

PROGETTO PER LA REALIZZAZIONE DI UN IMPIANTO PER LA
PRODUZIONE DI ENERGIA MEDIANTE LO SFRUTTAMENTO DEL VENTO
NEL MARE ADRIATICO MERIDIONALE - BARIUM BAY
74 WTG – 1.110 MW

PROGETTO DEFINITIVO - SIA

Progettazione e SIA



Indagini ambientali e studi specialistici



Studio misure di mitigazione e compensazione



supervisione scientifica



SIA.ES STUDI SPECIALISTICI

ES.2.2 Valutazione Previsionale di Impatto Acustico

REV.	DATA	DESCRIZIONE



Contenuti

Sommario Esecutivo	1
1. Introduzione	2
1.1. Il Progetto	2
1.1.1. Installazione delle ancore – pali battuti (o infissi).....	2
1.1.2. Rumore operativo delle turbine.....	3
1.2. Rumore ambientale di fondo	3
1.3. Criteri per la valutazione degli impatti sui mammiferi marini	5
2. Metodi	7
2.1. Stima dei livelli di sorgente	7
2.2. Modellizzazione della propagazione del suono.....	9
2.3. Stima dell’impatto sui mammiferi marini	10
2.4. Parametri Ambientali	11
2.4.1. Profilo della velocità del suono.....	11
2.4.2. Batimetria	12
2.4.3. Geoacustica	12
3. Risultati	14
4. Discussione e Conclusioni.....	17
Glossario dei termini acustici.....	18
Letteratura Citata.....	24
Appendice A. Terminologia	1
Appendice B. Propagazione del suono	4

Figure

Figura 1 Curve di Wenz che descrivono i livelli di densità spettrale di pressione del suono ambientale marino prodotto da fenomeni meteorologici, vento, attività geologica e navigazione commerciale.....	4
Figura 2. Traffico navale nel Mar Adriatico meridionale e Mar Ionio durante il 2021	5
Figura 3. <i>Costruzione (infissione di pali)</i> : spettro dei livelli (SEL per un singolo impulso) in bande in terzi di ottava (sulla banda di frequenze da 10 Hz a 25 kHz) riferiti a 10m dalla sorgente. Trattandosi di una sorgente lineare (anziché' puntiforme) non è possibile parlare di livello di sorgente.....	7
Figura 4. Densità spettrale di potenza in bande di terzi di ottava (bande comprese fra i 25 Hz e i 20kHz) per le registrazioni effettuate fra Nov-Dec 2021 a 200m da una turbina del parco eolico Kinkardine	8
Figura 5. <i>Fase di esercizio</i> - spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello corrispondente a un livello a banda larga di 152 dB re 1 μ Pa ² m ² (10Hz-22kHz).	9
Figura 6. Sintesi dei tipi di modello e della loro applicabilità e accuratezza in base a vari scenari	10
Figura 7. Esempi di aree insonificate al di sopra di un certo livello sonoro con le distanze R_{max} e $R_{95\%}$ dimostrate per due scenari differenti: (sinistra) una distribuzione del livello sonoro radialmente simmetrica con piccole sporgenze, per la quale $R_{95\%}$ meglio rappresenta l'area insonificata effettiva; e (destra) una distribuzione di livello sonoro fortemente asimmetrica con lunghe sporgenze, per la quale R_{max} meglio rappresenta le aree insonificate in alcune direzioni. L'azzurro indica le aree insonificate delimitate da $R_{95\%}$; il blu più scuro indica le regioni limitrofe che determinano R_{max}	11
Figura 8. Profilo della velocità del suono utilizzato per la modellizzazione (in rosso) e per i rimanenti mesi dell'anno.....	12
Figura 9. Fase di esercizio: mappe della distanza alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini.....	16

Tabelle

Tabella 1. Specie di cetacei note per essere presenti nel mar Mediterraneo e il loro stato di conservazione.	6
Tabella 2. Valori soglia capaci di originare le prime significative risposte comportamentali in diverse specie di mammiferi marini come riportati in Borsani and Farchi (2011).	6
Tabella 3. Input relativi alla procedura di infissione dei pali previsti come scenario peggiore per l'installazione di un'ancora presso Barium Bay.....	7
Tabella 4. Descrizione dei due siti usati come sorgenti per la modellizzazione.	9
Tabella 5. Profilo geoacustico stimato per il sito modellizzato.....	13
Tabella 6. Fase di costruzione: raggi che eccedono la soglia (in grassetto) corrispondente alle prime significative risposte comportamentali (rumore impulsivo) per le specie di mammiferi marini presenti nell'area di studio	15
Tabella 7. Fase di esercizio: raggi che eccedono le soglie (in grassetto) corrispondenti alle prime significative risposte comportamentali (rumore continuo) per le specie di mammiferi marini presenti nell'area di studio	15

Sommario Esecutivo

La JASCO Applied Sciences (JASCO) è stata incaricata di effettuare la modellizzazione del rumore subacqueo emesso durante le fasi di costruzione e operazione del parco eolico galleggiante offshore proposto al largo di Barletta, denominato Barium Bay, e di stimare le distanze di impatto del rumore emesso dalle sorgenti sonore identificate sulla fauna marina, e in particolare sui cetacei.

Il parco eolico sarà costituito da 76 aereogeneratori, ciascuno fissato su una struttura galleggiante con tre cilindri semi-sommersibili, su uno dei quali viene montata la torre della turbina.

La modellizzazione interessa le due attività che sono state ritenute più impattanti per quanto riguarda le potenziali emissioni sonore subacquee per le fasi di costruzione e di esercizio del parco eolico, cioè l'installazione delle ancore e l'operazione regolare delle turbine.

Per la fase di costruzione, la sorgente è stata modellizzata prendendo in considerazione l'installazione tramite battipali con un martello di portata massima di 550 kJ. Per la fase operativa, il profilo acustico mediano (non scalato) di una turbina derivato dai risultati delle misurazioni effettuate presso la Kinkardine Offshore Wind Farm è stato utilizzato come input per il modello, con un livello di sorgente a banda larga (10Hz-32kHz) di 152 dB re 1 μ Pa m per una turbina individuale. Il suono generato dalle turbine in fase di esercizio comprende il generatore e rotore, il cambio, gli ormeggi e il funzionamento saltuario delle pompe per equilibrare la struttura. La propagazione del rumore subacqueo è stata effettuata utilizzando il modello MONM (equazione parabolica) alle basse frequenze combinato con Bellhop per le frequenze al di sopra di 1kHz.

La modellizzazione per lo scenario della costruzione è stata effettuata per un sito che rappresenta il caso più cautelativo, cioè l'aereogeneratore che sarà installato dove l'acqua è più profonda, e con un profilo di velocità del suono isotropo (tipico del mese di febbraio) che favorisce la propagazione su lunghe distanze.

La soglia di disturbo comportamentale (Borsani e Farchi, 2011), corrispondente a un SEL ponderato di 183 dB re 1 μ Pa²s, per l'impulso singolo generato dall'attività di battipalo all'energia massima prevista di 550kJ non è ecceduta per la fase di costruzione per nessuno dei due gruppi uditivi a cui appartengono le specie potenzialmente presenti nell'area di studio.

Per la fase di esercizio, oltre al sito più cautelativo è stato modellizzato un sito maggiormente rappresentativo dell'intero parco, a profondità dell'acqua intermedia. Per entrambi i siti, la prima soglia di disturbo comportamentale è al di sotto di 1km per le balenottere (L_p di 100 dB re 1 μ Pa) e di 200 metri per i delfini e i capodogli (L_p di 110 dB re 1 μ Pa), facendo riferimento al valore più basso per l'insorgenza del disturbo secondo Borsani and Farchi (2011). Considerando invece la totalità del parco eolico costituito da 76 aerogeneratori, l' L_p di 100 dB re 1 μ Pa viene ecceduto fino a 4.4km e l' L_p di 110 dB re 1 μ Pa entro 220 metri.

Il rumore sottomarino operativo è leggermente al di sopra del suono ambientale per le turbine individuali e il parco complessivo; tuttavia, i livelli sonori scendono a livelli ambientali (cioè al di sotto di un L_p di 119 dB re 1 μ Pa, calcolato su 10 secondi) entro poche decine di metri dalla sorgente.

1. Introduzione

La JASCO Applied Sciences (JASCO) è stata incaricata di effettuare la modellazione del rumore subacqueo per le fasi di costruzione ed esercizio del parco eolico galleggiante proposto al largo di Barletta per stimare le distanze di impatto acustico delle sorgenti identificate sulla fauna marina, in particolare sui cetacei.

1.1. Il Progetto

Il parco eolico proposto, denominato Barium Bay, prevede l'installazione di 76 aerogeneratori ormeggiati al fondale marino, ciascuno fissato su una base galleggiante con tre cilindri verticali semi-sommersi, uno dei quali supporta la torre della turbina.

Le seguenti attività sono state identificate come potenziali sorgenti di rumore sottomarino:

- Installazione delle ancore delle turbine (fase di costruzione)
- Dragaggio per la posa di cavi (fase di costruzione)
- Posa di cavi (fase di costruzione)
- Traffico di imbarcazioni per la costruzione e la manutenzione del parco eolico (fasi di costruzione ed esercizio)
- Rumore operativo delle turbine (fase di esercizio)
- Rumore generato dalle navi e strumenti utilizzati per lo smantellato (fase di dismissione).

In questo studio, la modellizzazione è dedicata alle due attività che sono state ritenute più impattanti per quanto riguarda le potenziali emissioni sonore subacquee per le fasi di costruzione e di esercizio del parco eolico, cioè l'installazione delle ancore e il rumore operativo delle turbine rispettivamente. La fase di dismissione non è stata modellizzata in quanto non è ancora stata definita la modalità con cui questa operazione verrà condotta.

Essendo il Progetto ancora in una fase di definizione della soluzione ingegneristica, non si esclude che le attività modellizzate, descritte nelle sottosezioni 1.1.1 e 1.1.2, vadano riviste in futuro.

1.1.1. Installazione delle ancore – pali battuti (o infissi)

Il sistema di ormeggio più comunemente utilizzato negli impianti eolici offshore galleggianti è quello di fissare le turbine mediante catenarie ed ancore marine terminali. Esistono tuttavia, ove possibile per la natura dei fondali, tecniche di ormeggio con elementi tesi (catene o funi) o sistemi con ancore terminali costituite da strutture a suzione (suction buckets) o pali ad avvitaimento. Queste tecniche di installazione alternative sono considerate meno rumorose dell'ancoraggio infisso a percussione.

Per il Progetto lo studio geotecnico deve essere ancora effettuato e dunque non sono certi né quale tipo di ancoraggio verrà utilizzato né con che tecnica debba essere installato. In questo studio è ipotizzato pertanto che, nel peggiore dei casi, gli ormeggi debbano essere ancorati tramite pali che vengono infissi nel terreno mediante percussione. In tale caso, i pali verranno interamente battuti sott'acqua, a differenza delle operazioni di infissione dei piloni per le fondamenta dei parchi eolici fissi. Questo è simile a quanto viene effettuato per le installazioni di piattaforme in acque molto profonde.

Durante le operazioni di infissione, il rumore può essere trasmesso nell'acqua tramite il fondale o dalla struttura in contatto con la colonna d'acqua. La percussione dei pali produce suoni impulsivi intensi e a banda larga con picchi di energia generalmente al di sotto di 1kHz.

Molteplici studi hanno misurato e modellato i livelli di rumore generati dalle operazioni di infissione, anche se questi riguardano generalmente infissioni di monopali come fondamenta delle turbine. In generale, i livelli di pressione sonora generati dall'infissione del palo dipendono da molti fattori, i più significativi dei quali sono il materiale del palo, il diametro e l'energia del martello.

In uno studio del 2013 (Norro et al.) è stato misurato il rumore subacqueo generato durante l'infissione di monopali del diametro di 5 m presso il parco eolico di Belwind (Blighbank, Belgium). I valori normalizzati del livello sonoro di picco (L_{pk}) a 750 m andavano da un minimo di $L_{pk} = 179$ dB re 1 μ Pa a un massimo di $L_{pk} = 194$ dB re 1 μ Pa (energia applicata in media di 706 kJ con un martello IHC S1200).

1.1.2. Rumore operativo delle turbine

Il rumore subacqueo delle turbine eoliche in funzione ha origine nelle parti meccaniche in movimento nella navicella, quasi esclusivamente con energia emessa a frequenze inferiori a 1 kHz, e tipicamente con forti elementi tonali corrispondenti alla rotazione degli ingranaggi e le loro armoniche (Pangerc et al. 2016). Il rumore viene trasmesso attraverso la torre e irradiato nell'acqua dalla sezione sommersa; i livelli sonori operazionali sottomarini potrebbero dunque dipendere dal tipo di fondazione, ma ciò non è stato dimostrato dagli studi condotti fino ad ora (Tougaard et al. 2020). Un'altra fonte di rumore per le turbine eoliche galleggianti è il movimento dei sistemi di ormeggio, come descritto per i parchi eolici galleggianti di Hywind Scotland (Burns et al. 2022) e Kinkardine (Risch et al. 2023). Per Hywind Scotland, i tipi di suoni associati col sistema di ancoraggio, e il loro livello, sono apparsi variare da turbina a turbina. I livelli di sorgente medi a banda larga (10-32000 Hz) calcolati dalla JASCO (Burns et al. 2022) variano da 162,5 a 167,2 dB re 1 μ Pa²m² a seconda della velocità del vento che nello studio ha considerato incrementi di 5 nodi da un minimo di 5 nodi a 25 nodi. Il valore più alto del livello di sorgente calcolato nello studio di Hywind Scotland è di 172 dB re 1 μ Pa²m², corrispondente al 95° percentile con 25 nodi di vento

Fattori che chiaramente influenzano il livello sonoro sono la grandezza della turbina e la forza del mare e del vento. Con l'aumento delle dimensioni delle pale, le forze meccaniche che agiscono su ingranaggi e cuscinetti aumentano a loro volta causando livelli di rumore più elevati; lo stesso vale per un aumento della velocità del vento (Tougaard et al. 2020). Il rumore sottomarino emesso da turbine individuali risulta comunque notevolmente inferiore ai livelli acustici ambientali, mentre nel caso di numerose turbine i livelli di rumore aggregati del parco eolico potrebbero eccedere il sottofondo acustico fino ad alcuni chilometri di distanza in condizioni di rumore ambientale molto basso.

I suoni subacquei emessi dai WTG sono udibili da mammiferi marini, tartarughe marine, pesci e invertebrati, ma sono inferiori al danno uditivo e tipicamente inferiori alle soglie comportamentali per la fauna marina.

1.2. Rumore ambientale di fondo

I suoni ambientali che creano il paesaggio acustico marino sono prodotti da molte fonti naturali e antropiche (Figura 1). Le principali sorgenti naturali sono vento, precipitazioni e, in acque polari o subpolari, ghiaccio marino. Il rumore generato dal vento nell'oceano è ben documentato (es., Wenz 1962, Ross 1976), e il suono dei frangenti è noto come importante contributo ai paesaggi sonori vicino alla costa (Deane 2000). Le precipitazioni sono una consueta fonte di rumore ambientale, tipicamente a frequenze superiori a 500 Hz. A basse frequenze (<100 Hz), terremoti e altri eventi geologici contribuiscono al paesaggio sonoro.

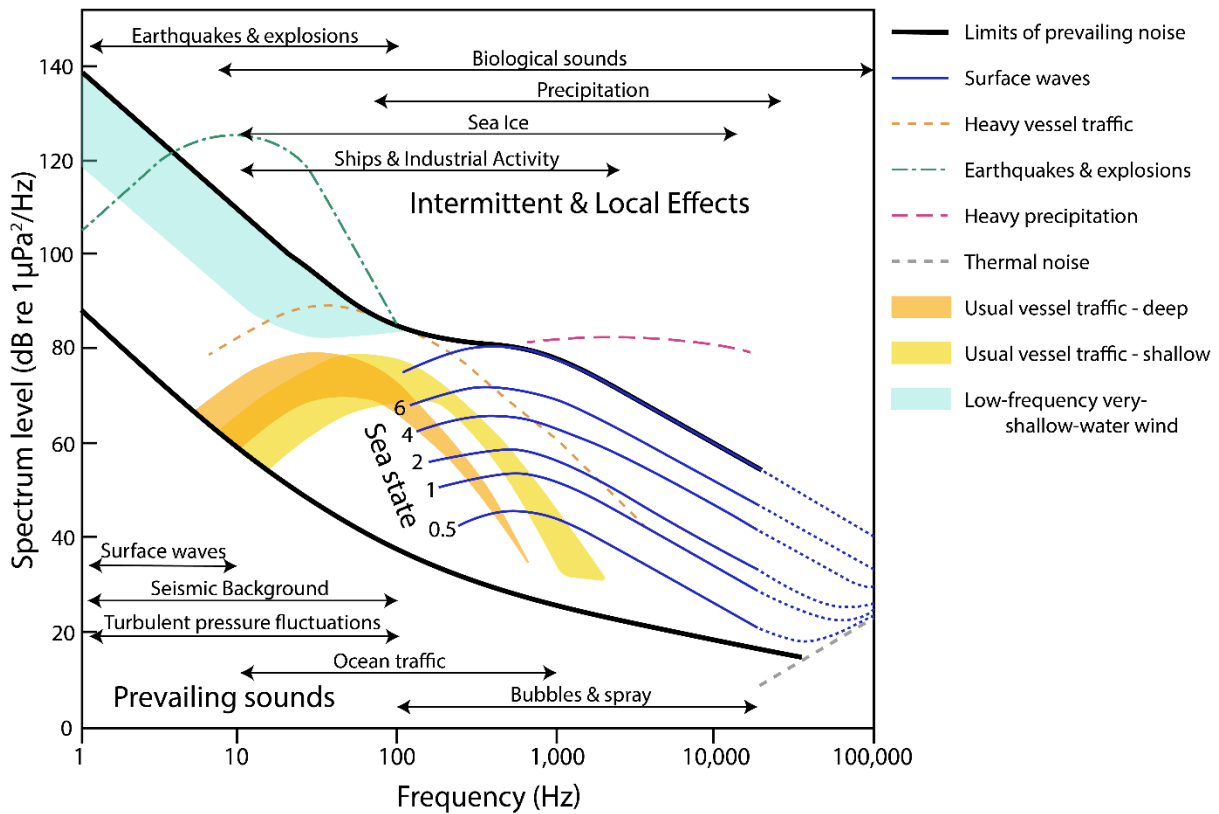


Figura 1 Curve di Wenz che descrivono i livelli di densità spettrale di pressione del suono ambientale marino prodotto da fenomeni meteorologici, vento, attività geologica e navigazione commerciale (adattate da NRC 2003, basate su Wenz 1962). Le linee spesse indicano i limiti del suono ambientale prevalente. Riguardo alle sorgenti sonore antropiche nell'area d'interesse si può affermare che il rumore di fondo è notevolmente influenzato dal traffico navale sulle molte importanti rotte marittime, come si evince dalla Figura 2. Questa zona è stata identificata da ACCOBAMS (Maglio et al. 2016) come un hotspot del rumore subacqueo, ed è inoltre soggetta a frequenti progetti di esplorazione sismica. Uno studio pubblicato nel 2021 ha riportato i livelli sonori provenienti da quest'ultimo tipo di attività. I dati sono stati acquisiti a 70-125 km di distanza da due surveys condotti in autunno e inverno nel mar Adriatico sud-orientale (al largo del Montenegro), in acque profonde. I valori di SEL calcolati nella banda dei 15–200 Hz erano sui 130 dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$, mentre durante il survey invernale sono stati riportati SEL di 135 dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{s}$ (Širović and Holcer 2021).

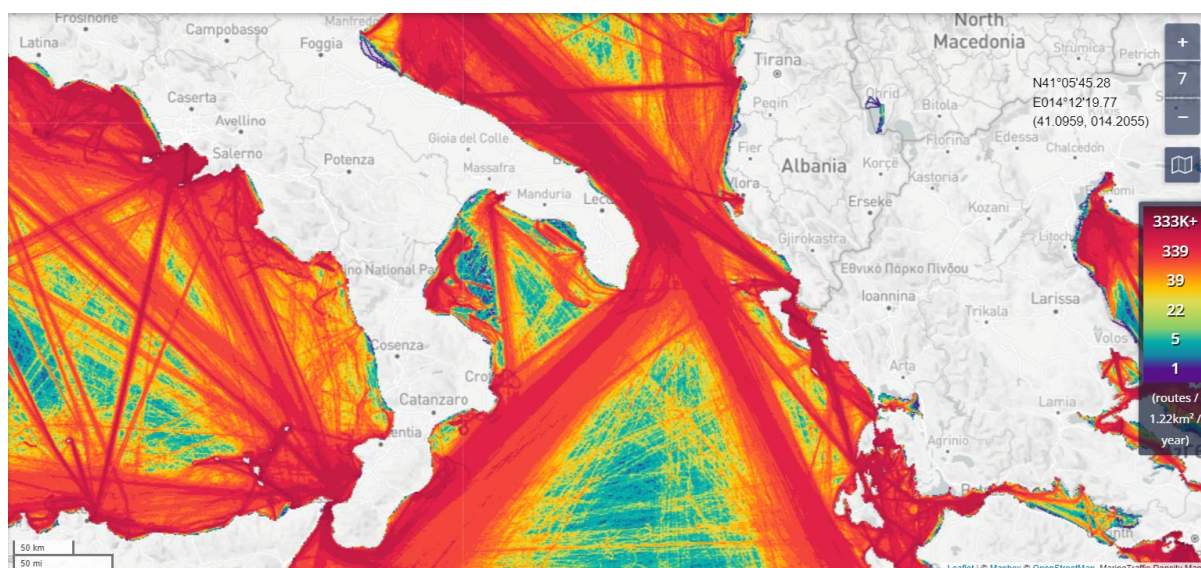


Figura 2. Traffico navale nel Mar Adriatico meridionale e Mar Ionio durante il 2021 (sorgente: marinetransport.com).

È ragionevole concludere che il rumore antropogenico di fondo nella regione d'interesse proviene principalmente dal traffico navale, caratterizzato soprattutto dal trasporto industriale.

Non essendo disponibili studi pubblicati sul soundscape marino dell'area interessata dal Progetto, è possibile riferirsi solamente a studi effettuati in acque limitrofe quali l'Adriatico settentrionale (coste croate), il cui soundscape è stato descritto nella stagione primaverile e quella estiva. Durante la primavera sono stati riportati livelli di pressione sonora L_p (finestra temporale di 20 secondi) per la maggior parte inferiori ai 95 dB re 1 μPa nella banda di frequenze 63-2000 Hz. Questo valore viene ecceduto durante l'estate per via del rumore addizionale causato da imbarcazioni impegnate in attività turistiche. Similmente i valori di L_p nella banda di frequenza 2-20 kHz risultano superiori ai 105 dB re 1 μPa durante la stagione estiva (Picciulin et al. 2022).

Dati sul rumore di fondo sono stati acquisiti sul campo dal Centro Interdisciplinare per la Bioacustica (CIBRA) per un periodo di 24 ore nel mese di maggio 2023. I livelli di pressione sonora L_p (finestra temporale di 10 secondi) nella banda di frequenza 10Hz-22kHz hanno un valore medio di 125 dB re 1 μPa (L_p mediano di 119 dB re 1 μPa). I valori mediani sono utilizzati come livello di riferimento per il rumore di fondo nel calcolo della relativa eccedenza delle soglie di impatto comportamentale.

1.3. Criteri per la valutazione degli impatti sui mammiferi marini

Lo studio è focalizzato sull'impatto comportamentale del rumore subacqueo sui mammiferi marini, in quanto in Italia la Direttiva Habitat (Direttiva 92/43/CEE del Consiglio del 21 maggio 1992 recepita tramite il Regolamento D.P.R. 8 settembre 1997 n. 357) vieta di perturbare deliberatamente le specie tipo i cetacei elencati nell'Allegato IV di tale direttiva.

Le specie di mammiferi marini elencate nella Tabella 1 sono state riscontrate nel mar Mediterraneo (Gnone et al. 2023). Nell'area meridionale della Puglia sono inoltre stati registrati in epoca recente degli avvistamenti di foca monaca (*Monachus monachus*) che era considerata estinta (Bundone et al. 2019). I valori soglia che possono originare le prime significative risposte comportamentali nelle specie di mammiferi marini considerate in questa relazione fanno riferimento alle linee guida italiane di Borsani and Farchi (2011) sullo studio e la regolamentazione del rumore (Tabella 2). Sebbene studi più recenti sull'impatto del rumore antropogenico siano stati pubblicati (Southall et al. 2019, Southall et al. 2021), questi non sono attualmente considerati dalla normativa italiana.

Tabella 1. Specie di cetacei note per essere presenti nel mar Mediterraneo e il loro stato di conservazione. LF = low frequency (bassa frequenza) e MF = mid-frequency (media frequenza). Le specie più comunemente riscontrate nell'area del Progetto sono evidenziate in grassetto.

Nome comune	Nome scientifico	IUCN status 2022	Gruppo uditivo (Borsani and Farchi 2011)
Misticeti			
Balenottera minore ¹	<i>Balaenoptera acutorostrata</i>	Vulnerabile (VU)	LF
Balenottera comune	<i>Balaenoptera physalus</i>	Minacciata (EN)	LF
Odontoceti			
Delfino comune¹	<i>Delphinus delphis</i>	In via di estinzione (EN)	MF
Stenella striata	<i>Stenella coeruleoalba</i>	Minima preoccupazione (LC)	MF
Tursiope	<i>Tursiops truncatus</i>	Minima preoccupazione (LC)	MF
Grampo¹	<i>Grampus griseus</i>	Dati carenti (DD)	MF
Globicefalo	<i>Globicephala melas</i>	Dati carenti (DD)	MF
Capodoglio	<i>Physeter macrocephalus</i>	In via di estinzione (EN)	MF
Zifio	<i>Ziphius cavirostris</i>	Near threatened (NT)	MF
Mesoplodonte di Sowerby ¹	<i>Mesoplodon bidens</i>	Non applicabile (NA)	MF
Steno ¹	<i>Steno bredanensis</i>	Non applicabile (NA)	MF
Focena	<i>Phocoena phocoena relicta</i>	Non applicabile (NA)	HF

¹ Rara

Tabella 2. Valori soglia capaci di originare le prime significative risposte comportamentali in diverse specie di mammiferi marini come riportati in Borsani and Farchi (2011).

Specie	Livello ricevuto per impulsi singoli SEL cumulativo (dB re 1 μ Pa ² s)	Livello ricevuto per rumore non impulsivo Lp (dB re 1 μ Pa)
Balenottera minore Balenottera comune	183 (ponderato LF, Southall 2007)	100-110
Delfino comune Stenella striata Tursiope Grampo Capodoglio	183 (ponderato MF, Southall 2007)	110-120

2. Metodi

Questo capitolo descrive i metodi utilizzati per stimare i livelli di sorgente (sezione 2.1), effettuare la propagazione del suono in mare (sezione 2.2), e stimare le distanze di impatto sui mammiferi marini che potrebbero essere presenti nell'area (sezione 2.3). I parametri ambientali usati come input nel modello sono specificati nella sezione 2.4.

2.1. Stima dei livelli di sorgente

Per la fase di costruzione, i livelli di sorgente sono stati stimati utilizzando il modello pile-driving source model (PDSM) della JASCO (MacGillivray 2014) convalidato da molteplici misure sul campo e tramite il progetto COMPILE (Lippert et al. 2016, Lippert et al. 2017). Gli input utilizzati dal modello sono riassunti nella Tabella 3 e lo spettro del livello sonoro generato, riferito a 10m dalla sorgente, è presentato nella Figura 3. Il rumore generato dall'attività di battipali è di tipo impulsivo.

Tabella 3. Input relativi alla procedura di infissione dei pali previsti come scenario peggiore per l'installazione di un'ancora presso Barium Bay.

	Caratteristica	Dimensione
Martello (tipo Menck MHU 550S)	Peso del pistone	30.2 t
	Peso dell'incudine	24160 kg
	Energia massima	550 kJ
Palo	Diametro	1.3 m
	Spessore	100 mm
	Lunghezza	25 m
	Auto penetrazione	6 m
	Penetrazione finale	24 m

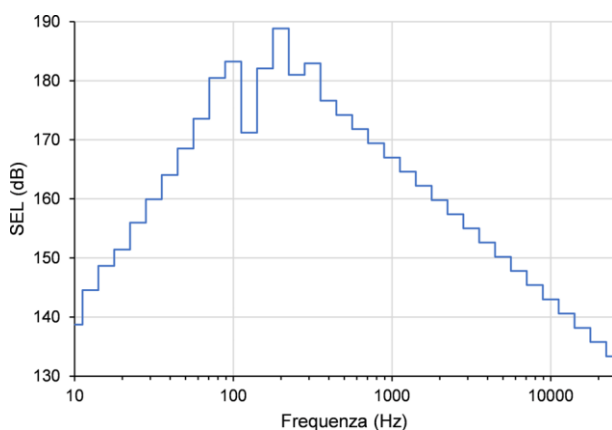


Figura 3. *Costruzione (infissione di pali):* spettro dei livelli (SEL per un singolo impulso) in bande in terzi di ottava (sulla banda di frequenze da 10 Hz a 25 kHz) riferiti a 10m dalla sorgente. Trattandosi di una sorgente lineare (anziché puntiforme) non è possibile parlare di livello di sorgente.

Per la fase operativa, il profilo spettrale mediano di una turbina derivato da misurazioni effettuate presso un parco eolico galleggiante è stato utilizzato come input per ottenere i livelli di sorgente. Nessuno studio direttamente utilizzabile è stato finora pubblicato su misurazioni effettuate su turbine con fondamenta identiche a quelle selezionate per questo progetto; il riferimento più attinente è quello delle misurazioni effettuate presso la Kinkardine wind farm, un parco eolico galleggiante con aerogeneratori da 9.5MW installati su una struttura galleggiante semi-sommersa a tre torri cilindriche

(simile a quella proposta per Bari) in un'area in cui la batimetria varia da 60 a 80 m (Risch et al. 2023) (Figura 4).

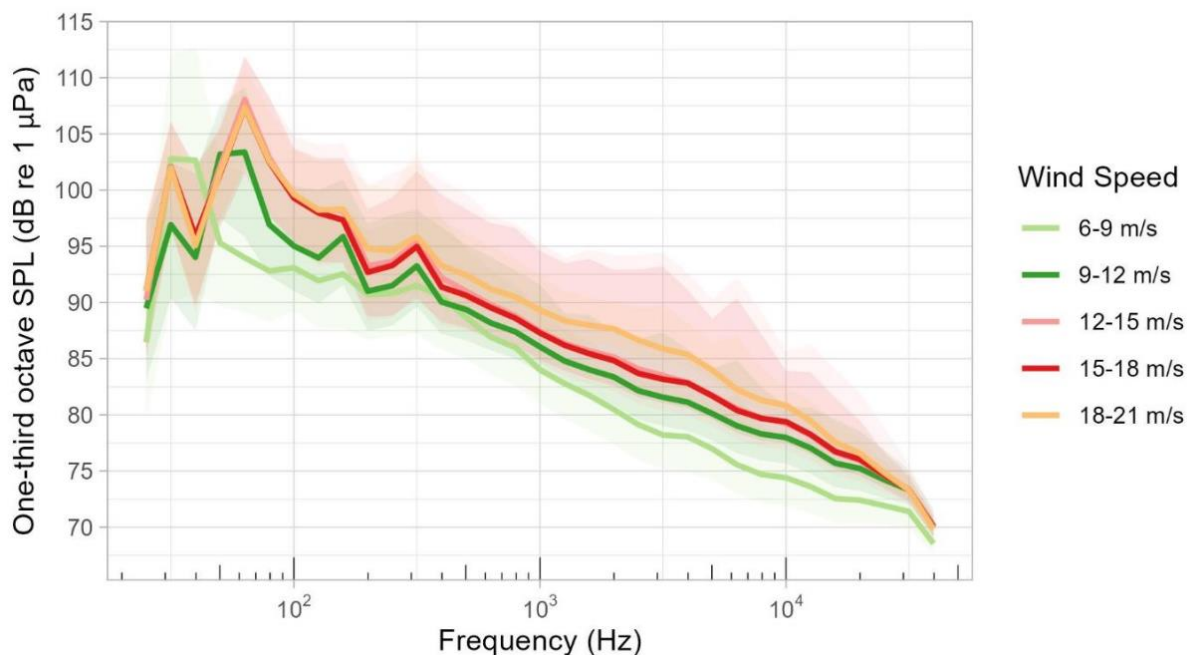


Figura 4. Densità spettrale di potenza in bande di terzi di ottava (bande comprese fra i 25 Hz e i 20kHz) per le registrazioni effettuate fra Nov-Dec 2021 a 200m da una turbina del parco eolico Kinkardine (misurazioni e analisi effettuate da SAMS (Risch et al. 2023)).

I livelli di sorgente utilizzati nel modello, presentati nella Figura 5, sono stati calcolati dalla JASCO applicando una legge di propagazione sferica a misure fatte a 200m dalla sorgente, in quanto i livelli di sorgente presentati in Risch et al. (2023) non considerano la componente di rumore associata con gli ormeggi delle turbine galleggianti. Lo spettro dei livelli di sorgente calcolati dalla JASCO include i rumori causati dal movimento degli ormeggi (tipo "scricchiolii", "scatti" e "sferragliamenti") e il funzionamento saltuario delle pompe per equilibrare la struttura, in aggiunta alle componenti tonali prodotte dai meccanismi della turbina e trasmesse in acqua dalla colonna portante. Ai fini di modellizzare la propagazione sonora la sorgente è considerata puntiforme, a una profondità di 10m. Il rumore delle turbine operative, incluso il contributo dei rumori a banda larga degli ormeggi, è di tipo continuo come dimostrato da Burns et al. (2022) e confermato in Risch et al. (2023).

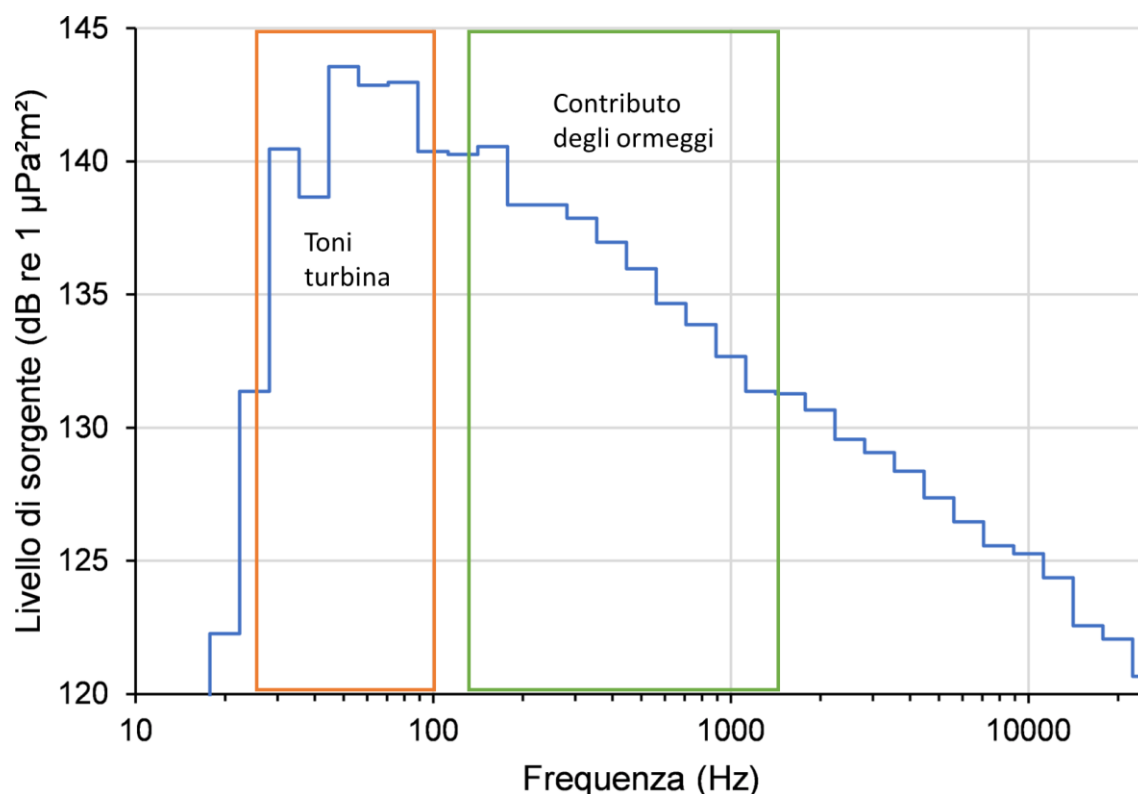


Figura 5. Fase di esercizio - spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello corrispondente a un livello a banda larga di 152 dB re $1\mu\text{Pa}^2\text{m}^2$ (10Hz-22kHz).

Per entrambe le fasi il sito della modellizzazione è stato scelto considerando il caso più cautelativo (maggiore propagazione del suono) in base alla batimetria; inoltre, per la fase di operazione si è modellizzato un ulteriore sito che fosse rappresentativo della profondità del fondale per la maggior parte del parco eolico; le coordinate di tali punti sorgente sono elencate nella Tabella 4 .

Per la stima delle distanze di impatto per i mammiferi marini per il parco eolico operativo, tali sorgenti sono state replicate per rappresentare il numero totale delle turbine, in base alla batimetria di ogni singola turbina.

Tabella 4. Descrizione dei due siti usati come sorgenti per la modellizzazione.

Sito	Latitude (dd mm ss.ssss) N	Longitude (dd mm ss.ssss) E	Easting utmz 34N	Northing utmz 34N	Profondità dell'acuaqa (m)
Caso più cautelativo	41° 34' 40.2900"	16° 59' 13.9443"	665663	4604815	190
Caso più rappresentativo	41° 36' 11.8633"	16° 53' 59.0276"	658308	4607475	150

2.2. Modellizzazione della propagazione del suono

La propagazione del suono è stata modellizzata utilizzando il software MONM-Bellhop sviluppato dalla JASCO, che è descritto in maggiore dettaglio nell'Appendice B. Questo tipo di modello combina l'utilizzo dell'equazione parabolica per le basse frequenze e del ray-tracing per le frequenze sopra 2kHz. La scelta è motivata dal fatto che nelle acque relativamente poco profonde (meno di 150m) in cui si trova il progetto, questo modello ibrido risulta essere il più accurato come ampiamente discusso nella letteratura scientifica (Etter 2009, Farcas et al. 2016) (Figura 6).

Model Type	Shallow Water				Deep Water					Not applicable
	Low Frequency		High Frequency		Low Frequency		High Frequency			
	Range Ind.	Range Dep.	Range Ind.	Range Dep.	Range Ind.	Range Dep.	Range Ind.	Range Dep.		
Simple energy spreading	■	■	■	■	■	■	■	■	■	Limited in accuracy or speed of execution
Ray Theory			■	■	■	■	■	■	■	Accurate and practical
Parabolic equation	■	■			■	■	■	■		
Normal mode	■	■	■	■	■	■	■	■		
Wave number integration	■	■	■	■	■	■	■	■		

Figura 6. Sintesi dei tipi di modello e della loro applicabilità e accuratezza in base a vari scenari ((JASCO Applied Sciences 2019), adattato da Etter 2009).

2.3. Stima dell’impatto sui mammiferi marini

I contorni planari del livello sonoro sono calcolati partendo dai campi tridimensionali di livelli acustici stimati dai modelli di propagazione ed assegnando ad ogni posizione geografica nella regione d’interesse il livello massimo su tutte le sottostanti profondità modellizzate.

Le distanze a cui livelli specifici vengono raggiunti sono calcolate da questi contorni. Per ogni livello sonoro d’interesse sono riportate due distanze relative alla sorgente: (1) R_{max} , la portata massima di un certo livello sonoro in qualsiasi direzione, e (2) $R_{95\%}$, la portata di quel livello sonoro dopo che il 5% dei punti più lontani sono stati esclusi (vedi esempi in Figura 7).

L’ $R_{95\%}$ viene utilizzato perché i contorni del livello sonoro sono spesso di forma irregolare. In alcuni casi, un contorno potrebbe presentare piccole sporgenze o frange isolate anomale. Ciò è dimostrato nell’esempio a sinistra in Figura 7. In casi come questo, R_{max} può sovrastimare incorrettamente l’estesa della regione esposta a tali livelli e $R_{95\%}$ è considerato più rappresentativo. Al contrario, in casi di forte asimmetria radiale come mostrato a destra nella Figura 7, $R_{95\%}$ trascura sostanziali sporgenze nella distribuzione del livello sonoro, e R_{max} può rappresentare meglio la regione di effetto in certe direzioni. Casi come questo sono solitamente associati a proprietà della batimetria che influenzano notevolmente la propagazione del suono. La differenza tra R_{max} e $R_{95\%}$ dipende sia dalla direttività della sorgente che dalla non uniformità dell’ambiente acustico.

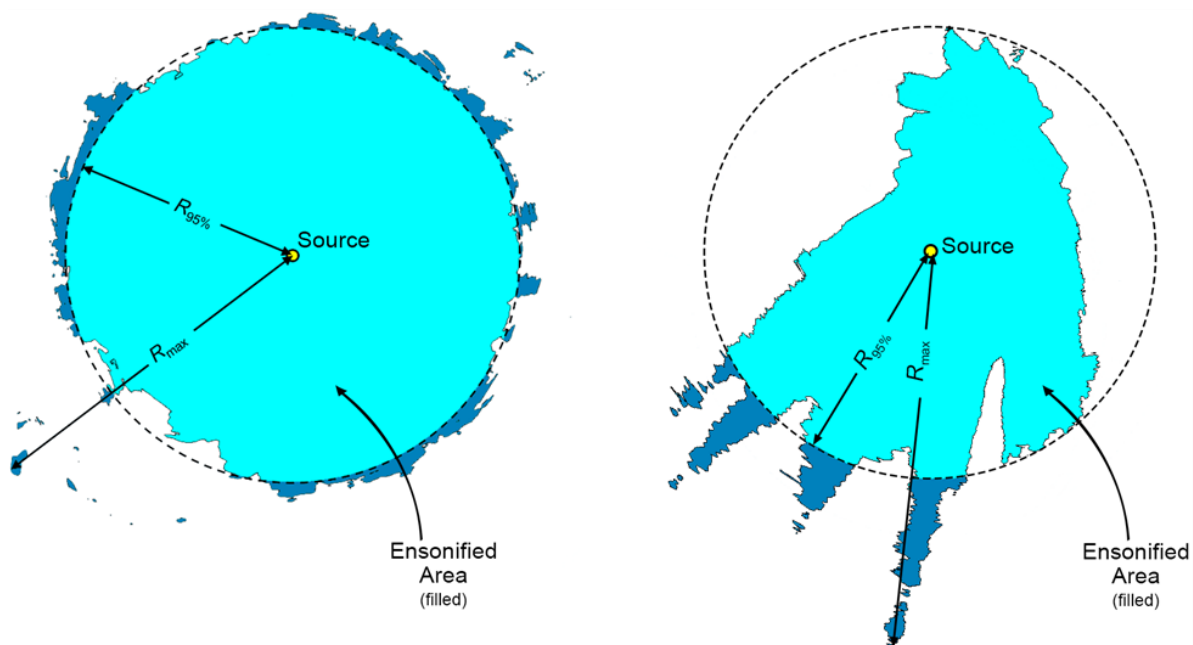


Figura 7. Esempi di aree insonificate al di sopra di un certo livello sonoro con le distanze R_{max} e $R_{95\%}$ dimostrate per due scenari differenti: (sinistra) una distribuzione del livello sonoro radialmente simmetrica con piccole sporgenze, per la quale $R_{95\%}$ meglio rappresenta l'area insonificata effettiva; e (destra) una distribuzione di livello sonoro fortemente asimmetrica con lunghe sporgenze, per la quale R_{max} meglio rappresenta le aree insonificate in alcune direzioni. L'azzurro indica le aree insonificate delimitate da $R_{95\%}$; il blu più scuro indica le regioni limitrofe che determinano R_{max} .

Parametri Ambientali

2.4.1. Profilo della velocità del suono

Il profilo di velocità del suono in acqua per gli scenari modellizzati è stato derivato dai dati storici di osservazione utilizzando i profili di temperatura e salinità del US Naval Oceanographic Office's *Generalized Digital Environmental Model V 3.0* (GDEM; Teague et al. 1990, Carnes 2009). GDEM fornisce una climatologia oceanica di temperatura e salinità per gli oceani del mondo su una griglia latitudine-longitudine con una risoluzione di $0,25^\circ$, con una risoluzione temporale di un mese, basata su osservazioni storiche globali del Master Oceanographic Observational Data Set (MOODS) della Marina degli Stati Uniti. I profili climatologici includono 39 punti di profondità fissi fino a una profondità massima di 2800 m. I profili di temperatura-salinità GDEM sono stati convertiti in profili di velocità del suono secondo la formula di Coppens (1981).

Un profilo medio mensile di velocità del suono è stato analizzato per ogni mese dell'anno per determinare quale fosse il profilo che favorisse maggiormente la propagazione del suono sulle lunghe distanze, rappresentativo dello scenario più cautelativo. Tale profilo, corrispondente al mese di febbraio, è stato scelto per la modellizzazione data la velocità quasi isotropa con propagazione leggermente rifrangente verso l'alto (Figura 8).

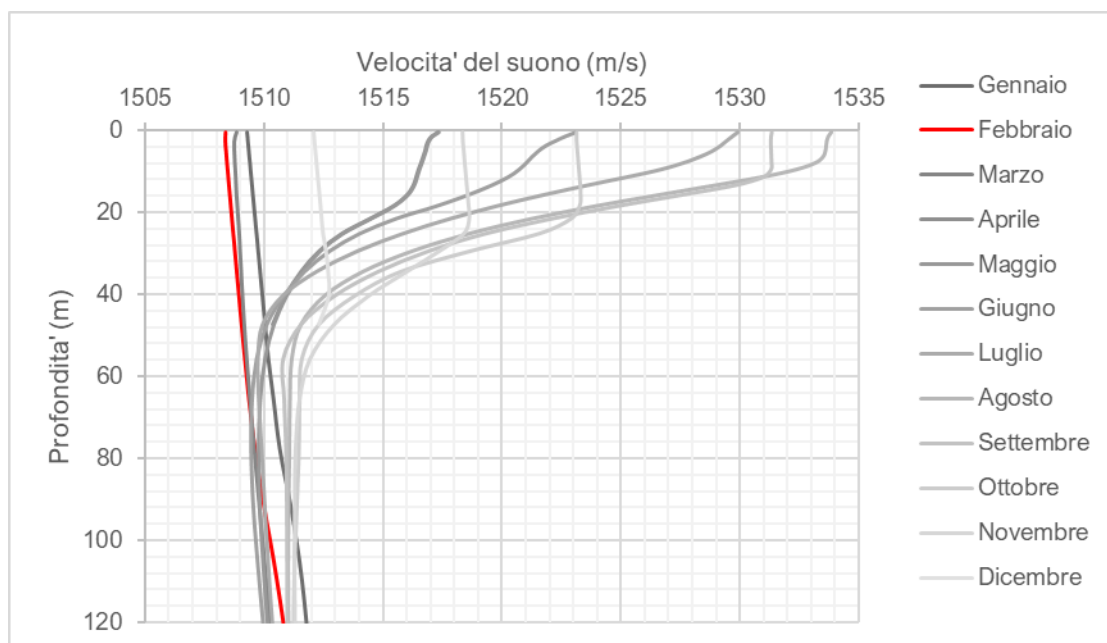


Figura 8. Profilo della velocità del suono utilizzato per la modellizzazione (in rosso) e per i rimanenti mesi dell'anno.

2.4.2. Batimetria

Le profondità dell'acqua in tutta l'area modellizzata sono state estratte dalla griglia batimetrica europea EMODNET (EMODnet Bathymetry Consortium 2020), generata per i bacini marittimi europei con risoluzione di 100 m × 100 m.

I dati di batimetria per un'area di circa 175 × 200 km sono stati estratti e ricampionati, mediante griglia di curvatura minima, su una proiezione di coordinate universale trasversa di Mercatore (UTM) nella zona 33N.

2.4.3. Geoacustica

Il profilo dei parametri geoacustici in funzione della profondità sotto il suolo è stato calcolato dai valori di Hamilton (1980) per l'onda di compressione e in base a Holzer et al. (2005) per la velocità e Buckingham (2005) per l'attenuazione dell'onda trasversale, ed è presentato nella Tabella 5. Il modello MONM-Bellhop utilizzato in questo studio considera solo le proprietà delle onde trasversali dello strato superficiale; questi valori sono quindi considerati costanti nel profilo.

Tabella 5. Profilo geoacustico stimato per il sito modellizzato. All'interno di ogni intervallo di profondità, ogni parametro varia linearmente all'interno dell'intervallo indicato. L'onda di compressione (P) è l'onda primaria. L'onda trasversale (S) è l'onda secondaria.

Profondità sotto il suolo (m)	Materiale	Densità	Onda di compressione		Onda trasversale	
		(g/cm ³)	Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)	Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)
0	Sabbia-limo-argilla	0.23	1561	1.6	289.8	1.39
100		0.88	1684.2	1.73		
200		1.26	1794.2	1.85		
300		0.93	1892.4	1.96		
400		0.91	1980.5	2.06		
500		0.88	2059.8	2.14		
600		0.85	2132.1	2.22		
700		0.83	2198.8	2.28		
800		0.82	2261.5	2.33		
900		0.81	2321.7	2.37		
1000		0.81	2381	2.38		

3. Risultati

L'impatto del rumore sui mammiferi marini è stato valutato con riguardo al disturbo comportamentale per le fasi di costruzione ed esercizio del campo eolico. Le distanze a cui le soglie descritte in (2011) vengono superati sono presentate nella Tabella 6 per l'infissione dei pali e nella Tabella 7 e nella Figura 9 per la fase di esercizio. Le distanze di impatto sono presentate in termini del livello sonoro massimizzato su tutte le profondità, tanto come distanza massima (R_{max}) che come $R_{95\%}$; quest'ultima è generalmente più rappresentativa della distribuzione planare dei livelli.

La soglia di disturbo comportamentale, corrispondente a un SEL ponderato di 183 dB re 1 μPa^2s , per l'impulso singolo generato dall'attività di battipalo all'energia massima prevista di 550kJ non è ecceduta per la fase di costruzione per nessuno dei due gruppi uditivi a cui appartengono le specie potenzialmente presenti nell'area di studio. Per completezza, dato che le linee guida di Borsani e Farchi (2011) fanno riferimento ai valori descritti in Southall et al. (2007), sono stati calcolati anche i valori corrispondenti a L_{peak} ; anch'essi non vengono ecceduti.

Per la fase di esercizio la modellizzazione eseguita per le turbine operative individuali mostra che le distanze d'impatto non ponderate sono di qualche metro più lunghe per il sito più profondo che per il caso più rappresentativo del parco (profondità media). Per entrambi i siti, la prima soglia di disturbo comportamentale è al di sotto di 1km per le balenottere (L_p di 100 dB re 1 μPa) e di 200 metri per i delfini e i capodogli (L_p di 110 dB re 1 μPa), facendo riferimento al valore più basso per l'insorgenza del disturbo secondo Borsani and Farchi (2011). Considerando invece la totalità del parco eolico costituito da 76 aerogeneratori, i valori di $R_{95\%}$ riportati nella Tabella 7 mostrano che l' L_p di 100 dB re 1 μPa viene ecceduto fino a 4.4km e l' L_p di 110 dB re 1 μPa entro 220 metri. La mappa mostra che la propagazione avviene in maniera simmetrica per tutto il parco eolico. L'eccedenza del rumore generato dal parco eolico rispetto al livello ambientale misurato sul campo (L_p di 119 dB re 1 μPa , finestra temporale di 10 secondi) è inoltre presentato nella mappa. Da questo si evince come il rumore generato da ogni turbina rimanga al di sopra del livello di rumore ambientale soltanto in una zona circoscritta localmente; ciò fa prevedere che i rumori (toni e scricchiolii e cigolii delle catenarie) siano discernibili dal rumore di fondo solo entro meno di 100 metri dal relativo aerogeneratore.

Tabella 6. Fase di costruzione: raggi che eccedono la soglia (in grassetto) corrispondente alle prime significative risposte comportamentali (rumore impulsivo) per le specie di mammiferi marini presenti nell'area di studio ((Borsani and Farchi 2011).

Gruppo uditivo	Metrica	Livello soglia	Costruzione Palo individuale	
			Caso peggiore	
			Rmax (km) 10Hz-25kHz	R95 (km) 10Hz-25kHz
Cetacei LF	Lpeak (dB re 1μPa)	224	0.00	0.00
	SEL ponderato (dB re 1μPa²s)	183	0.00	0.00
Cetacei MF	Lpeak (dB re 1μPa)	224	0.00	0.00
	SEL ponderato (dB re 1μPa²s)	183	0.00	0.00
Non applicabile	SEL non ponderato (dB re 1μPa ² s)	183	0.05	0.05

Tabella 7. Fase di esercizio: raggi che eccedono le soglie (in grassetto) corrispondenti alle prime significative risposte comportamentali (rumore continuo) per le specie di mammiferi marini presenti nell'area di studio ((Borsani and Farchi 2011). I raggi di impatto sono presentati per le due turbine individuali modellizzate e per l'intero parco eolico.

L _p non ponderato (dB re 1 μPa)	Fase di Esercizio Turbina individuale		Fase di Esercizio Turbina individuale		Fase di Esercizio Intero parco eolico	
	Caso peggiore		Caso rappresentativo			
	Rmax (km) 10Hz- 25kHz	R95 (km) 10Hz- 25kHz	Rmax (km) 10Hz- 25kHz	R95 (km) 10Hz- 25kHz	Rmax (km) 10Hz- 25kHz	R95 (km) 10Hz- 25kHz
150	<0.01	<0.01	<0.01	<0.01	0.02	0.02
140	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
130	0.01	0.01	0.01	0.01	0.03	0.03
120	0.07	0.07	0.07	0.07	0.07	0.06
110	0.18	0.18	0.18	0.18	0.27	0.22
100	0.97	0.93	0.91	0.86	6.07	4.44

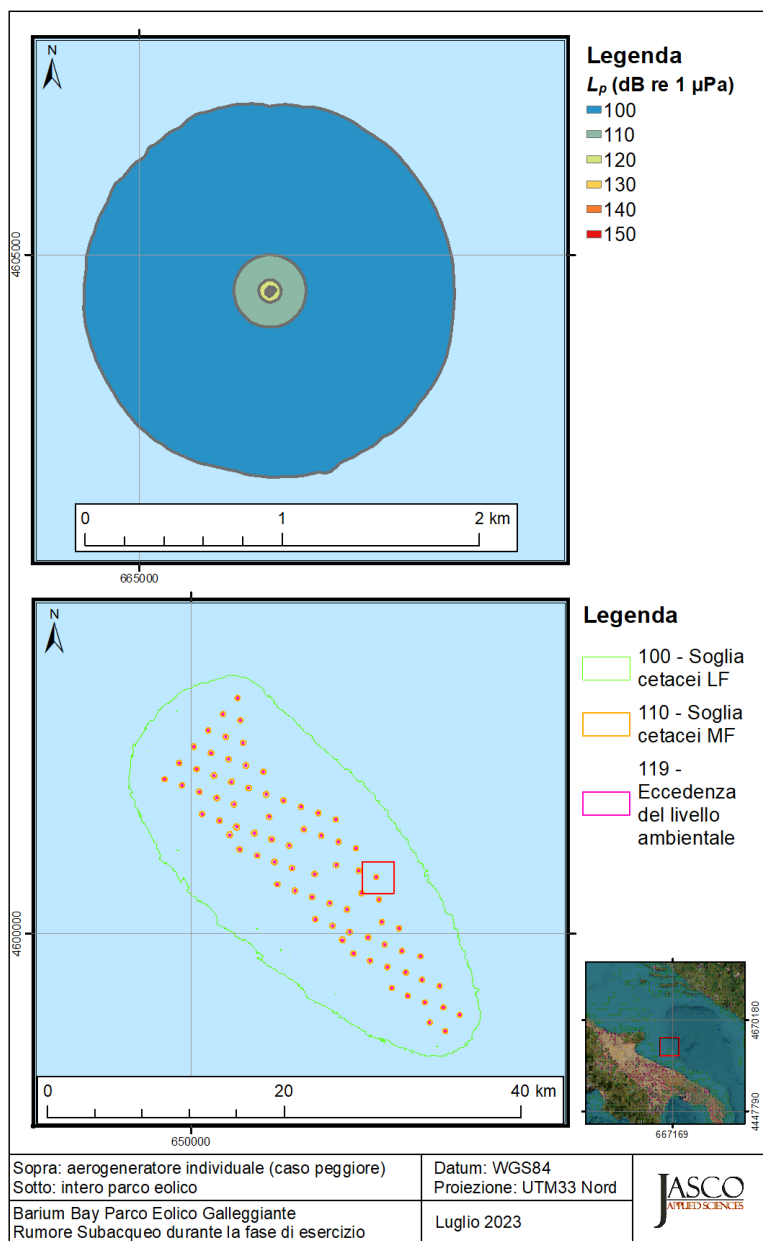


Figura 9. Fase di esercizio: mappe della distanza alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini per una turbina singola (in alto) e per l'intero parco eolico con riferimento all'eccedenza del livello di rumore di fondo ambientale (in basso).

4. Discussione e Conclusioni

Lo scopo del presente studio è stato di definire e caratterizzare i livelli di sorgente associati con le attività più rumorose previste per le diverse fasi del progetto del parco eolico galleggiante offshore Barium Bay e di modellizzare le distanze di potenziale impatto sui mammiferi marini che possono essere presenti nell'area.

Le due attività selezionate per la modellizzazione sono state l'installazione delle ancore degli aerogeneratori (fase di costruzione) e l'operazione regolare degli aerogeneratori durante l'esercizio del parco eolico. Entrambe sono state modellizzate con un profilo della propagazione del suono corrispondente al mese di febbraio che è considerato il più favorevole per la diffusione su lunghe distanze; in altre parole, si ritiene che questo scenario rappresenti il caso più cautelativo per la lunghezza dei raggi di impatto calcolati.

La definizione dei livelli di sorgente per l'attività dei battipali ha utilizzato input basati sullo studio ingegneristico per il progetto e considerando il peggiore dei casi, cioè l'utilizzo della massima energia per l'infissione di 550kJ. I pali previsti sono di piccole dimensioni e dunque non è sorprendente che i livelli soglia per il disturbo comportamentale non siano ecceduti. L'attività di costruzione prevede ovviamente la presenza di almeno una nave di supporto dalla quale si effettuerà l'infissione dei pali. Basandosi sul presupposto che la nave utilizzata sia di tipo jack-up, e quindi totalmente fissa sopra il livello dell'acqua durante la costruzione, si prevede che la nave non contribuisca al rumore subacqueo se non durante l'arrivo presso il parco eolico, la transizione da un sito ad un altro e il rientro in porto.

I livelli di sorgente calcolati dalla JASCO sulle misurazioni effettuate da SAMS per le turbine operative semi-sommersibili del parco eolico Kinkardine sono stati usati come input per la modellizzazione del parco operativo. Lo spettro utilizzato include dunque tutti i tipi di rumore associati con questo tipo di galleggiante e la relativa turbina, cioè il rumore dei sistemi di ancoraggio, delle pompe operative e dei generatori.

Il rumore sottomarino operativo è leggermente superiore al suono ambientale per le turbine individuali e il parco complessivo; tuttavia, i livelli sonori scendono ai livelli ambientali (cioè sotto un L_p di 119 dB re 1 μ Pa calcolato su 10 secondi) entro pochi metri dalla sorgente. Inoltre, entro meno di 1 km dalla turbina i livelli scendono di altri 10 dB. Questi risultati sono coerenti con quanto riportato in altri studi (Kraus et al. 2016, HDR 2019). Eventuali cambiamenti comportamentali causati dall'esposizione ai suoni subacquei dovrebbero essere a breve termine e localizzati in aree limitrofe agli aerogeneratori.

Una limitazione della modellizzazione effettuata è il fatto che i livelli di sorgente non sono stati adattati alle caratteristiche delle turbine; ad esempio, è noto che i toni a basse frequenze sono correlati alle caratteristiche della turbina, tipo il numero di poli del generatore e il numero di rotazioni al minuto, o le caratteristiche delle pompe per le zavorre. Dato che poche misure sono attualmente disponibili su questi sistemi galleggianti, nessuna delle quali è esattamente comparabile ad un'altra, e data la presenza di molteplici sorgenti, non è possibile corroborare con affidabilità uno spettro dei livelli di sorgente basandosi solo sugli input ingegneristici. Pertanto, le misurazioni sul campo di sistemi strutturalmente simili sono state ritenute il proxy migliore per questo tipo di sorgente. Inoltre, lo studio condotto presso Hywind Scotland (Burns et al. 2022) ha dimostrato che non è possibile predire né un segnale caratteristico nominale di una soluzione di ancoraggio, che invece può variare da turbina a turbina, né il suo livello assoluto, che comunque è di minore entità rispetto al rumore tonale continuo.

Glossario dei termini acustici

1/3-ottava

Un terzo di **ottava**. *Nota*: un terzo di ottava è approssimativamente uguale a un **decidecade** ($1/3 \text{ oct} \approx 1.003 \text{ ddec}$).

1/3-banda-di-ottava

Banda di **frequenza** la cui **larghezza** è un **1/3-ottava**. *Nota*: la larghezza di banda di una banda di un terzo d'**ottava** aumenta con l'aumento della frequenza centrale.

90%-energia nella finestra temporale

L'intervallo di tempo durante il quale l'energia cumulativa aumenta dal 5 al 95% dell'energia totale dell'impulso. Questo intervallo contiene il 90% dell'energia totale dell'impulso. Unità: secondo (s). Simbolo: T_{90} .

90% livello di pressione sonora (90% SPL)

Il **livello di pressione sonora** calcolato sulla **90%-energia nella finestra temporale** di un impulso.

assorbimento

La riduzione dell'ampiezza della **pressione sonora** dovuta all'energia del movimento delle particelle acustiche che si converte in calore nel mezzo di propagazione.

attenuazione

La graduale perdita di energia acustica per **assorbimento** e diffusione mentre il suono si propaga attraverso un mezzo.

banda di decidecade

Banda di **frequenza** la cui **larghezza** è un decimo. *Nota*: la larghezza di una banda di **decidecade** aumenta con l'aumentare della frequenza centrale.

campo sonoro

Regione contenente onde sonore.

cetaceo

Un animale dell'ordine Cetacea. Queste sono specie acquatiche e includono balene, delfini e focene.

decade

Intervallo di **frequenza** logaritmico il cui limite superiore è dieci volte maggiore del suo limite inferiore (ISO 80000-3:2006).

decibel (dB)

Unità di **livello** utilizzata per esprimere il rapporto tra un valore di una grandezza di potenza e un altro su scala logaritmica.

decidecade

Un decimo di **decade**. Una **decidecade** è approssimativamente uguale a un terzo di **ottava** ($1 \text{ ddec} \approx 0,3322 \text{ ott}$) e per questo motivo viene talvolta chiamato "**1/3-ottava**".

energia livello di sorgente

Proprietà di una sorgente sonora ottenuta sommando al **livello di esposizione sonora** misurato nel campo lontano la perdita di propagazione dal centro acustico della sorgente alla posizione del ricevitore. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento: $1 \mu\text{Pa}^2 \text{m}^2 \text{s}$.

energia densità spettrale

Rapporto tra energia (quadrato integrato nel tempo di una variabile di campo specificata) e **frequenza** in una banda di **frequenza** specificata da f_1 a f_2 . In forma di equazione, la densità spettrale di energia E_f è data da: $E_f = 2 \int_{f_1}^{f_2} |X(f)|^2 df / f_2 - f_1$, dove $X(f)$ è la trasformata di Fourier della variabile $x(t)$:

$$X(f) = \int_{-\infty}^{+\infty} x(t) \exp(-2\pi i f t) dt .$$

La variabile $x(t)$ è una quantità scalare, come la **pressione sonora**. Può anche essere la grandezza o un componente specificato di una quantità vettoriale come lo spostamento delle particelle sonore, la velocità delle particelle sonore o l'accelerazione delle particelle sonore. L'unità di densità spettrale di energia dipende dalla natura di x , come segue:

- Se x = pressione sonora: $\text{Pa}^2 \text{s}/\text{Hz}$
- Se x = spostamento delle particelle sonore: $\text{m}^2 \text{s}/\text{Hz}$
- Se x = velocità delle particelle sonore: $(\text{m}/\text{s})^2 \text{s}/\text{Hz}$
- Se x = accelerazione delle particelle sonore: $(\text{m}/\text{s}^2)^2 \text{s}/\text{Hz}$

Nota: Il fattore due a destra dell'equazione per E_f è necessario per esprimere uno **spettro** simmetrico rispetto a $f = 0$, solo in termini di frequenze positive. Vedi voce 3.1.3.9 of ISO 18405 (2017).

esposizione sonora

Integrale temporale della **pressione sonora** al quadrato in un intervallo di tempo stabilito. L'intervallo di tempo può essere una durata specificata (ad es. 24 ore) o dall'inizio alla fine di un evento specificato (ad es. un colpo di palo, un impulso di fucile ad aria compressa, un'operazione di costruzione).

Unità: pascal al quadrato secondo ($\text{Pa}^2 \text{s}$). Simbolo: E .

frequenza

La velocità di oscillazione di una funzione periodica misurata in cicli per unità di tempo. Il reciproco del periodo. Unità: **hertz (Hz)**. Simbolo: f . 1 Hz è uguale a 1 ciclo al secondo.

funzione di ponderazione della frequenza

L'ampiezza al quadrato della funzione di trasferimento della **pressione sonora**. Per il suono di una data **frequenza**, la funzione di ponderazione della frequenza è il rapporto tra la potenza in uscita e la potenza in ingresso di un filtro specificato, talvolta espresso in decibel. Gli esempi includono quanto segue:

- *Funzione di ponderazione della frequenza uditiva:* funzione di ponderazione della frequenza compensativa che tiene conto della sensibilità uditiva specifica della frequenza di una specie (o di un **gruppo uditivo** funzionale).
- *Funzione di ponderazione della frequenza del sistema:* funzione di ponderazione della frequenza che descrive la sensibilità di un sistema di acquisizione acustica, tipicamente costituito da un idrofono, uno o più amplificatori e un convertitore analogico-digitale.

funzione di ponderazione della frequenza uditiva

Funzione di ponderazione della frequenza che descrive un approccio compensatorio che tiene conto della sensibilità uditiva specifica della **frequenza** di una specie (o di un **gruppo uditivo** funzionale).

geoacustica

Relativo alle proprietà acustiche del fondale marino.

gruppo uditivo

Categoria di specie animali se classificate in base alla loro sensibilità uditiva e alla suscettibilità al suono. Esempi di mammiferi marini includono cetacei a frequenza molto bassa (VLF), cetacei a bassa frequenza (LF), cetacei a media frequenza (MF), cetacei ad alta frequenza (HF), cetacei ad altissima frequenza (VHF), pinnipedi otaridi in acqua (OPW), pinnipedi focidi in acqua (PPW), sireniani (SI), altri carnivori marini nell'aria (OCA) e altri carnivori marini nell'acqua (OCW) (NMFS 2018, Southall et al. 2019). Vedi [funzione di ponderazione della frequenza](#), che sono spesso applicate a questi gruppi. Esempi di pesci includono specie per le quali la vescica natatoria è coinvolta nell'udito, specie per le quali la vescica natatoria non è coinvolta nell'udito e specie senza vescica natatoria (Popper et al. 2014).

hertz (Hz)

Un'unità di [frequenza](#) definita come un ciclo al secondo.

insonificato

Esposto a un suono.

livello

Una misura di una quantità espressa come logaritmo del rapporto tra la quantità e un valore di riferimento specificato di quella quantità. Ad esempio, un valore del [livello di pressione sonora](#) con riferimento a $1 \mu\text{Pa}^2$ può essere scritto nella forma $x \text{ dB re } 1 \mu\text{Pa}^2$.

livello a banda larga

Il [livello](#) totale misurato su un intervallo di [frequenza](#) specificato.

livello di esposizione sonora (SEL)

Il [livello](#) (L_E) dell'[esposizione sonora](#) (E) in una determinata banda di [frequenza](#) e finestra temporale: $L_E = 10 \log_{10}(E/E_0)$. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento (E_0) per il suono in acqua: $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}$.

livello di picco (PK), zero-to-peak sound pressure level

Il [livello](#) (L_{pk}) della [pressione sonora](#) quadratica massima (p_{pk}^2) in una determinata banda di [frequenza](#) e finestra temporale. Definito come $L_{pk} = 10 \log_{10}(p_{pk}^2/p_0^2) = 20 \log_{10}(p_{pk}/p_0)$. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento (p_0^2) per il suono in acqua: $1 \mu\text{Pa}^2$.

livello di pressione sonora (SPL), rms sound pressure level

Il [livello](#) (L_p) della [pressione sonora](#) quadratica media del tempo (p_{rms}^2) in una determinata banda di [frequenza](#) e finestra temporale: $L_p = 10 \log_{10}(p_{rms}^2/p_0^2) = 20 \log_{10}(p_{rms}/p_0)$, dove rms è l'abbreviazione di root-mean-square. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento (p_0^2) per il suono in acqua: $1 \mu\text{Pa}^2$.

livello di sorgente di densità spettrale di energia

Proprietà di una sorgente sonora uguale al [livello](#) di [energia densità spettrale](#) della [pressione sonora](#) misurata nel [campo sonoro](#) più la [propagation loss](#) dal centro acustico della sorgente alla posizione del ricevitore. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento: $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ m}^2 \text{ s/Hz}$.

livello di sorgente source level (SL)

Proprietà di una sorgente sonora ottenuta sommando al **livello di pressione sonora** misurato nel **campo sonoro** la perdita di propagazione dal centro acustico della sorgente alla posizione del ricevitore. Unità: decibel (dB). Valore di riferimento: $1 \mu\text{Pa}^2 \text{m}^2$.

livello ricevuto

Il **livello** misurato (o che verrebbe misurato) in una posizione definita. Il tipo di livello dovrebbe essere specificato.

low-frequency (LF) cetaceans

Vedi **gruppo uditivo**.

lunghezza d'onda

Distanza sulla quale un'onda completa un ciclo di oscillazione. Unità: metro (m). Simbolo: λ .

mascheramento

Oscuramento di suoni di interesse da suoni a frequenze simili.

mediana

Il 50° percentile di una distribuzione statistica.

mid-frequency (MF) cetaceans

Vedi **gruppo uditivo**.

misticete

Un sottordine di cetacei che utilizzano fanoni per filtrare il cibo dall'acqua. I membri di questo gruppo includono rorquali (*Balaenopteridae*), balene franche (*Balaenidae*) e balene grigie (*Eschrichtius robustus*).

M-weighting

Un insieme di **funzione di ponderazione della frequenza uditiva** proposte da Southall et al. (2007).

non ponderato

Termine che indica che non viene applicata alcuna **funzione di ponderazione della frequenza**.

odontocete

La presenza dei denti, anziché dei fanoni, caratterizza queste balene. I membri degli Odontoceti sono un sottordine di cetacei, un gruppo composto da balene, delfini e focene. I crani delle balene dentate sono per lo più asimmetrici, un adattamento per la loro ecolocalizzazione. Questo gruppo comprende capodogli, orche, beluga, narvali, delfini e focene.

onda compressionale

Un'onda di vibrazione meccanica in cui la direzione del movimento delle particelle è parallela alla direzione di propagazione. Chiamata anche onda primaria o onda P. Le **onda di taglio** nel fondo del mare possono essere convertite in onda compressionale nell'acqua all'interfaccia acqua-fondale.

onda di taglio

Un'onda di vibrazione meccanica in cui la direzione del movimento delle particelle è perpendicolare alla direzione di propagazione. Chiamata anche onda secondaria o onda S. Le onde di taglio si

propagano solo in mezzi solidi, come sedimenti o roccia. Le onde di taglio nel fondo del mare possono essere convertite in **onda compressionale** nell'acqua all'interfaccia acqua-fondale.

ottava

L'intervallo tra un suono e un altro suono con doppia o metà della **frequenza**. Ad esempio, un'ottava sopra i 200 Hz è 400 Hz e un'ottava sotto i 200 Hz è 100 Hz.

permanent threshold shift (PTS)

Una perdita irreversibile della sensibilità uditiva causata da un'eccessiva esposizione al rumore. La PTS è considerata una lesione uditiva. Paragonare a **temporary threshold shift**.

ponderazione della frequenza uditiva

Il processo di applicazione di una **funzione di ponderazione della frequenza uditiva**. Nell'audiometria umana, la ponderazione C è la funzione più comunemente utilizzata, un esempio per i mammiferi marini sono le funzioni di ponderazione della frequenza uditiva pubblicate da Southall et al. (2007).

ponderazione in frequenza

Il processo di applicazione di una **funzione di ponderazione della frequenza**.

pressione sonora

Il contributo alla pressione totale causato dall'azione del suono. Unità: pascal (Pa). Simbolo: p .

pressione, acustica

La deviazione dalla pressione ambiente causata da un'onda sonora. Chiamato anche **pressione sonora**. Unità: pascal (Pa).

profilo di velocità del suono

La velocità del suono nella colonna d'acqua in funzione della profondità al di sotto della superficie dell'acqua.

propagation loss (PL)

Differenza fra un **livello di sorgente** (SL) e il **livello** in un luogo specificato, $PL(x) = SL - L(x)$. Unità: decibel (dB). Vedi anche **transmission loss**.

rumore di fondo

Combinazione di **suono di sottofondo**, self-noise acustico e riverbero del sonar. Il suono di sottofondo rilevato, misurato o registrato con un segnale fa parte del rumore di fondo.

sorgente puntiforme

Una sorgente che irradia il suono come da un unico punto.

suono di sottofondo

Suono che sarebbe presente in assenza di un'attività specifica, di solito un composto di suoni provenienti da molte fonti vicine e lontane, ad esempio navi da trasporto, attività sismica, precipitazioni, movimento del ghiaccio marino, azione delle onde e attività biologica.

spettro

Un segnale acustico rappresentato in termini di potenza, energia, **pressione sonora** quadratica media o distribuzione dell'**esposizione sonora** con la **frequenza**.

suono

Un disturbo variabile nel tempo nella pressione, nella sollecitazione o nello spostamento del materiale di un mezzo propagato dalla compressione e dall'espansione locali del mezzo.

suono continuo

Un suono il cui **livello di pressione sonora** rimane al di sopra del **rumore di fondo** durante il periodo di osservazione. Un suono che varia gradualmente di intensità nel tempo, ad esempio il suono di una nave marina.

suono impulsivo

Termine qualitativo che indica suoni che sono tipicamente transitori, brevi (meno di 1 secondo), a banda larga, con tempi di salita e decadimento rapidi. Possono verificarsi in ripetizione o come un singolo evento. Esempi di sorgenti sonore impulsive includono esplosivi, fucili ad aria compressa sismici e battipalo a impatto.

temporary threshold shift (TTS)

Perdita reversibile della sensibilità uditiva. Il TTS può essere causato dall'esposizione al rumore. Paragonare a **permanent threshold shift**.

termoclino

Un intervallo di profondità vicino alla superficie dell'oceano che subisce gradienti di temperatura maggiore rispetto agli strati sopra e sotto di essa dovuti al riscaldamento o al raffreddamento per conduzione di calore dall'atmosfera e dal riscaldamento del sole.

transmission loss (TL)

La differenza tra un **livello** specificato in una posizione e quello in una posizione diversa: $TL(x_1, x_2) = L(x_1) - L(x_2)$. Unità: decibel (dB). Vedi anche **propagation loss**.

trasforme di Fourier (or sintesi di Fourier)

Una tecnica matematica che, sebbene abbia svariate applicazioni, viene citata nel contesto di questo rapporto come metodo utilizzato nel processo di derivazione di una stima dello spettro da dati di serie temporali (o il processo inverso, chiamato trasformata di Fourier inversa). Un algoritmo numerico efficiente dal punto di vista computazionale per il calcolo della trasformata di Fourier è noto come trasformata di Fourier veloce (FFT).

Letteratura Citata

- [ISO] International Organization for Standardization. 2006. *ISO 80000-3:2006 Quantities and units – Part 3: Space and time*. <https://www.iso.org/standard/31888.html>.
- [ISO] International Organization for Standardization. 2017. *ISO 18405:2017. Underwater acoustics – Terminology*. Geneva. <https://www.iso.org/standard/62406.html>.
- [NMFS] National Marine Fisheries Service (US). 2018. *2018 Revision 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*. US Department of Commerce, NOAA. NOAA Technical Memorandum NMFS-OPR-59. 167 p. [https://media.fisheries.noaa.gov/dam-migration/tech_memo_acoustic_guidance_\(20\)_pdf_508.pdf](https://media.fisheries.noaa.gov/dam-migration/tech_memo_acoustic_guidance_(20)_pdf_508.pdf).
- [NRC] National Research Council (US). 2003. *Ocean Noise and Marine Mammals*. National Research Council (US), Ocean Studies Board, Committee on Potential Impacts of Ambient Noise in the Ocean on Marine Mammals. The National Academies Press, Washington, DC, USA. <https://doi.org/10.17226/10564>.
- Borsani, J.F. and C. Farchi. 2011. *Linee guida per lo studio e la regolamentazione del rumore di origine antropica introdotto in mare e nelle acque interne:: 2a Parte*. 36 p.
- Buckingham, M.J. 2005. Compressional and shear wave properties of marine sediments: Comparisons between theory and data. *Journal of the Acoustical Society of America* 117: 137-152. <https://doi.org/10.1121/1.1810231>.
- Bundone, L., A. Panou, and E. Molinaroli. 2019. On sightings of (vagrant?) monk seals, *Monachus monachus*, in the Mediterranean Basin and their importance for the conservation of the species. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* 29(4): 554-563. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.1002/aqc.3005>.
- Burns, R.D.J., S.B. Martin, M.A. Wood, C.C. Wilson, C.E. Lumsden, and F. Pace. 2022. *HYWIND Scotland Floating Offshore Wind Farm: Sound Source Characterisation of Operational Floating Turbines*. Document Number 02521, Version 2.0. Technical report by JASCO Applied Sciences for Equinor Energy AS.
- Carnes, M.R. 2009. *Description and Evaluation of GDEM-V 3.0*. US Naval Research Laboratory, Stennis Space Center, MS. NRL Memorandum Report 7330-09-9165. 21 p. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/a494306.pdf>.
- Coppens, A.B. 1981. Simple equations for the speed of sound in Neptunian waters. *Journal of the Acoustical Society of America* 69(3): 862-863. <https://doi.org/10.1121/1.382038>.
- EMODnet Bathymetry Consortium. 2020. *EMODnet Digital Bathymetry (DTM)* (webpage). EMODnet Bathymetry Consortium. <https://doi.org/10.12770/18ff0d48-b203-4a65-94a9-5fd8b0ec35f6>.
- Etter, P.C. 2009. *Review of ocean-acoustic models*. *OCEANS 2009*, 26-29 Oct. 2009, pp. 1-6.
- Farcas, A., P.M. Thompson, and N.D. Merchant. 2016. Underwater noise modelling for environmental impact assessment. *Environmental Impact Assessment Review* 57: 114-122. <https://doi.org/10.1016/j.eiar.2015.11.012>.
- Fisher, F.H. and V.P. Simmons. 1977. Sound absorption in sea water. *Journal of the Acoustical Society of America* 62(3): 558-564. <https://doi.org/10.1121/1.381574>.
- Gnone, G., M. Bellingeri, S. Airoidi, J. Gonzalvo, L. David, N. Di-Méglio, A.M. Cañadas, A. Akkaya, T. Awbery, et al. 2023. Cetaceans in the Mediterranean Sea: Encounter Rate, Dominant Species, and Diversity Hotspots. *Diversity* 15(3): 321. <https://www.mdpi.com/1424-2818/15/3/321>.
- HDR. 2019. *Field Observations during Wind Turbine Operations at the Block Island Wind Farm, Rhode Island*. Final Report to the U.S. Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management, Office of Renewable Energy Programs. OCS Study BOEM 2019-028. 281 p. https://epis.boem.gov/final%20reports/BOEM_2019-028.pdf.

- Holzer, T.L., M.J. Bennett, T.E. Noce, and J.C. Tinsley. 2005. Shear-Wave Velocity of Surficial Geologic Sediments in Northern California: Statistical Distributions and Depth Dependence. *Earthquake Spectra* 21(1): 161-177. <https://doi.org/10.1193/1.1852561>.
- JASCO Applied Sciences. 2019. *Underwater Acoustics: Noise and the Effects on Aquatic Life. A Pocket Handbook*. 4th (interim) edition.
- Kraus, S.D., S. Leiter, K. Stone, B. Wikgren, C.A. Mayo, P. Hughes, R.D. Kenney, C.W. Clark, A.N. Rice, et al. 2016. *Northeast Large Pelagic Survey Collaborative Aerial and Acoustic Surveys for Large Whales and Sea Turtles*. US Department of the Interior, Bureau of Ocean Energy Management. OCS Study BOEM 2016-054, Sterling, Virginia. 117 + appendices p. <https://www.boem.gov/RI-MA-Whales-Turtles/>.
- Lippert, S., M. Nijhof, T. Lippert, D. Wilkes, A. Gavrilov, K. Heitmann, M. Ruhnau, O. von Estorff, A. Schäfer, et al. 2016. COMPILER—A Generic Benchmark Case for Predictions of Marine Pile-Driving Noise. *IEEE Journal of Oceanic Engineering* 41(4): 1061-1071. <https://doi.org/10.1109/JOE.2016.2524738>.
- Lippert, T., M. Ruhnau, S. Lippert, O. von Estorff, M.A. Ainslie, and M. Nijhof. 2017. COMPILER II: A real-life benchmark scenario for pile driving noise estimations. *4th Underwater Acoustics Conference and Exhibition (UACE 2017)*. 2-8 Sep 2017, Skiathos, Greece. http://www.uaconferences.org/docs/UACE2017_Papers/829_UACE2017.pdf.
- MacGillivray, A.O. 2014. A model for underwater sound levels generated by marine impact pile driving. *Proceedings of Meetings on Acoustics* 20(1). <https://doi.org/10.1121/2.0000030>
- Maglio, A., G. Pavan, M. Castellote, and S. Frey. 2016. *Overview of the Noise Hotspots in the Accobams Area: Part I – Mediterranean Sea*.
- Norro, A.M.J., B. Rumes, and S.J. Degraer. 2013. Differentiating between Underwater Construction Noise of Monopile and Jacket Foundations for Offshore Windmills: A Case Study from the Belgian Part of the North Sea. *The Scientific World Journal* 2013: 897624. <https://doi.org/10.1155/2013/897624>.
- Pangerc, T., P.D. Theobald, L.S. Wang, S.P. Robinson, and P.A. Lepper. 2016. Measurement and characterisation of radiated underwater sound from a 3.6 MW monopile wind turbine. 140(4): 2913-2922. <https://asa.scitation.org/doi/abs/10.1121/1.4964824>.
- Picciulin, M., E. Armelloni, R. Falkner, N. Rako-Gospić, M. Radulović, G. Pleslić, S. Muslim, H. Mihanović, and T. Gaggero. 2022. Characterization of the underwater noise produced by recreational and small fishing boats (<14 m) in the shallow-water of the Cres-Lošinj Natura 2000 SCI. *Marine Pollution Bulletin* 183: 114050. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2022.114050>.
- Popper, A.N., A.D. Hawkins, R.R. Fay, D.A. Mann, S. Bartol, T.J. Carlson, S. Coombs, W.T. Ellison, R.L. Gentry, et al. 2014. *Sound Exposure Guidelines for Fishes and Sea Turtles: A Technical Report prepared by ANSI-Accredited Standards Committee S3/SC1 and registered with ANSI*. ASA S3/SC1.4 TR-2014. SpringerBriefs in Oceanography. ASA Press and Springer. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2>.
- Porter, M.B. and Y.C. Liu. 1994. Finite-element ray tracing. In: Lee, D. and M.H. Schultz (eds.). *International Conference on Theoretical and Computational Acoustics*. Volume 2. World Scientific Publishing Co. pp. 947-956.
- Risch, D., G. Favill, B. Marmo, N. van Geel, S. Benjamins, P. Thompson, A. Wittich, and B. Wilson. 2023. *Characterisation of underwater operational noise of two types of floating offshore wind turbines*. In: Energy, S.O.R. (ed.). Scottish Association for Marine Science. <https://tethys.pnnl.gov/sites/default/files/publications/Rischetal.pdf>.
- Širović, A. and D. Holcer. 2021. Ambient Noise from Seismic Surveys in the Southern Adriatic Sea. In Joksimović, A., M. Đurović, I.S. Zonn, A.G. Kostianoy, and A.V. Semenov (eds.). *The Montenegrin Adriatic Coast: Marine Biology*. Springer International Publishing, Cham. pp. 497-514. https://doi.org/10.1007/978-3-319-06659-2_10.
- Southall, B.L., A.E. Bowles, W.T. Ellison, J.J. Finneran, R.L. Gentry, C.R. Greene, Jr., D. Kastak, D.R. Ketten, J.H. Miller, et al. 2007. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Initial Scientific Recommendations. *Aquatic Mammals* 33(4): 411-521. <https://doi.org/10.1578/AM.33.4.2007.411>.

- Southall, B.L., J.J. Finneran, C.J. Reichmuth, P.E. Nachtigall, D.R. Ketten, A.E. Bowles, W.T. Ellison, D.P. Nowacek, and P.L. Tyack. 2019. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Updated Scientific Recommendations for Residual Hearing Effects. *Aquatic Mammals* 45(2): 125-232. <https://doi.org/10.1578/AM.45.2.2019.125>.
- Southall, B.L., D.P. Nowacek, A.E. Bowles, V. Senigaglia, L. Bejder, and P.L. Tyack. 2021. Marine Mammal Noise Exposure Criteria: Assessing the Severity of Marine Mammal Behavioral Responses to Human Noise. *Aquatic Mammals* 47(5): 421-464. <https://doi.org/10.1578/AM.47.5.2021.421>.
- Teague, W.J., M.J. Carron, and P.J. Hogan. 1990. A comparison between the Generalized Digital Environmental Model and Levitus climatologies. *Journal of Geophysical Research* 95(C5): 7167-7183. <https://doi.org/10.1029/JC095iC05p07167>.
- Tougaard, J., L. Hermannsen, and P.T. Madsen. 2020. How loud is the underwater noise from operating offshore wind turbines? *Journal of the Acoustical Society of America* 148(5): 2885-2893. <https://doi.org/10.1121/10.0002453>.
- Wenz, G.M. 1962. Acoustic Ambient Noise in the Ocean: Spectra and Sources. *Journal of the Acoustical Society of America* 34(12): 1936-1956. <https://doi.org/10.1121/1.1909155>.

Appendice A. Terminologia

A.1. Acustica sottomarina

Il suono è più comunemente descritto utilizzando la metrica del livello di pressione sonora (SPL o L_p). I livelli di ampiezza del suono sott'acqua sono comunemente misurati in decibel (dB) rispetto a una pressione di riferimento fissa di $p_0 = 1 \mu\text{Pa}$. L' L_p quadratico medio (root-mean square, rms) viene utilizzato per quantificare i suoni generati dall'attività target.

L_p (dB re $1 \mu\text{Pa}$) è il livello di decibel della pressione rms in una banda di frequenza stabilita entro una finestra temporale (T , s) contenente l'evento acustico:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_T p^2(t) dt / p_0^2 \right) \quad (\text{A-1})$$

L' L_p è una misura del livello di pressione effettivo per la durata di un evento acustico, come l'emissione di un impulso acustico o di una scansione. Perché la lunghezza della finestra, T , è il divisore, gli eventi più distribuiti nel tempo hanno un L_p inferiore anche se possono avere una densità di energia acustica totale simile.

Il livello Power Spectral Density (PSD) è una descrizione di come la potenza acustica è distribuita su diverse frequenze all'interno di uno spettro. Si esprime in dB re $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

Il livello di esposizione sonora (SEL, dB re $1 \mu\text{Pa}^2 \text{ s}$) è una misura dell'energia acustica totale contenuta in uno o più eventi acustici. Il SEL per un singolo evento viene calcolato dall'integrale temporale della pressione al quadrato sull'intera durata dell'evento (T_{100}):

$$\text{SEL} = 10 \log_{10} \left(\int_{T_{100}} p^2(t) dt / T_0 p_0^2 \right) \quad (\text{A-2})$$

dove T_0 è un intervallo di tempo di riferimento di 1 s. Il SEL rappresenta l'energia acustica totale ricevuta in un luogo durante un evento acustico; misura l'energia sonora totale a cui sarebbe esposto un organismo in quella posizione.

Poiché L_p e SEL sono entrambi calcolati dall'integrale della pressione al quadrato, queste metriche sono correlate dalla seguente espressione, che dipende solo dalla durata della finestra temporale dell'energia T :

$$L_p = \text{SEL} - 10 \log_{10}(T) \quad (\text{A-3})$$

Le statistiche del livello sonoro, ovvero i percentili di superamento, vengono utilizzate per quantificare la distribuzione dei livelli sonori registrati generati dall'attività. Seguendo la pratica acustica standard, il livello n -esimo percentile (L_n) è il livello (per es., PSD level, L_p , or SEL) ecceduto da $n\%$ dei dati. L_{99} è il livello sonoro massimo registrato. L_{eq} è la media aritmetica lineare della potenza sonora, che può essere sostanzialmente diversa dal livello sonoro mediano L_{50} . L_p può anche essere chiamato L_{eq} , che significa 'livello equivalente'. I due termini sono usati in modo intercambiabile. Il livello mediano, piuttosto che la media, è stato utilizzato per confrontare i livelli sonori più tipici tra registratori, poiché la mediana è meno influenzata da valori anomali di ampiezza elevata (ad esempio, un crostaceo che picchietta sull'idrofono) rispetto al livello sonoro medio. L_5 , il livello ecceduto da solo il 5% dei dati, rappresenta i livelli sonori tipici più alti misurati. I livelli sonori tra L_5 and L_{99} provengono generalmente da passaggi molto ravvicinati di navi, eventi meteorologici molto intensi e altre condizioni poco frequenti. L_{95} rappresenta le condizioni tipiche più tranquille.

A.2. Analisi in bande di un terzo d'ottava

La distribuzione della potenza di un suono con la frequenza è descritta dallo spettro del suono. Lo spettro sonoro può essere suddiviso in una serie di bande di frequenza adiacenti. La suddivisione di uno spettro in bande larghe 1 Hz, chiamate bande passanti, produce la densità spettrale di potenza del suono. Questi valori si confrontano direttamente con le curve di Wenz, che rappresentano i tipici livelli sonori dell'oceano profondo (Wenz 1962). Questa suddivisione dello spettro in bande passanti di ampiezza costante di 1 Hz, tuttavia, non rappresenta il modo in cui gli animali percepiscono il suono.

Poiché gli animali percepiscono aumenti esponenziali della frequenza piuttosto che aumenti lineari, l'analisi di uno spettro sonoro con bande passanti che aumentano esponenzialmente di dimensioni si avvicina meglio agli scenari del mondo reale. Nell'acustica subacquea, uno spettro è comunemente suddiviso in bande di 1/3 di ottava, che sono larghe un decimo di decade (circa un terzo di ottava). Ogni decade rappresenta un fattore 10 nella frequenza del suono. Ogni ottava rappresenta un fattore 2 nella frequenza del suono. La frequenza centrale della i -esima banda di 1/3 d'ottava, $f_c(i)$, is defined as:

$$f_c(i) = 10^{\frac{i}{10}} \text{ kHz} \tag{A-4}$$

e il limite basso (f_{lo}) e alto (f_{hi}) della frequenza di un i -esimo a1/3-banda di ottava definita come:

$$f_{lo,i} = 10^{\frac{-1}{20}} f_c(i) \quad \text{and} \quad f_{hi,i} = 10^{\frac{1}{20}} f_c(i) \tag{A-5}$$

Le bande di 1/3 d'ottava si allargano all'aumentare della frequenza, e su scala logaritmica le bande appaiono equidistanti (Figura A-1).

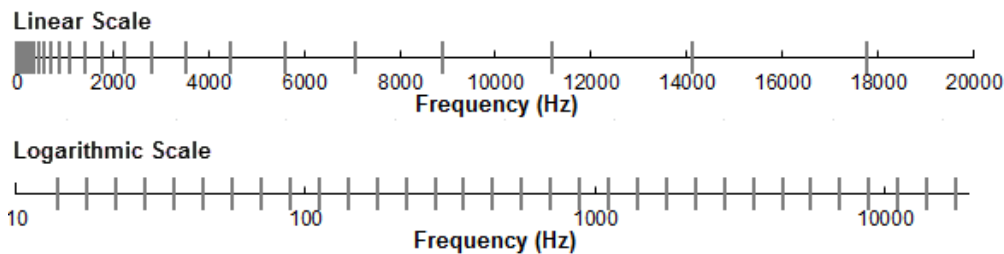


Figura A-1. Bande di frequenza di un terzo d'ottava (linee verticali) mostrate su una scala di frequenza lineare e su una scala logaritmica.

Il livello di pressione sonora nella i -esima banda ($L_{p,i}$) é calcolato dallo spettro $S(f)$ tra $f_{lo,i}$ e $f_{hi,i}$:

$$L_{p,i} = 10 \log_{10} \int_{f_{lo,i}}^{f_{hi,i}} S(f) df \text{ dB} \tag{A-1}$$

Sommando il livello di pressione sonora di tutte le bande si ottiene il livello di pressione sonora a banda larga:

$$\text{Broadband } L_p = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \text{ dB} \tag{A-2}$$

La figura A-2 mostra un esempio di come i livelli di pressione sonora in banda di 1/3 d'ottava si confrontano con i livelli di densità spettrale della pressione sonora di un segnale sonoro ambientale. Poiché le bande di 1/3 d'ottava sono più larghe di 1 Hz, L_p della banda di 1/3 d'ottava è maggiore dei livelli spettrali, specialmente alle frequenze più alte. L'analisi per bande di terzo d'ottava viene

applicata a sorgenti di rumore continue e impulsive. Per le sorgenti impulsive viene tipicamente riportato il SEL in banda di 1/3 d'ottava.

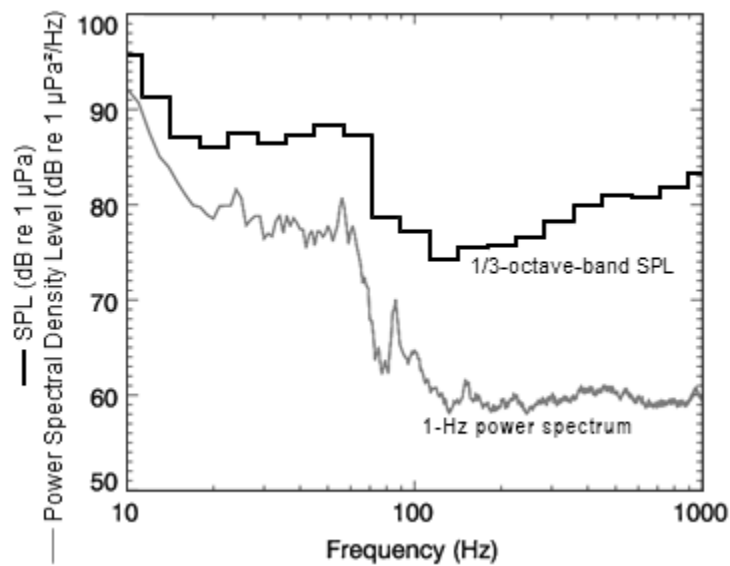


Figura A-2. Livelli di densità spettrale della pressione sonora e i corrispondenti livelli di pressione sonora in banda di 1/3 d'ottava del suono ambientale di esempio mostrati su una scala di frequenza logaritmica. Poiché le bande di 1/3 d'ottava sono più ampie all'aumentare della frequenza, l' L_p della banda di 1/3 d'ottava è maggiore dello spettro di potenza.

Appendice B. Propagazione del suono

B.1. Propagazione del suono col modello MONM-Bellhop

La propagazione del suono sott'acqua (cioè la perdita di trasmissione) è stata modellizzata con il Marine Operations Noise Model (MONM) della JASCO. Questo modello calcola la propagazione del suono da sorgenti acustiche tramite il modello di ray-trace acustico a fascio gaussiano BELLHOP (Porter and Liu 1994). Questa versione di MONM tiene conto dell'attenuazione del suono dovuta all'assorbimento di energia attraverso il rilassamento ionico e la viscosità dell'acqua oltre all'attenuazione acustica dovuta alla riflessione ai bordi del mezzo e agli strati interni (Fisher and Simmons 1977). Il primo tipo di attenuazione del suono è importante per le frequenze superiori a 5 kHz e non può essere trascurato senza influenzare notevolmente i risultati del modello.

MONM calcola i campi acustici in tre dimensioni modellizzando la perdita di trasmissione all'interno di piani verticali bidimensionali (2 D) allineati lungo radiali che coprono un'area di 360° dalla sorgente, un approccio comunemente indicato come $N \times 2$ D. Questi piani radiali verticali sono separati di un passo angolare di $\Delta\theta$, ottenendo $N = 360^\circ/\Delta\theta$ numero di piani (Figura B-1). La dimensione del gradino angolare dei radiali viene scelta per campionare sufficientemente la configurazione del fascio sorgente. MONM tiene conto della variabilità del livello sonoro dell'impulso emesso con angoli sia di azimut che di depressione secondo lo schema del fascio 3D della sorgente e stima i livelli sonori a varie distanze orizzontali dalla sorgente ea varie profondità.

Il livello sonoro ricevuto in una posizione di campionamento viene preso come il valore massimo che si verifica su tutti i campioni all'interno della colonna d'acqua sottostante, ovvero il livello sonoro ricevuto massimo in profondità (Figura B-1). Questi livelli di massima profondità vengono quindi presentati come contorni di colore attorno alla sorgente (ad esempio, Figura B-2).

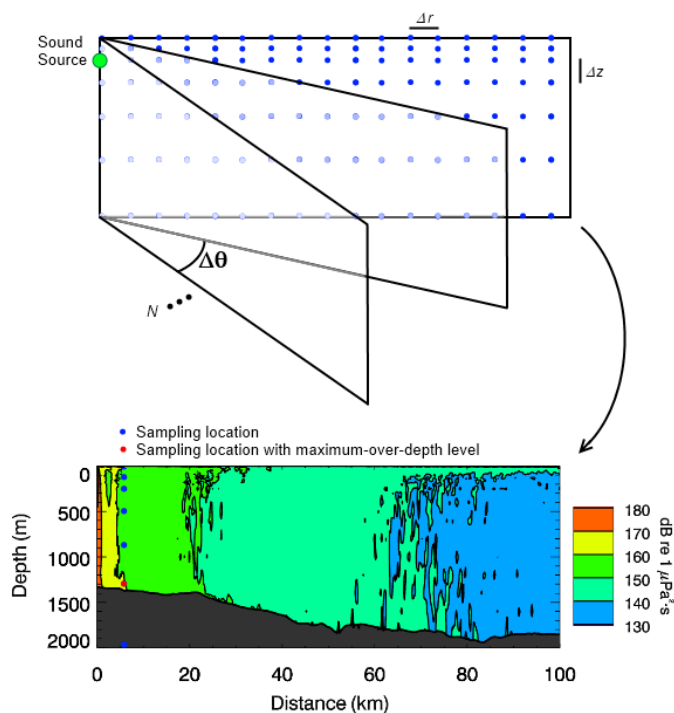


Figura B-1. Rappresentazione degli approcci $N \times 2$ -D e massimo-sulla-profondità.

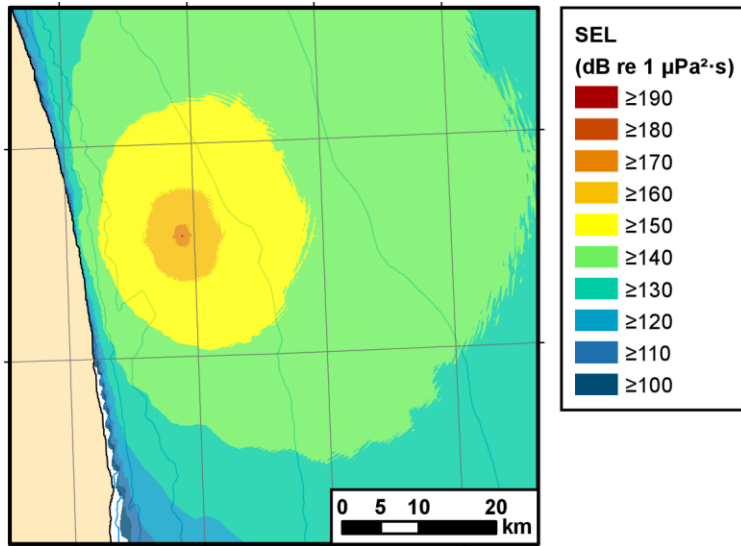


Figura B-2. Esempio di una mappa dell'SEL Massimo sulla profonditàExample of a maximum-over-depth SEL per una sorgente non specificata.