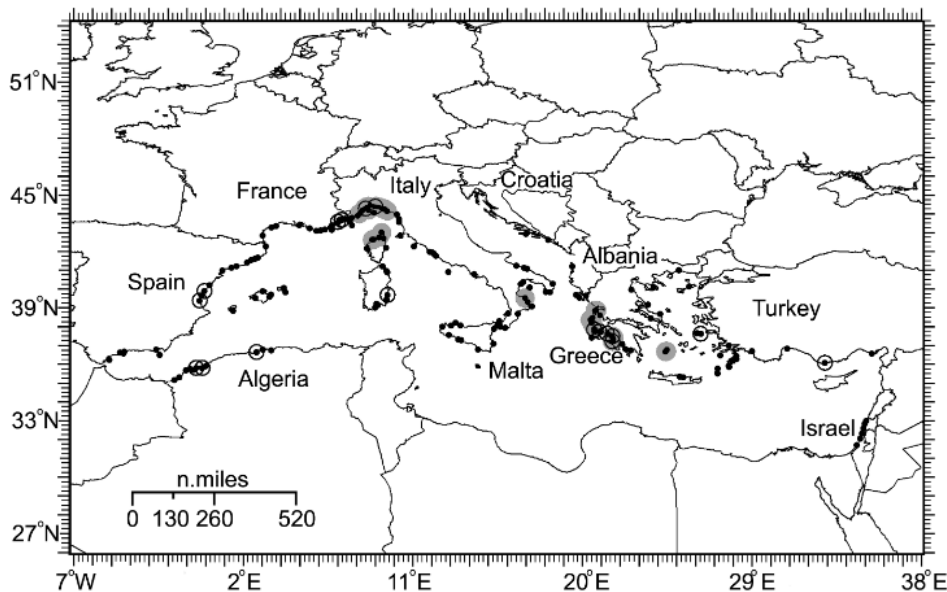


Figura 6. Spiaggiamenti registrati nel Mar Mediterraneo tra il 1803 e il 2003. Cerchietti grigi indicano spiaggiamenti di tre o più animali, I cerchi bianchi spiaggiamenti di due animali. Fonte: (Podesta et al. 2023)

che alcuni suoni possano provocare direttamente o indirettamente il ferimento o la morte degli zifi (Cox et al., 2006). Si riportano un totale di 232 spiaggiamenti nella zona del Mediterraneo, tra il 1803 e il 2003, in Albania, Algeria, Croazia, Egitto, Francia, Grecia, Israele, Italia, Malta, Spagna e Turchia. Tutti gli spiaggiamenti di massa di tre o più animali si sono verificati nel mar Ligure, nel mar Ionio e nel mar Egeo, tra il 1963 e il 1997, di cui solo uno su 12 può essere associato inequivocabilmente ad attività navali e uso di sonar (in quanto ben documentati), per gli altri le informazioni non sono sufficienti (Podesta et al., 2006) (Fig.6). Il primo caso riportato in Mediterraneo identificato come correlato sia nello spazio sia nel tempo alle emissioni di sonar durante esercitazioni navali militari condotte dalla NATO è stato lo spiaggiamento di massa di 14 esemplari di *Ziphius cavirostris* del maggio 1996 sulle coste della Grecia. Le navi rilasciarono onde sonore di bassa e media frequenza (600Hz - 3kHz) e intensità intorno a 230

dB re 1 μ Pa (Frantzis, 1998). Nel 2002 avvenne un altro spiaggiamento nelle isole Canarie, quasi contemporaneo a esercitazioni navali, e i cetacei morti o feriti vennero analizzati e studiati. L'esame macroscopico ha rivelato che gli animali presentavano gravi e diffuse congestioni ed emorragie, specialmente nel grasso acustico della mascella (Fig. 7), intorno alle orecchie, nel cervello e nei reni. Sono

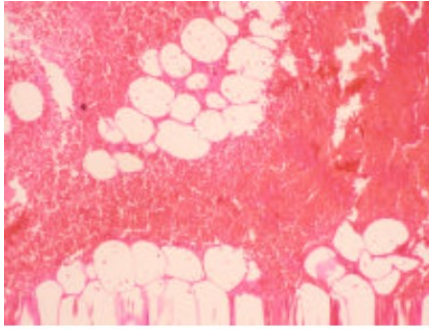


Figura 7. Emorragia grave nel grasso acustico di uno zifio spiaggiato (colorazione ematossilina-eosina). Fonte: (Fernandez 2004)

state osservate lesioni associate a bolle di gas nei vasi e nella sostanza bianca del cervello, e nei vasi di polmoni, reni e fegato; emboli grassi sono stati osservati nelle vene epidurali, nei sinusoidi epatici, nei linfonodi e nei polmoni (Evans and Miller, n.d.). I meccanismi che determinano queste lesioni e la morte dei cetacei non sono ben chiari. Lo spiaggiamento potrebbe avvenire in modo diretto in seguito alla risposta comportamentale di fuga dal suono verso acque meno profonde o in modo indiretto tramite risposte comportamentali che provocano i danni fisici elencati precedentemente. Queste risposte comportamentali includono cambiamenti nei profili di immersione che possono contribuire alla formazione di bolle, di emorragie e altre forme di trauma. I profili di immersione di *Ziphius cavirostris* sono caratterizzati da immersioni fino a 2 km di profondità, con durata di quasi un'ora e mezza e ascensioni lente. I normali schemi di immersione di questi animali possono portare ad un accumulo cronico di azoto nei tessuti; e l'accumulo cronico di azoto nei tessuti può rendere le balene dal becco particolarmente vulnerabili a patologie quando i loro schemi di immersione sono interrotti dall'esposizione a suoni intensi. Può essere presente anche un meccanismo fisiologico di stress che porta a risposte comportamentali alterate e danni ai tessuti. Infine, gli zifi potrebbero subire danni ai tessuti direttamente dall'esposizione al suono, a causa per esempio della risonanza acustica dei tessuti (Cox et al., 2006).

5. Soluzioni per mitigare gli effetti dell'inquinamento acustico marino

Il mar Mediterraneo è un bacino semichiuso densamente popolato ed è un crocevia importante per molte rotte marittime, di conseguenza l'inquinamento acustico è inevitabilmente destinato ad aumentare in futuro, a meno che non vengano applicate nuove soluzioni tecnologiche e nuove misure legislative (Di Franco et al., 2020). Agire alla sorgente nella mitigazione dell'inquinamento

acustico è fondamentale: cambiamenti nelle rotte delle navi rispetto a ecosistemi sensibili, riduzioni nel numero e nella velocità delle navi dentro le aree protette, innovazione tecnologica nei motori delle imbarcazioni per renderli più silenziosi, programmi educativi e implementazione delle normative a livello legislativo e giudiziario. (Di Franco et al., 2020). Per mitigare e risolvere il problema dell'inquinamento acustico i governi in collaborazione con i ricercatori hanno intrapreso diverse vie. Sono state istituite delle aree marine protette che possono minimizzare il rischio di esposizione al suono antropogenico e quindi evitare possibili danni agli animali marini. Queste aree vengono istituite seguendo i pattern di distribuzione delle specie più sensibili. La creazione di barriere fisiche, come ad esempio barriere di bolle d'aria, permette di mitigare l'effetto di rumori intensi e impulsivi prodotti da infissione di pali e da esplosioni da *air guns* (Chahouri et al., 2022). Anche l'utilizzo di vegetali marini potrebbe essere una soluzione. Un sistema innovativo potrebbe essere lo sfruttamento di piante acquatiche comuni nel Mediterraneo come la *Posidonia oceanica*; infatti, scoperte ed esperimenti relativamente recenti hanno dimostrato che le foglie di questa pianta sono in grado di attutire il suono, diminuendone la velocità (Johnson et al., 2017).

5.1. Provvedimenti politici

L'inquinamento acustico marino è preso in considerazione nei piani della politica a livello nazionale e internazionale (European Union, 2008). I rischi per gli ecosistemi marini sono chiari, ma quantificare il costo ecologico dell'inquinamento acustico marino rimane difficile e l'incertezza rappresenta un problema nel rapportare le spese economiche per i provvedimenti alle conseguenze ecologiche. In tali condizioni di incertezza scientifica, però, è fondamentale attuare principi precauzionali che coinvolgono l'abbattimento dell'inquinamento alla sorgente e la sanzione pecuniaria per i trasgressori.

L'applicazione di restrizioni spazio-temporali sulle attività che generano rumore nelle aree e nelle stagioni di riproduzione degli organismi marini e l'introduzione di rumore a bassa intensità prima dell'emissione di rumori forti potenzialmente dannosi in modo da disperdere gli animali della zona (per esempio tramite i deterrenti acustici) sono misure di mitigazione che possono ridurre gli impatti dannosi su determinate specie protette. Ma l'unica via che permette un'ampia riduzione del rischio di impatto è l'abbattimento dell'inquinamento acustico nelle acque marine. Questo obiettivo può essere raggiunto tramite la riduzione del rumore emesso alla sorgente e la riduzione delle attività che generano il rumore (Merchant, 2019). Le misure politiche per gestire l'inquinamento ambientale possono essere classificate come approcci di comando e controllo (CAC) o misure basate sugli incentivi (IBM), note anche come misure basate sul mercato (MBM). Gli approcci CAC applicano controlli obbligatori all'attività industriale, attraverso tecnologie di abbattimento prescritte e limiti sui livelli di inquinamento sonoro

delle attività. Gli IBM offrono una certa flessibilità all'industria attraverso un sistema di "*cap-and-trade*", con cui vengono emessi dei permessi di inquinamento trasferibili tra chi inquina (il numero totale dei permessi offre un controllo dei livelli cumulativi di inquinamento), o attraverso incentivi economici, che incoraggiano la riduzione dell'inquinamento mediante sovvenzioni o tasse legate alle emissioni (Merchant, 2019).

5.1.1. Misure di riduzione dell'impatto acustico navale e del *pile driving*

La navigazione e il trasporto mercantile sono le fonti di inquinamento acustico marino più diffuse e persistenti, ma l'aumento delle misure di abbattimento del rumore prodotto dalle navi potrebbe potenzialmente portare a svantaggi competitivi sul mercato e quindi costituire un peso per il commercio. L'IMO (Organizzazione Marittima Internazionale), un'agenzia dell'UN che impone requisiti internazionali per la navigazione, ha già proposto una guida non obbligatoria per la riduzione del rumore emesso dalle navi (IMO, 2014), rivisitata nel 2023 con qualche innovazione. La maggiore sorgente sonora nelle imbarcazioni è la cavitazione dell'elica, fenomeno che può essere ridotto modificando l'elica o lo scafo e iniettando aria tra le pale. Anche i macchinari di bordo sono causa di rumore (es. motore, generatori...), la cui trasmissione può essere ridotta isolando le macchine e ottimizzando la loro posizione nello scafo (IMO, 2014). L'implementazione di queste tecnologie di silenziamento della nave in fase di progettazione piuttosto che in *retrofitting* riduce significativamente i costi. La velocità delle navi influenza il rumore emesso, tuttavia imbarcazioni più lente impiegano più tempo a percorrere una rotta; perciò, politiche che incentivano l'utilizzo di un minor numero di navi più grandi per il trasporto mercantile porterebbe a una riduzione dell'inquinamento acustico. Anche una manutenzione regolare dell'elica e dello scafo sono importanti per la riduzione del rumore prodotto, poiché il *fouling* marino che si viene a formare su tali strutture può incrementare la cavitazione. L'opzione più efficace potrebbe quindi essere quella di combinare i requisiti per le nuove navi, imponendo standard obbligatori di emissione sonora e offrendo incentivi economici, con misure mirate alle navi esistenti più rumorose determinando un massimo livello di rumore emesso e aumentando le operazioni di monitoraggio (IMO, 2014).

La riduzione dell'inquinamento acustico prodotto dall'infissione di pali nel fondale marino può essere attuata tramite misure operative come l'utilizzo di barriere fisiche o barriere di bolle d'aria disposte attorno all'area di lavoro. Le barriere di bolle (BBC, *big bubble curtains*) sono generate da un tubo perforato posato sul fondo del mare a circondare la zona di palificazione. Nel tubo viene pompata aria compressa, che fuoriuscendo crea una cortina di bolle ascendenti che si disperdono e assorbono il rumore dell'infissione, riducendo i livelli di rumorosità fino a 15 dB. Queste barriere di bolle sono particolarmente efficaci per suoni con frequenze superiori ai 1000 Hz e possono essere installate in acque non

più profonde di 40 metri (Dähne et al., 2017; Merchant, 2019) . Un'altra modalità è quella di utilizzare un tipo di installazione alternativo come piattaforme galleggianti, per esempio per le turbine eoliche (Merchant, 2019).

5.2. Istituzione di aree marine protette

Le Aree Marine Protette (AMP) sono porzioni di mare e di costa poste sotto tutela e gestione per la loro importanza ecologica. Attraverso una gestione efficace, proteggono la vita marina del Mediterraneo, garantendo il sostentamento dei pescatori, stimolando l'economia locale e offrendo ai turisti l'opportunità di entrare in contatto con la natura (MedPAN, <https://medpan.org/en>).

La rete MedPAN di AMP contribuisce all'implementazione della Convenzione di Barcellona, in particolare, il protocollo relativo alle Aree Specialmente Protette e alla Diversità Biologica nel Mediterraneo (UNEP/MAP, 1995).

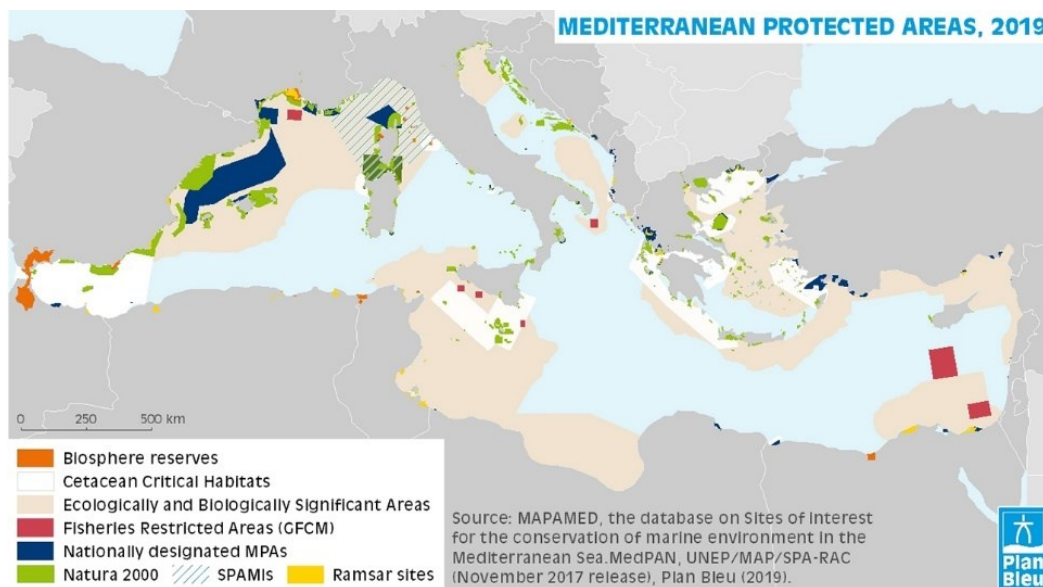


Figura 8. Mappa delle AMP nel Mediterraneo, 2019. Circa l'8% del mar Mediterraneo si trova sotto la designazione ufficiale di uno statuto protetto. Circa il 97% della superficie totale protetta si trova in acque di Paesi UE. La superficie cumulativa vietata al transito e alla pesca rappresenta circa lo 0,04% del Mediterraneo. Fonte: MAPAMED (MedPAN, UNEP/MAP).

La Convenzione di Barcellona e i suoi Protocolli costituiscono un quadro giuridico multilaterale per la protezione dell'ambiente marino e costiero e l'uso sostenibile delle risorse nel Mediterraneo. Le aree marine protette forniscono rifugi per flora e fauna marina, ripristinano importanti funzioni ecologiche, salvaguardano le zone di deposizione delle uova e le aree di riproduzione. All'interno delle AMP le attività antropiche in particolare la navigazione subiscono limitazioni nel transito e nella sosta con l'obiettivo di preservare l'ambiente marino (Istituto Oceanografico di Monaco, <https://www.oceano.org/it/>). Le AMP nel Mediterraneo sono distribuite in modo irregolare, il 75% è concentrato nel Mediterraneo occidentale. Solo tre Paesi nel

Mediterraneo occidentale (Francia, Italia, Spagna) contribuiscono all'80% delle aree marine protette (Rodríguez-Rodríguez et al., 2016) (Fig. 8).

6. Conclusioni

Il suono è una componente fondamentale dell'ambiente marino e l'insieme delle fonti sonore naturali, biotiche e abiotiche, e le fonti sonore antropogeniche genera il *soundscape* marino, un paesaggio sonoro marino che viene utilizzato dagli organismi in grado di percepire e produrre suoni per comunicare e per ottenere informazioni sull'ambiente. All'interno del *soundscape* il contributo delle fonti antropogeniche sta aumentando sempre di più e sta generando inquinamento acustico. Le sorgenti di rumore acuto rilasciano rumori forti e impulsivi, mentre le sorgenti di rumore cronico, come le navi, emettono suoni di intensità moderata, ma in modo costante e sono la principale causa dell'inquinamento. Le conseguenze dell'inquinamento acustico sono risentite da diversi gruppi di animali marini.

I pesci come il branzino possono avere risposte comportamentali di motilità elevata dovuta all'aumento dell'attività muscolare, risposte di spavento, risposte antipredatorie compromesse e diminuzione della coesione dei banchi. Nelle orate si sono osservati anche cambiamenti biochimici a livello dei biomarcatori dello stress, che indicano il verificarsi appunto di una risposta di stress. L'insieme di queste risposte porta al consumo di energia che viene quindi sottratta ad altre attività vitali, con conseguenze di riduzione della *fitness* degli individui e, su ampia scala, di intere popolazioni. Anche negli invertebrati si osservano conseguenze in seguito all'esposizione al suono che possono portare a una riduzione della *fitness*. Nei mitili si osserva un cambiamento nel tasso di filtrazione, in base al tipo di rumore, e un'alterazione del grado di apertura valvare; nei cefalopodi e negli cnidari risultano gravi danni alle statocisti, con conseguente alterazione della capacità uditiva. Nel gambero comune si trovano risposte comportamentali di permanenza all'esterno del rifugio, e dal punto di vista biochimico l'aumento delle proteine HSP, indicatrici di stress. Ma le manifestazioni più vistose di alterazioni prodotte da inquinamento acustico sono relative ai cetacei. Nei tursiopi l'impatto del rumore cronico modifica la produzione di suoni come emissione di fischi e richiami, mentre il rumore impulsivo può causare uno spostamento della soglia uditiva temporaneo o permanente. Infine, la scoperta della correlazione tra gli spiaggiamenti degli zifi e l'emissione di rumori acuti da parte delle navi ha rivelato che le fonti di rumore antropogenico possono causare perfino anche la morte degli animali marini. Capire e conoscere le cause dell'inquinamento acustico marino è fondamentale, in quanto le conseguenze che si riscontrano a livello dei singoli individui in un'ampia gamma di specie, le quali con ruoli spesso importanti all'interno della rete trofica e dell'ecosistema, indicano il rischio di impatto a livello di popolazione e di

ecosistema. L'interesse è anche economico, infatti molte di queste specie sono oggetto di pesca e acquacoltura. Capire e conoscere le sorgenti di rumore antropogenico più impattanti è fondamentale per attuare provvedimenti politici, che, nonostante le difficoltà di quantificazione del danno, già esistono e sono frutto della collaborazione tra governi ed enti di ricerca. In particolare, l'azione a livello della sorgente sonora è la via più efficace di mitigazione, servono quindi innovazione dei motori delle navi tramite imposizione di requisiti standard e incentivi, nonché sanzioni per i trasgressori dei limiti di emissione. Anche la limitazione del numero di navi e della loro velocità è fondamentale, soprattutto all'interno di aree marine protette che attualmente ricoprono circa l'8% del mar Mediterraneo. Infine, per attutire il rumore acuto prodotto dalle operazioni di costruzione costiere possono essere utili barriere fisiche come quelle fornite dalla produzione di bolle d'aria.

Il campo di studio è molto ampio e sta attirando una crescente attenzione, portando continuamente a nuove conoscenze. In questo lavoro sono state trattate le principali cause antropogeniche di rumore sottomarino e le loro conseguenze su alcune specie rappresentative che vivono nel Mar Mediterraneo, ma rimangono aperte diverse questioni su altre fonti di rumore, come i cannoni ad aria per la prospezione dei fondali e le esplosioni sottomarine. Sono state analizzate le conseguenze del rumore antropogenico solo su alcune specie di animali marini, ma sono disponibili risultati su numerosi altri taxa che vengono colpiti dalle conseguenze dell'inquinamento acustico marino (per esempio i cetacei mysticeti), mentre alcuni gruppi come, ad esempio, quello delle tartarughe marine non sono molto studiati in questo ambito. Questioni aperte permangono anche su altri tipi di risposte comportamentali (come la riproduzione e la territorialità dei pesci e degli invertebrati) o di danni fisici (come, per esempio, la rottura della vescica natatoria dei pesci o lo spostamento permanente della soglia uditiva) che si possono verificare.

L'argomento è di crescente importanza, infatti, gli studi evidenziano che le conseguenze negative sulla fauna marina del Mediterraneo sono reali e, in alcuni casi, molto gravi. L'ambito di ricerca sull'inquinamento acustico è ricco di possibilità e richiede una più ampia comprensione e considerazione per poter avanzare misure di gestione e conservazione sempre migliori, volte alla protezione degli ecosistemi marini.

7. Letteratura citata

DOSITS - University of Rhode Island and Inner Space Center <https://dosits.org/> , consultato il 25/07/2023

NOAA - National Oceanic and Atmospheric Administration, <https://oceanservice.noaa.gov/facts/>
MedPAN, <https://medpan.org/en> , consultato il 16/08/2023

- Istituto Oceanografico di Monaco, <https://www.oceano.org/it/>, consultato il 16/08/2023
- André, M., Solé, M., Lenoir, M., Durfort, M., Quero, C., Mas, A., Lombarte, A., Van Der Schaar, M., López-Bejar, M., Morell, M., Zaugg, S., Houégnigan, L., 2011. Low-frequency sounds induce acoustic trauma in cephalopods. *Front. Ecol. Environ.* 9, 489–493. <https://doi.org/10.1890/100124>
- Ary, W., Cranford, T.W., Berta, A., Krysl, P., 2016. Functional Morphology and Symmetry in the Odontocete Ear Complex. In: Popper, A.N., Hawkins, A. (Eds.), *The Effects of Noise on Aquatic Life II, Advances in Experimental Medicine and Biology*. Springer New York, New York, NY, pp. 57–64. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-2981-8_7
- Bradley, D.L., Stern, R., 2008. *Underwater sound and the marine mammal acoustic environment. A Guide to Fundamental Principles*. U. S. Marine Mammal Commission, 4340 East-West Highway, Room 700 Bethesda, MD 20814.
- Buckstaff, K.C., 2004. Effects of watercraft noise on the acoustic behavior of bottlenose dolphins, *Tursiops truncatus*, in Sarasota Bay, Florida. *Mar. Mammal Sci.* 20, 709–725. <https://doi.org/10.1111/j.1748-7692.2004.tb01189.x>
- Buscaino, G., Filiciotto, F., Buffa, G., Bellante, A., Stefano, V.D., Assenza, A., Fazio, F., Caola, G., Mazzola, S., 2010. Impact of an acoustic stimulus on the motility and blood parameters of European sea bass (*Dicentrarchus labrax* L.) and gilthead sea bream (*Sparus aurata* L.). *Mar. Environ. Res.* 69, 136–142. <https://doi.org/10.1016/j.marenvres.2009.09.004>
- Celi, M., Filiciotto, F., Maricchiolo, G., Genovese, L., Quinci, E.M., Maccarrone, V., Mazzola, S., Vazzana, M., Buscaino, G., 2016. Vessel noise pollution as a human threat to fish: assessment of the stress response in gilthead sea bream (*Sparus aurata*, Linnaeus 1758). *Fish Physiol. Biochem.* 42, 631–641. <https://doi.org/10.1007/s10695-015-0165-3>
- Chahouri, A., Elouahmani, N., Ouchene, H., 2022. Recent progress in marine noise pollution: A thorough review. *Chemosphere* 291, 132983. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2021.132983>
- Cox, T.M., Ragen, T.J., Read, A.J., Vos, E., Baird, R.W., Balcomb, K., Barlow, J., Caldwell, J., Cranford, T., Crum, L., D’Amico, A., D’Spain, G., Fernandez, A., Finneran, J., Gentry, R., Gerth, W., Gulland, F., Hildebrand, J., Houser, D., Hullar, T., Jepson, P.D., Ketten, D., MacLeod, C.D., Miller, P., Moore, S., Mountain, D.C., Palka, D., Ponganis, P., Rommel, S., Rowles, T., Taylor, B., Tyack, P., Wartzok, D., Gisiner, R., Mead, J., Benner, L., 2006. Understanding the impacts of anthropogenic sound on beaked whales. *J Cetacean Res Manage* 7, 177–187. <https://doi.org/10.47536/jcrm.v7i3.729>
- Dähne, M., Tougaard, J., Carstensen, J., Rose, A., Nabe-Nielsen, J., 2017. Bubble curtains attenuate noise from offshore wind farm construction and reduce temporary habitat loss for harbour porpoises. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 580, 221–237. <https://doi.org/10.3354/meps12257>
- D’Amico, A., Gisiner, R.C., Ketten, D.R., Hammock, J.A., Johnson, C., Tyack, P.L., Mead, J., 2009. Beaked Whale Strandings and Naval Exercises. *Aquat. Mamm.* 35, 452–472. <https://doi.org/10.1578/AM.35.4.2009.452>
- Di Franco, E., Pierson, P., Di Iorio, L., Calò, A., Cottalorda, J.M., Derijard, B., Di Franco, A., Galvé, A., Guibbolini, M., Lebrun, J., Micheli, F., Priouzeau, F., Risso-de Faverney, C., Rossi, F., Sabourault, C., Spennato, G., Verrando, P., Guidetti, P., 2020. Effects of marine noise pollution on Mediterranean fishes and invertebrates: A review. *Mar. Pollut. Bull.* 159, 111450. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2020.111450>
- Erbe, C., Dunlop, R., Dolman, S., 2018. Effects of Noise on Marine Mammals, in: Slabbekoorn, H., Dooling, R.J., Popper, A.N., Fay, R.R. (Eds.), *Effects of Anthropogenic Noise on Animals*, Springer Handbook of Auditory Research. Springer New York, New York, NY, pp. 277–309. https://doi.org/10.1007/978-1-4939-8574-6_10
- European Union, 2008. Directive 2008/56/EC of the European Parliament and of the Council of 17 June 2008 establishing a framework for community action in the field of marine environmental policy (Marine Strategy Framework Directive, MSFD).
- Evans, P.G.H., Miller, L.A., n.d. Held at the European Cetacean Society’s 17th Annual Conference, Auditorio Alfredo Kraus, Las Palmas, Gran Canaria, 8th March 2003.
- Filiciotto, F., Vazzana, M., Celi, M., Maccarrone, V., Ceraulo, M., Buffa, G., Arizza, V., De Vincenzi, G., Grammata, R., Mazzola, S., Buscaino, G., 2016. Underwater noise from boats: Measurement of its influence on the behaviour and biochemistry of the common prawn (*Palaemon serratus*, Pennant 1777). *J. Exp. Mar. Biol. Ecol.* 478, 24–33. <https://doi.org/10.1016/j.jembe.2016.01.014>

- Finfer, D.C., Leighton, T.G., White, P.R., 2008. Issues relating to the use of a 61.5dB conversion factor when comparing airborne and underwater anthropogenic noise levels. *Appl. Acoust.* 69, 464–471. <https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2007.05.008>
- Finneran, J.J., Carder, D.A., Schlundt, C.E., Ridgway, S.H., 2005. Temporary threshold shift in bottlenose dolphins (*Tursiops truncatus*) exposed to mid-frequency tones. *J. Acoust. Soc. Am.* 118, 2696–2705. <https://doi.org/10.1121/1.2032087>
- Frantzis, A., 1998. Does acoustic testing strand whales? *Nature* 392, 29–29. <https://doi.org/10.1038/32068>
- Herbert-Read, J.E., Kremer, L., Bruintjes, R., Radford, A.N., Ioannou, C.C., 2017. Anthropogenic noise pollution from pile-driving disrupts the structure and dynamics of fish shoals. *Proc. R. Soc. B Biol. Sci.* 284, 20171627. <https://doi.org/10.1098/rspb.2017.1627>
- Hildebrand, J., 2009. Anthropogenic and natural sources of ambient noise in the ocean. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 395, 5–20. <https://doi.org/10.3354/meps08353>
- International Maritime Organization (IMO), 2014. Guidelines for the reduction of underwater noise from commercial shipping to address adverse impacts on marine life. Presented at the IMO Sub-Committee on Ship Design and Construction, London.
- Jochum, M., Murtugudde, R. (Eds.), 2006. *Physical oceanography: developments since 1950*. Springer, Berlin ; New York.
- Johnson, J.R., Venegas, G.R., Wilson, P.S., Hermand, J.-P., 2017. Low frequency acoustic properties of *Posidonia oceanica* seagrass leaf blades. *J. Acoust. Soc. Am.* 141, EL555–EL560. <https://doi.org/10.1121/1.4984045>
- Lovell, J.M., Findlay, M.M., Moate, R.M., Yan, H.Y., 2005. The hearing abilities of the prawn *Palaemon serratus*. *Comp. Biochem. Physiol. A. Mol. Integr. Physiol.* 140, 89–100. <https://doi.org/10.1016/j.cbpb.2004.11.003>
- Merchant, N.D., 2019. Underwater noise abatement: Economic factors and policy options. *Environ. Sci. Policy* 92, 116–123. <https://doi.org/10.1016/j.envsci.2018.11.014>
- Miksis-Olds, J.L., Martin, B., Tyack, P.L., n.d. Exploring the Ocean Through Soundscapes.
- Podesta, M., D'Amico, A., Pavan, G., Drougas, A., Komnenou, A., Portunato, N., 2006. A review of Cuvier's beaked whale strandings in the Mediterranean Sea. *J. Cetacean Res Manage* 7, 251–261. <https://doi.org/10.47536/jcrm.v7i3.735>
- Popper, A.N., Hawkins, A.D., 2019. An overview of fish bioacoustics and the impacts of anthropogenic sounds on fishes. *J. Fish Biol.* 94, 692–713. <https://doi.org/10.1111/jfb.13948>
- Reckendorf, A., Seidelin, L., Wahlberg, M., 2023. Marine Mammal Acoustics, in: Brennecke, D., Knickmeier, K., Pawliczka, I., Siebert, U., Wahlberg, M. (Eds.), *Marine Mammals*. Springer International Publishing, Cham, pp. 15–31. https://doi.org/10.1007/978-3-031-06836-2_2
- Roberts, L., Cheesman, S., Breithaupt, T., Elliott, M., 2015. Sensitivity of the mussel *Mytilus edulis* to substrate-borne vibration in relation to anthropogenically generated noise. *Mar. Ecol. Prog. Ser.* 538, 185–195. <https://doi.org/10.3354/meps11468>
- Rodríguez-Rodríguez, D., Rodríguez, J., Blanco, J.M., Abdul Malak, D., 2016. Marine protected area design patterns in the Mediterranean Sea: Implications for conservation. *Mar. Pollut. Bull.* 110, 335–342. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2016.06.044>
- Slabbekoorn, H., Bouton, N., Van Opzeeland, I., Coers, A., Ten Cate, C., Popper, A.N., 2010. A noisy spring: the impact of globally rising underwater sound levels on fish. *Trends Ecol. Evol.* 25, 419–427. <https://doi.org/10.1016/j.tree.2010.04.005>
- Solé, M., Lenoir, M., Fontuño, J.M., Durfort, M., Van Der Schaar, M., André, M., 2016. Evidence of Cnidarians sensitivity to sound after exposure to low frequency noise underwater sources. *Sci. Rep.* 6, 37979. <https://doi.org/10.1038/srep37979>
- Solé, M., Sigray, P., Lenoir, M., Van Der Schaar, M., Lalander, E., André, M., 2017. Offshore exposure experiments on cuttlefish indicate received sound pressure and particle motion levels associated with acoustic trauma. *Sci. Rep.* 7, 45899. <https://doi.org/10.1038/srep45899>
- Spiga, I., Aldred, N., Caldwell, G.S., 2017. Anthropogenic noise compromises the anti-predator behaviour of the European seabass, *Dicentrarchus labrax* (L.). *Mar. Pollut. Bull.* 122, 297–305. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2017.06.067>
- Spiga, I., Caldwell, G.S., Bruintjes, R., 2016. Influence of Pile Driving on the Clearance Rate of the Blue Mussel, *Mytilus edulis* (L.). Presented at the Fourth International Conference on

- the Effects of Noise on Aquatic Life, Dublin, Ireland, p. 040005.
<https://doi.org/10.1121/2.0000277>
- UNEP/MAP, 1995. Barcelona Convention. Presented at the Convention for the Protection of the Marine Environment and the Coastal Region of the Mediterranean, Barcelona.
- Wale, M.A., Briers, R.A., Hartl, M.G.J., Bryson, D., Diele, K., 2019. From DNA to ecological performance: Effects of anthropogenic noise on a reef-building mussel. *Sci. Total Environ.* 689, 126–132. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.06.380>