



UNIONE EUROPEA



REPUBBLICA ITALIANA



REGIONE SARDEGNA

PROGETTO DI UN PARCO EOLICO FLOTTANTE OFFSHORE DENOMINATO "MISTRAL" NEL MAR DI SARDEGNA E DELLE RELATIVE OPERE DI CONNESSIONE ALLA RETE ELETTRICA NAZIONALE

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE

Artt. 22-23, D.Lgs. n. 152/2006

PROPONENTE



Parco Eolico Flottante Mistral S.r.l.

Via Achille Campanile, 73
00144 - Roma

STUDIO DI IMPATTO AMBIENTALE
E INDAGINI AMBIENTALI



WSP ITALIA S.r.l.

Via Banfo, 93
10155 - Torino



Università di Scienze
Gastronomiche di Pollenzo
University of Gastronomic Sciences of Pollenzo



Università
degli Studi di
Messina



**CNR
IAS**
ISTITUTO PER LO STUDIO
DEGLI IMPATTI ANTROPICI
E SOSTENIBILITÀ
IN AMBIENTE MARINO



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PALERMO



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI CAGLIARI

ELENCO REVISIONI

00	30-03-2024	Prima Emissione	JASCO	UNISG/WSP	ACCIONA
REV	DATA	STATO DOCUMENTO	ELABORAZIONE	VERIFICA	APPROVAZIONE

OGGETTO

RELAZIONE TECNICA DI IMPATTO ACUSTICO OFFSHORE

SCALA	CODICE ELABORATO			RELAZIONE
-	OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11			R.11.00
FORMATO	N. FOGLI	REV	FASE	
A4		00	PFTE	

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p>CODE OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p>PAGE 1 di/of 37</p>
---	--	--	--

Disclaimer: I risultati qui presentati sono rilevanti all'interno del contesto specifico descritto in questo rapporto. Potrebbero essere interpretati erroneamente se non considerati alla luce di tutte le informazioni contenute nella presente relazione. Pertanto, qualora le informazioni derivanti dalla presente relazione siano utilizzate in documenti diffusi al pubblico o ad organismi di regolamentazione, tali documenti dovranno citare chiaramente la relazione originale, che sarà resa prontamente disponibile ai destinatari in forma integrale e inedita.

Dichiarazione sugli autori dell'opera: I singoli autori di questa relazione possono aver contribuito soltanto a parti del documento e non essere quindi responsabili per il suo intero contenuto. Questo documento può contenere passaggi di testo standardizzato che sono proprietà intellettuale comune della JASCO e non esplicitamente attribuiti ai loro autori originali. L'intera relazione è stata sottoposta a revisione scientifica finale da persona dovutamente qualificata il cui nome appare nelle pagine preliminari del documento.

	 Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small>		CODE XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX
			PAGE 3 di/of 37

Indice

1.0	DESCRIZIONE SINTETICA DELL'OPERA.....	6
1.1	Rumore ambientale	7
2.0	METODI.....	9
2.1	Stima dei livelli di sorgente.....	9
2.2	Modellizzazione della propagazione del suono.....	11
2.3	Stima dell'impatto sulle specie d'interesse.....	12
2.4	Parametri ambientali.....	13
2.4.1	Profilo della velocità del suono.....	13
2.4.2	Batimetria	14
2.4.3	Geoacustica	14
3.0	RISULTATI	16
4.0	DISCUSSIONE E CONCLUSIONI	21
	FONTI CITATE	23
	APPENDICE A Terminologia.....	25
	APPENDICE B Modello di propagazione	31
	APPENDICE C Impatto fisiologico	34
	TABELLE	
	Tabella 1: Ubicazioni dei tre siti usati come sorgenti per la modellizzazione.....	9
	Tabella 2: Input relativi alla procedura d'installazione di un'ancora da una nave con posizionamento dinamico (DP).....	10
	Tabella 3: Profilo geoacustico stimato utilizzato nella modellizzazione per il sito meno profondo e il sito mediano.	15
	Tabella 4: Profilo geoacustico stimato utilizzato nella modellizzazione per il sito più profondo.....	16
	Tabella 5: Fase di costruzione: distanze corrispondenti alle soglie di impatto comportamentale per i diversi gruppi di mammiferi marini e per le tartarughe.....	18
	Tabella 6: Fase di esercizio: distanze corrispondenti alle soglie di impatto comportamentale per i diversi gruppi di mammiferi marini e per le tartarughe.....	19

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p>CODE XXXXXXXXXXXXXXXXXXXXXX</p> <hr/> <p>PAGE 4 di/of 37</p>
---	--	--	---

FIGURE

Figura 1. Inquadramento generale del Progetto.....	6
Figura 2. 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).....	7
Figura 3. Traffico navale nel Mar Tirreno e Mar di Sardegna durante il 2022 (sorgente: marinetraffic.com).	8
Figura 4. Densità spettrale di potenza in bande di terzi di ottava per le registrazioni effettuate durante il mese di agosto 2023 presso il sito proposto per il parco eolico galleggiante (calcolati da SZN).	8
Figura 5. Costruzione (installazione delle ancore con nave in DP): livello di sorgente in bande in terzi di ottava (banda di frequenze da 10 Hz a 35 kHz) riferiti a 1 m dalla sorgente (McPherson et al. 2021).	10
Figura 6. Fase di esercizio - spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello corrispondente a un livello a banda larga di 152 dB re 1µPa2m2 (10 Hz to 22 kHz).	11
Figura 7. Sintesi dei tipi di modello e della loro applicabilità e accuratezza in base a vari scenari (JASCO Applied Sciences 2019, adattato da Etter 2009).	12
Figura 8. Esempi di aree insonificate al disopra di un certo livello sonoro con le distanze Rmax e R95% dimostrate per due scenari differenti	13
Figura 9. Profili della velocità del suono per ogni mese dell'anno.	14
Figura 10. Fase di costruzione: contorni delle distanze alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini e le tartarughe	20
Figura 11. Fase di costruzione: sezione trasversale del livello di pressione sonora	20

ACRONIMI E ABBREVIAZIONI

ACCOBAMS	Agreement for the Conservation of Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area
CNR	Centro di Ricerca Nazionale
dB	Decibel
DP	Posizionamento dinamico
LF	Low Frequency / Cetacei bassa frequenza
MF	Mid-frequency / Cetacei media frequenza
MOODS	Master Oceanographic Observational Data Set
MW	MegaWatts
OWF	Offshore Wind Farm (Parco Eolico Offshore)
PTS	Permanent Threshold Shift / Danno uditivo permanente
SPL o Lp	Livello di pressione sonora
SEL	Livello di esposizione sonora
TTS	Temporary Threshold Shift / Danno uditivo temporaneo
TUW	Turtles Underwater / Tartarughe in acqua

1.0 INTRODUZIONE

La presente relazione e il modello di propagazione acustica del rumore subacqueo sono stati realizzati dalla società JASCO Applied Sciences, leader a livello mondiale nel campo degli studi sul rumore subacqueo e i suoi effetti sugli organismi marini. Fin dalla sua nascita nel 1981, JASCO ha sviluppato e implementato tecnologie acustiche che vanno dalla progettazione avanzata di registratori acustici a complessi algoritmi di modellazione acustica e comportamentale (di cetacei e altre specie).

2.0 DESCRIZIONE SINTETICA DELL'OPERA

Il parco eolico galleggiante sarà composto da 32 aerogeneratori, per un totale di 480MW, situati nel mar di Sardegna, a una profondità compresa fra 275 e 1056m. Nella Figura 1 si riporta l'inquadramento generale del progetto. L'area designata per l'installazione del parco eolico è ubicata lungo la costa ovest dell'isola, tra le provincie di Sassari e Oristano, ad una distanza dalla costa tra i 35 km e i 50 km.

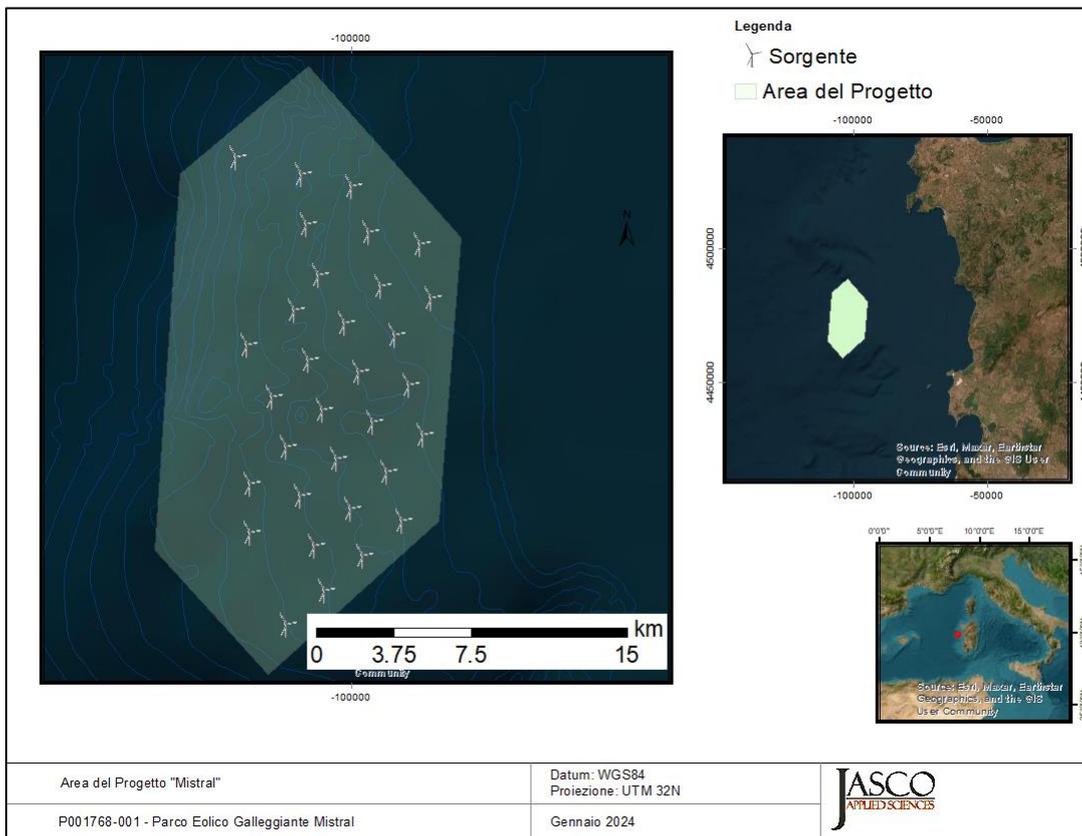


Figura 1. Inquadramento generale del Progetto

2.1 Rumore ambientale

I suoni ambientali che creano il paesaggio acustico marino sono prodotti da molte fonti naturali e antropiche (Figura 2). Le principali sorgenti naturali sono vento, precipitazioni e, in regioni polari e sub-polari, 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, contribuendo tipicamente a frequenze superiori a 500 Hz. A basse frequenze (<100 Hz), terremoti e altri eventi geologici contribuiscono al paesaggio sonoro.

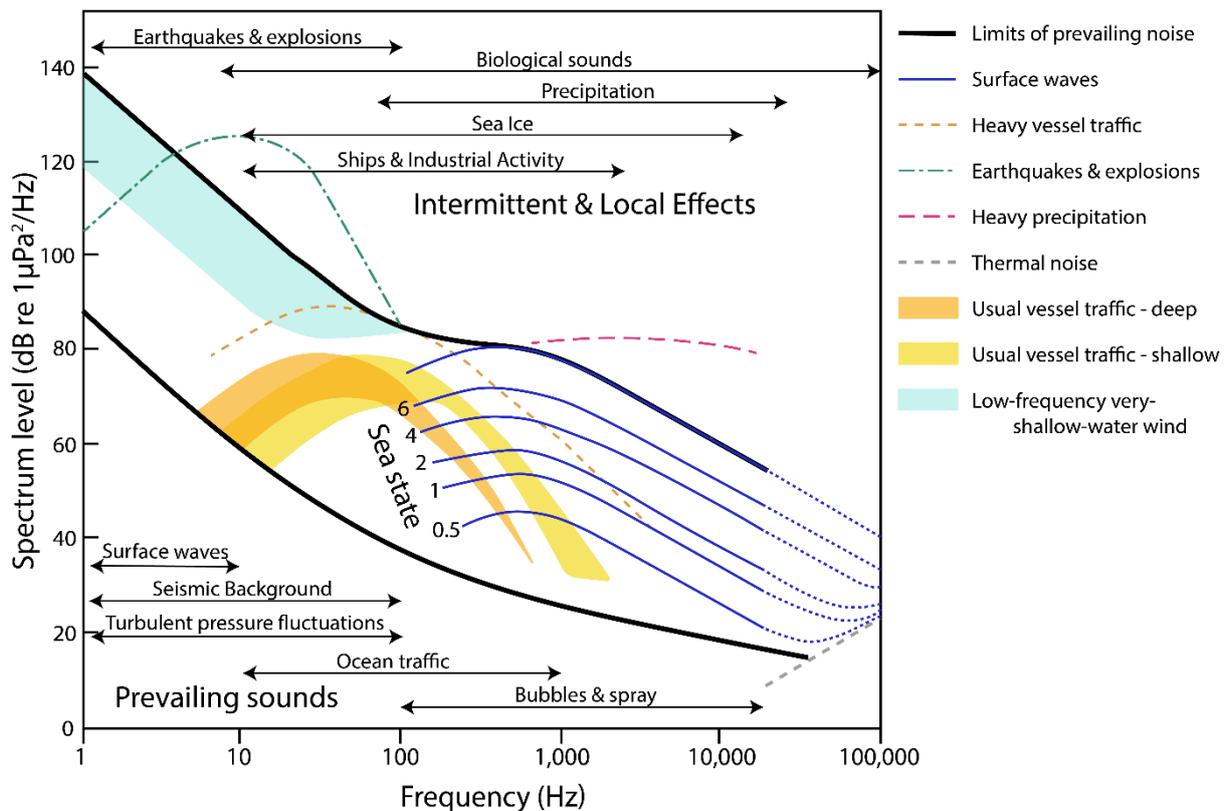


Figura 2. Curve di Wenz che descrivono i livelli di densità spettrale di pressione del suono ambientale marino prodotto da fenomeni meteorologici, vento, attività geologica e navigazione commerciale (adattate da NRC 2003, basate su Wenz 1962). Le linee in grassetto indicano i limiti del suono ambientale prevalente.

Per quel che riguarda le sorgenti sonore antropiche nella zona del parco eolico progettato, si può notare dalla Figura 3 come quest'area sia relativamente meno frequentata dal traffico navale, che contribuisce notevolmente al rumore ambientale, rispetto a zone limitrofe del mar Ligure e mar Tirreno.

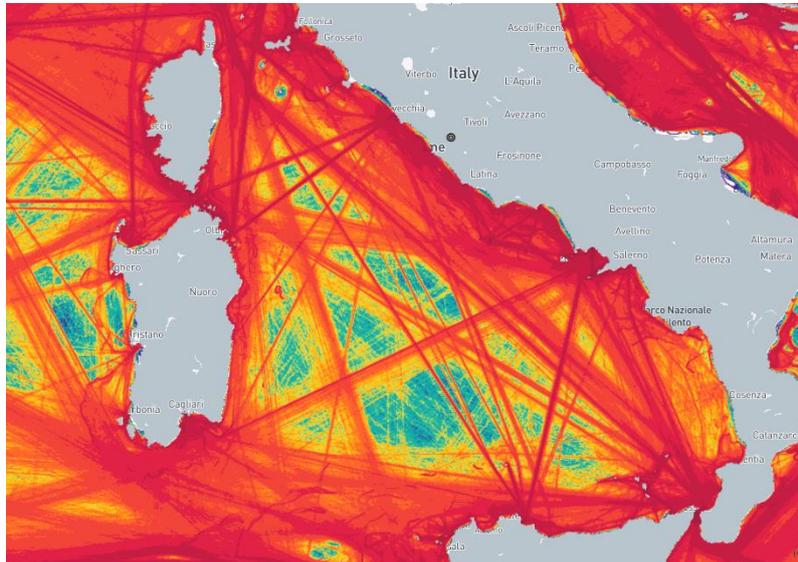


Figura 3. Traffico navale nel Mar Tirreno e Mar di Sardegna durante il 2022 (sorgente: marinetraffic.com).

Dati sul rumore di sottofondo sono stati acquisiti sul campo dalla Stazione Zoologica Anton Dohrn (SZN) durante tre mesi estivi (luglio, agosto, settembre) per un periodo di circa 3 giorni a metà di ogni mese. I livelli di pressione sonora per ogni minuto nella banda di frequenza 25 Hz to 10 kHz sono stati calcolati da SZN e messi a disposizione della JASCO che ha utilizzato i valori mediani come riferimento per il rumore di sottofondo. Il livello è stato ottenuto convertendo da dB a μPa , calcolando la media delle mediane dei valori per ogni mese e riconvertendo in dB, ottenendo un livello di pressione sonora di $\sim 96\text{dB re } 1\mu\text{Pa}$; i valori in bande di terzi di ottava sono presentati in Figura 4.

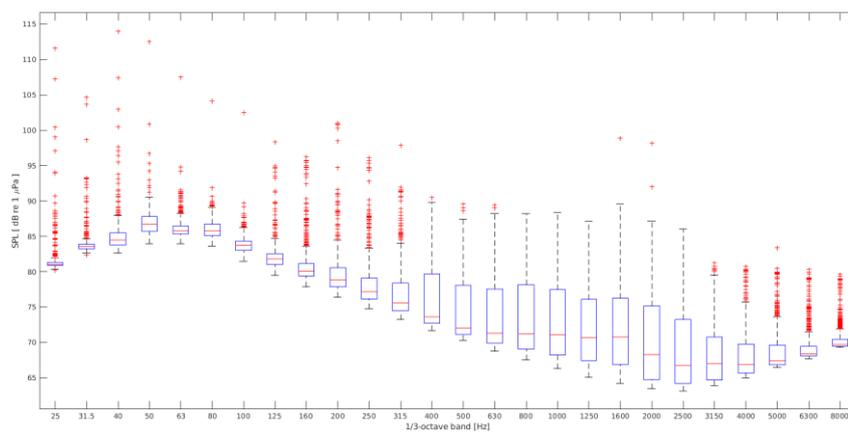


Figura 4. Densità spettrale di potenza in bande di terzi di ottava per le registrazioni effettuate durante il mese di agosto 2023 presso il sito proposto per il parco eolico galleggiante (calcolati da SZN).

3.0 METODI

Questo capitolo descrive i metodi utilizzati per stimare i livelli di sorgente (sezione 3.1), effettuare la propagazione del suono in mare (sezione 3.2), e stimare le distanze di impatto sui mammiferi e le tartarughe marini che potrebbero essere presenti nell'area (sezione 3.3). I parametri ambientali usati come input nel modello sono specificati nella sezione 3.4.

Per entrambe le fasi progettuali sono stati modellizzati tre siti data la variabilità della profondità del fondale; le coordinate di tali punti sorgente sono elencate nella Tabella 1 e comprendono:

- Sito 1: Il sito corrispondente alla turbina localizzata alla profondità del fondale minima
- Sito 2: Il sito corrispondente alla turbina localizzata a una profondità del fondale media
- Sito 3: Il sito corrispondente alla profondità del fondale massima entro l'area del parco eolico, considerato come caso più cautelativo a prescindere dal piazzamento attuale delle turbine.

Per la stima delle distanze di impatto per i mammiferi marini per il parco eolico operativo, tali sorgenti sono state replicate per rappresentare il complesso totale delle 32 turbine in base alla batimetria di ogni singola turbina.

Tabella 1: Ubicazioni dei tre siti usati come sorgenti per la modellizzazione.

Sito	Latitudine (dd.ddddd) N	Longitudine (dd.ddddd) E	Easting utmz 32N	Northing utmz 32N	Profondità dell'acqua (m)
1 – Profondità minima	40.23591477	7.96711065	412136	4454453	352
2 – Profondità media	40.19724187	7.91785237	407893	4450210	680
3 – Profondità massima	40.15854851	7.86865003	403651	4445968	1057

3.1 Stima dei livelli di sorgente

Per la fase di costruzione, che prevede l'installazione delle turbine tramite un sistema di ancoraggio per come definito nell'elaborato OW.ITA-SAR-GEN-OWC-ENV-RPT-15, dato il tipo di fondale si è potuto escludere l'utilizzo di battipali per l'installazione delle ancore. Per tutti gli altri metodi, si prevede che la maggiore sorgente di rumore sia la nave che verrà utilizzata per le attività di installazione. Pertanto, la modellizzazione è stata effettuata considerando come sorgente una nave con posizionamento dinamico (DP) come caso più cautelativo. La nave Siem Sapphire è stata scelta dal database della JASCO in quanto i suoi livelli di sorgente furono misurati dalla JASCO stessa in uno studio specificamente dedicato a caratterizzare le fonti sonore durante attività di perforazione comparabili a quelle previste per il Progetto (McPherson et al. 2021).

Gli input utilizzati dal modello sono riassunti nella Tabella 2 e lo spettro del livello sonoro generato, riferito a 10 m dalla sorgente, è presentato nella Figura 5. Il rumore generato dall'attività della nave è di tipo continuo.

Tabella 2: Input relativi alla procedura d'installazione di un'ancora da una nave con posizionamento dinamico (DP).

Caratteristica	Valore
Nome nave	Siem Sapphire
IMO	9417696
Lunghezza	91m
Larghezza	22m
Pescaggio	7.95m
Profondità della sorgente (0.7 del pescaggio)	4.9m
Stazza lorda	4,060t
Livello di sorgente (MSL, banda larga 10Hz-35kHz)	194.1 dB re 1 μ Pa ² m ²
Velocità di transito corrispondente al livello di sorgente citato	0 nodi – statica, utilizzando posizionamento dinamico

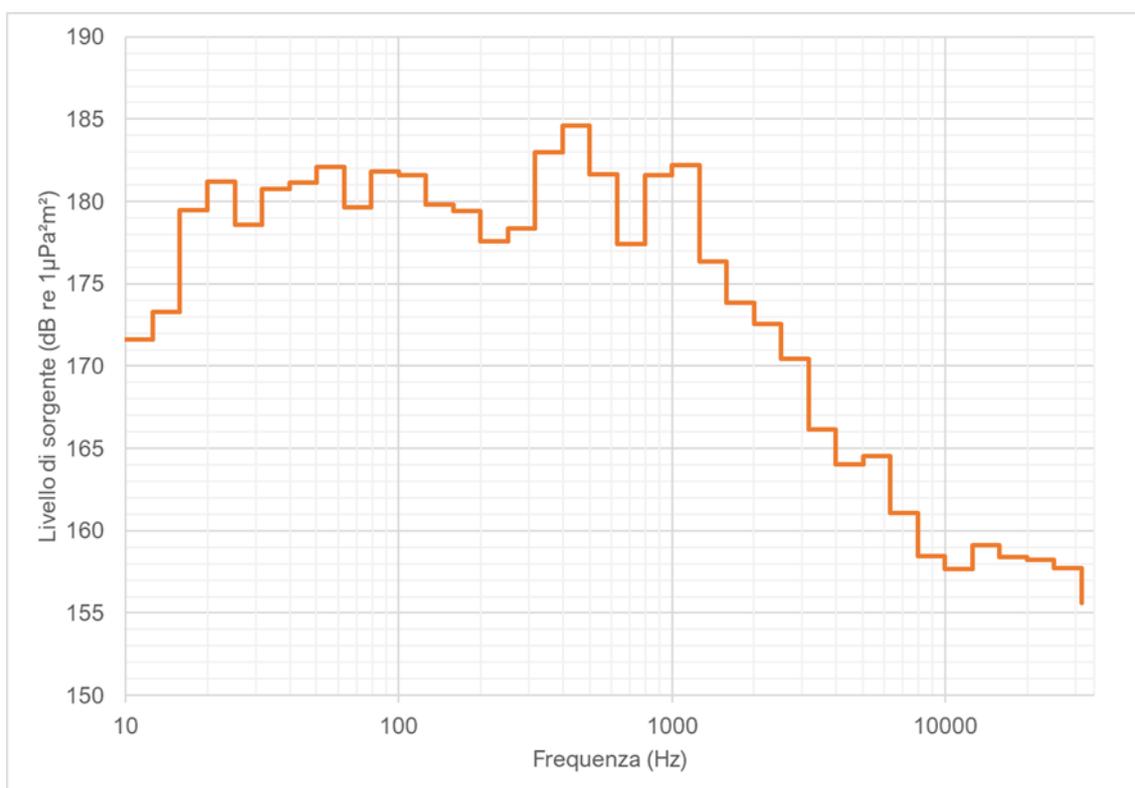


Figura 5. Costruzione (installazione delle ancore con nave in DP): livello di sorgente in bande in terzi di ottava (banda di frequenze da 10 Hz a 35 kHz) riferiti a 1 m dalla sorgente (McPherson et al. 2021).

Per la fase operativa, il profilo spettrale medio 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 9.5 MW installati su una struttura galleggiante semi-sommersa a tre torri cilindriche (simile a quella proposta) in un'area in cui la batimetria varia da 60 a 80 m (Risch et al. 2023). I livelli di sorgente utilizzati nel modello, presentati nella Figura 6, sono stati calcolati dalla JASCO applicando una legge di propagazione sferica a misure fatte a 200 m 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 10 m. 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).

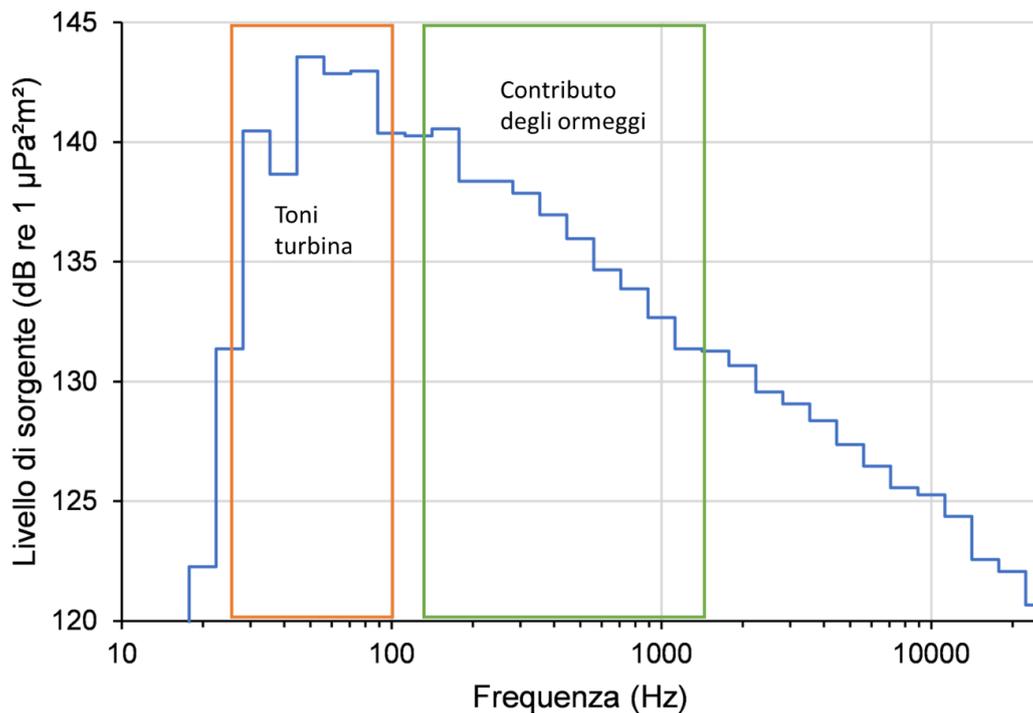


Figura 6. Fase di esercizio - spettro dei livelli di sorgente considerati come input del modello corrispondente a un livello a banda larga di 152 dB re 1µPa²m² (10 Hz to 22 kHz).

3.2 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'Allegato 2. Questo tipo di modello combina l'utilizzo dell'equazione parabolica per le basse frequenze e del ray-tracing per le frequenze sopra 2 kHz. La scelta è motivata dal fatto

che nelle acque profonde in cui si trova il progetto, questo modello ibrido risulta essere il più accurato sia per le basse che per le alte frequenze, come ampiamente discusso nella letteratura scientifica (Etter 2009, Farcas et al. 2016) (

Tipo di modello	Applicazione							
	Acque poco profonde (<100m)				Acque profonde (>100m)			
	Bassa frequenza		Alta frequenza		Bassa frequenza		Alta frequenza	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Ray tracing			◐	●	◐	◐	●	●
Equazione parabolica	◐	●	◐	◐	◐	●	◐	◐
Normal mode	●	◐	●	◐	●	◐	◐	
Wavenumber integration	●	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐
Energy flux	●	◐	●	◐	◐		◐	
Hybrid normal mode energy flux	●	◐	●	◐	●	◐	●	◐

	Non adatto
◐	Limitato nella precisione o nella velocità di esecuzione
●	Preciso e pratico

Figura 7).

Tipo di modello	Applicazione							
	Acque poco profonde (<100m)				Acque profonde (>100m)			
	Bassa frequenza		Alta frequenza		Bassa frequenza		Alta frequenza	
	RI	RD	RI	RD	RI	RD	RI	RD
Ray tracing			◐	●	◐	◐	●	●
Equazione parabolica	◐	●	◐	◐	◐	●	◐	◐
Normal mode	●	◐	●	◐	●	◐	◐	
Wavenumber integration	●	◐	●	◐	◐	◐	◐	◐
Energy flux	●	◐	●	◐	◐		◐	

	Non adatto
◐	Limitato nella precisione o nella velocità di esecuzione
●	Preciso e pratico

Hybrid normal mode energy flux	●	◐	●	◐	●	◐	●	◐
--------------------------------	---	---	---	---	---	---	---	---

Figura 7. Sintesi dei tipi di modello e della loro applicabilità e accuratezza in base a vari scenari (JASCO Applied Sciences 2019, adattato da Etter 2009). Per bassa frequenza si intende <500Hz e per alta frequenza >500Hz. RI = range independent, cioè indipendente dalla batimetria, RD = range dependent, cioè dipendente dalla batimetria

3.3 Stima dell’impatto sulle specie d’interesse

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 8).

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 8. 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 8, $R_{95\%}$ 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.

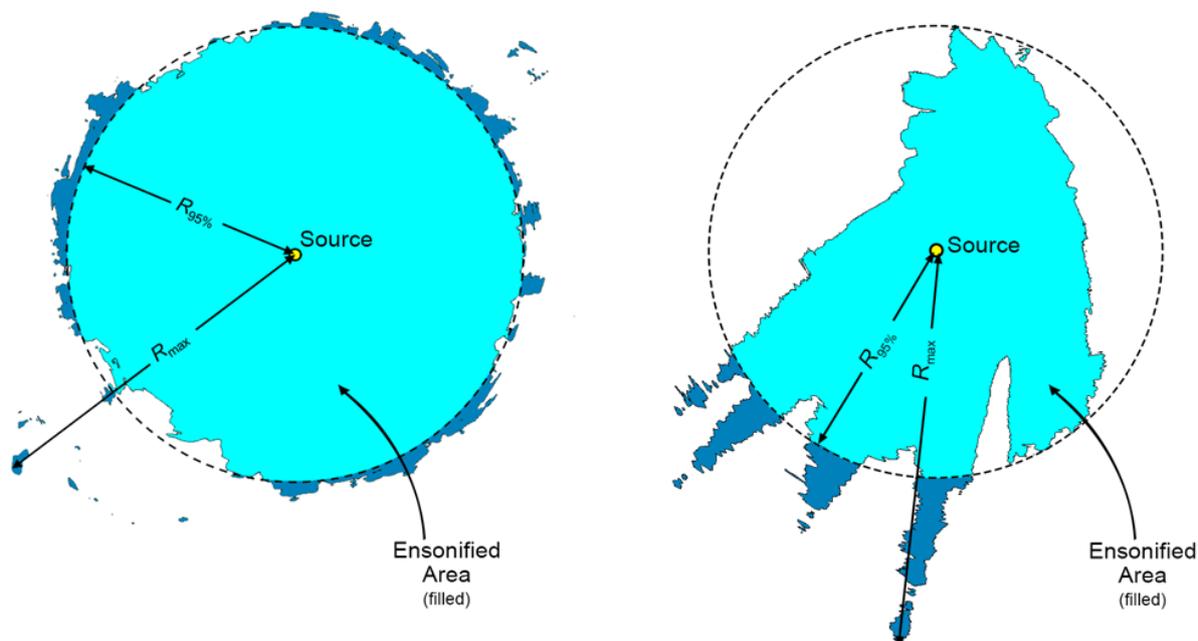


Figura 8. Esempi di aree insonificate al di sopra di un certo livello sonoro con le distanze R_{max} e $R_{95\%}$ dimostrate per due scenari differenti: (sinistra) una distribuzione del livello sonoro radialmente simmetrica con piccole sporgenze, per la quale $R_{95\%}$ meglio rappresenta l'area insonificata 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} .

3.4 Parametri ambientali

3.4.1 Profilo della velocità del suono

Il profilo di velocità del suono in acqua per gli scenari modellizzati è stato derivato da osservazioni storiche utilizzando i profili di temperatura e salinità del servizio digitale Copernicus (CMEMS 2023). Copernicus fornisce una climatologia oceanica di temperatura e salinità per gli oceani del mondo su una griglia latitudine-longitudine con una risoluzione di 5', ad incremento temporale di un mese, basata su misurazioni storiche globali del Global Ocean Physics Reanalysis. I profili climatologici includono 50 punti di profondità da 0.49 m a 5.73km. I profili di temperatura-salinità Copernicus sono stati convertiti in profili di velocità del suono secondo la formula di Coppins (1981).

Un profilo medio mensile di velocità del suono è stato analizzato per ogni mese dell'anno per determinare quale profilo favorisse maggiormente la propagazione del suono sulle lunghe distanze, rappresentando quindi lo scenario più cautelativo. Il profilo scelto per la modellizzazione, corrispondente al mese di febbraio, presenta una velocità del suono quasi isotropa con propagazione leggermente rifrangente verso l'alto (Figura 9).

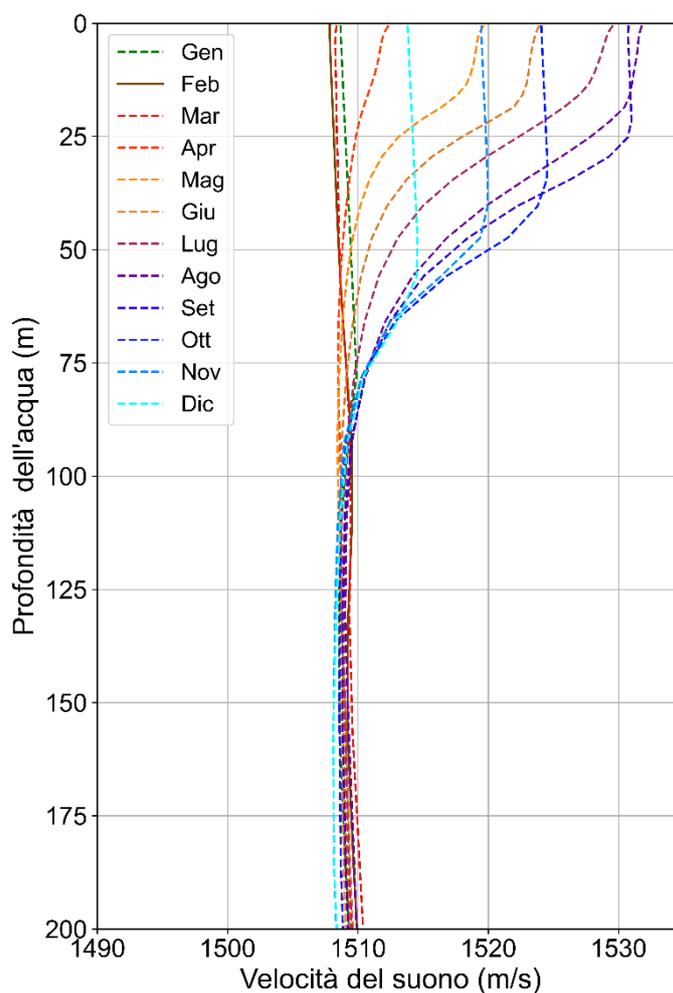


Figura 9. Profili della velocità del suono per ogni mese dell'anno.

3.4.2 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 × 100 m.

I dati di batimetria sono stati estratti e ricampionati, mediante griglia di curvatura minima, su una proiezione di coordinate universale trasversa di Mercatore (UTM) nella zona 32N.

3.4.3 Geoacustica

Il profilo dei parametri geoacustici in funzione della profondità sotto il fondale è stato calcolato dai valori di Hamilton (1980) per l'onda di compressione per gli strati più superficiali fino a 700m di profondità e da Duncan and Gavrilov (2012) per gli strati più profondi, e in base a Holzer et al. (2005) per la velocità dell'onda trasversale

e Buckingham (2005) per l'attenuazione dell'onda trasversale, ed è presentato nella Tabella 3. 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.

L'aspetto geoacustico della modellizzazione è stato separato in due regioni secondo il sito della sorgente:

- Sito meno profondo e sito mediano: sedimentazione fango-sabbiosa leggermente più grezza
- Sito più profondo: sedimentazione fangosa più fine

Nelle tabelle seguenti sono esposti entrambi i profili utilizzati. All'interno di ogni intervallo di profondità, ciascun parametro varia linearmente. L'onda di compressione (P) è l'onda primaria, mentre l'onda trasversale (S) è l'onda secondaria.

Tabella 3: Profilo geoacustico stimato utilizzato nella modellizzazione per il sito meno profondo e il sito mediano.

Profondità sotto il suolo (m)	Materiale	Densità (g/cm ³)	Onda di compressione		Onda trasversale	
			Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)	Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)
0	Fango Sabbioso	1.740	1600	0.981	334.539	4.483
100		1.870	1724	0.983		
200		1.991	1834	0.866		
300		2.101	1932	0.835		
400		2.200	2020	0.801		
500		2.288	2099	0.766		
600		2.363	2171	0.733		
700		2.426	2238	0.705		
800		2.474	2301	0.684		
900		2.509	2361	0.673		
1000		2.529	2420	0.672		

Tabella 4: Profilo geoacustico stimato utilizzato nella modellizzazione per il sito più profondo.

Profondità sotto il suolo (m)	Materiale	Densità (g/cm ³)	Onda di compressione		Onda trasversale	
			Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)	Velocità (m/s)	Attenuazione (dB/λ)
0	Fango	1.488	1540	0.197	225.393	3.899
100		1.618	1664	0.425		
200		1.739	1773	1.084		
300		1.849	1872	1.184		
400		1.948	1960	0.955		
500		2.036	2039	0.929		
600		2.111	2111	0.904		
700		2.174	2178	0.884		
800		2.222	2241	0.870		
900		2.257	2301	0.864		
1000		2.277	2360	0.870		

4.0 RISULTATI

L'impatto del rumore sui mammiferi e tartarughe marini è stato valutato principalmente con riguardo al disturbo comportamentale. 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.

Sia per le fasi di costruzione che di esercizio del parco eolico si fa riferimento alla soglia di insorgenza del disturbo comportamentale per mammiferi marini esposti a suoni di tipo continuo (rumore non impulsivo) corrispondente a un livello di pressione sonora (L_p) compreso fra i 100 e i 110 dB re 1 μ Pa per i cetacei a basse frequenze, e tra i 110 e i 120 dB re 1 μ Pa per i cetacei a medie frequenze (Borsani e Farchi, 2011).

Le distanze a cui specifici livelli di pressione sonora (L_p) vengono superati sono presentate nelle Tabelle 5 e 6 per la fase di costruzione e di esercizio, rispettivamente. L'eccedenza dell' L_p pari a 120 dB re 1 μ Pa viene utilizzata da ACCOBAMS come soglia per il disturbo comportamentale per qualsiasi cetaceo; la stessa soglia è applicata a livello internazionale (basandosi sugli studi applicati negli Stati Uniti (NMFS, 2023)) per il disturbo comportamentale per le foche (pinnipedi in acqua), a cui ne' le linee guida di Borsani e Farchi (2011) ne' quelle ACCOBAMS fanno riferimento. Inoltre, il superamento di un L_p di 166 dB re 1 μ Pa è utilizzato come soglia

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p>CODE OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p>PAGE 18 di/of 37</p>
---	--	--	---

comportamentale del disturbo per le tartarughe marine dalla normativa del NOAA statunitense (NSF 2011) in quanto nessun riferimento a soglie di disturbo comportamentale è presente nelle normative italiane.

Una minima differenza è riscontrabile nelle distanze dei raggi di impatto fra i diversi siti sorgente: il sito in acqua meno profonda comporta raggi di impatto leggermente più estesi sia durante la fase di costruzione che durante la fase operativa come è riscontrabile nelle rispettive tabelle e graficamente nelle mappe per la fase costruttiva (Figura 10) in cui si può notare come la batimetria influenzi la propagazione del suono. La rilevante profondità di installazione degli aerogeneratori consente quindi di ridurre gli impatti del rumore subacqueo.

Nella fase di costruzione, le differenze di propagazione per i tre siti risultano essere minime, discostandosi tra loro meno di circa 5%. Le distanze per il disturbo comportamentale nel peggiore dei casi vanno dai ~130km per i cetacei a basse frequenze ai ~100km per i cetacei a medie frequenze, ma scendono a ~15km secondo il criterio generico ACCOBAMS.

Le sezioni trasversali del livello acustico durante la fase di costruzione (Figura 11) per un transetto nella direzione est-ovest e nord-sud mostrano una graduale diminuzione del suono con l'incrementare della distanza dalla sorgente; nei casi riportati è evidente come la batimetria influenzi la propagazione del suono a lunghe distanze e come i livelli non siano uniformi nella colonna d'acqua. Per esempio, oltre i 1500-2000 m di profondità i livelli appaiono scendere al di sotto di un Lp di 100 dB re 1µPa.

Per la fase di esercizio del parco eolico, i risultati sono presentati sia per l'esercizio di una turbina singola che per l'intero parco eolico. Per le singole turbine non si nota una sostanziale differenza nei raggi di impatto fra i tre siti modellati. L'Lp scende al di sotto di 100 dB re 1µPa entro meno di 750 metri dalla turbina nel caso peggiore. Per il parco eolico in esercizio con tutte le turbine attive, l'eccedenza della soglia minore di disturbo comportamentale per i cetacei a bassa frequenza (Lp di 100 dB re 1µPa) avviene entro 1.7 km dal parco eolico

ed inoltre, si nota un accumulo dei livelli sonori che comporta un'eccedenza maggiore rispetto alle singole turbine fino a raggiungere un L_p di 140 dB re 1 μ Pa entro pochi metri dalle singole sorgenti (Tabella 6).

La distanza di impatto comportamentale R95% varia dai ~14km durante la fase di costruzione ai ~60 m durante la fase di esercizio del parco eolico intero, facendo riferimento alle corrispettive soglie di eccedenza per tutti i gruppi uditivi di cetacei secondo ACCOBAMS (2013).

Tabella 5: Fase di costruzione: distanze corrispondenti alle soglie di impatto comportamentale per i diversi gruppi di mammiferi marini e per le tartarughe. Il simbolo '-' indica che il livello è minore del livello di sorgente.

L_p non ponderato (dB re 1 μ Pa)	Costruzione					
	Sito più profondo		Sito media profondità		Sito meno profondo	
	R_{max} (km) 10Hz-25kHz	R_{95} (km) 10Hz-25kHz	R_{max} (km) 10Hz-25kHz	R_{95} (km) 10Hz-25kHz	R_{max} (km) 10Hz-25kHz	R_{95} (km) 10Hz-25kHz
100 ²	155.29	127.43	156.21	129.98	161.93	133.13
110 ³	152.10	95.39	144.73	101.53	150.96	102.69
120 ¹	40.96	14.44	36.40	14.82	35.59	15.00
130	3.30	1.90	3.24	2.89	5.33	2.88
140	0.62	0.59	0.62	0.61	0.72	0.69
150	0.18	0.18	0.15	0.15	0.17	0.17
160	-	-	0.01	0.01	-	-
166 ⁴	-	-	0.01	0.01	-	-
170	-	-	0.01	0.01	-	-

¹ Soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale per tutti i gruppi uditivi esposti a rumore continuo secondo ACCOBAMS (2013).

² Soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale dei cetacei di bassa frequenza (Borsani and Farchi 2011).

³ Soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale dei cetacei di media frequenza (Borsani and Farchi 2011).

⁴ Soglia comportamentale per il rumore impulsivo per le tartarughe marine (NFS, 2011).

Tabella 6: Fase di esercizio: distanze corrispondenti alle soglie di impatto comportamentale per i diversi gruppi di mammiferi marini e per le tartarughe. Il simbolo ‘-’ indica che il livello è minore del livello di sorgente.

L_p non ponderato (dB re 1 μ Pa)	Fase di Esercizio- singola turbina		Fase di Esercizio- singola turbina		Fase di Esercizio- singola turbina		Fase di Esercizio - parco intero	
	Sito più profondo		Sito rappresentativo		Sito meno profondo		Tutti i siti	
	R_{max} (km) 10Hz-25kHz	R_{95} (km) 10Hz-25kHz	R_{max} (km) 10Hz-25kHz	R_{95} (km) 10Hz-25kHz	R_{max} (km) 10Hz-25kHz	R_{95} (km) 10Hz-25kHz	R_{max} (km) 10Hz-25kHz	R_{95} (km) 10Hz-25kHz
96 ⁵	0.89	0.87	1.21	1.02	1.46	1.39	3.23	2.28
100 ²	0.59	0.57	0.58	0.57	0.80	0.76	2.12	1.67
110 ³	0.18	0.18	0.15	0.15	0.17	0.17	0.19	0.18
120 ¹	-	-	0.01	0.01	-	-	0.06	0.06
130	-	-	0.01	0.01	-	-	0.03	0.02
140	-	-	0.01	0.01	-	-	0.03	0.02
150	-	-	-	-	-	-	-	-
160	-	-	-	-	-	-	-	-
166 ⁴	-	-	-	-	-	-	-	-
170	-	-	-	-	-	-	-	-

¹ Soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale per tutti i gruppi uditivi esposti a rumore continuo secondo ACCOBAMS (2013).

² Soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale dei cetacei di bassa frequenza (Borsani and Farchi 2011).

³ Soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale dei cetacei di media frequenza (Borsani and Farchi 2011).

⁴ Soglia di eccedenza per il disturbo comportamentale delle tartarughe marine (NFS, 2011).

⁵ Soglia di eccedenza del rumore di fondo ambientale.

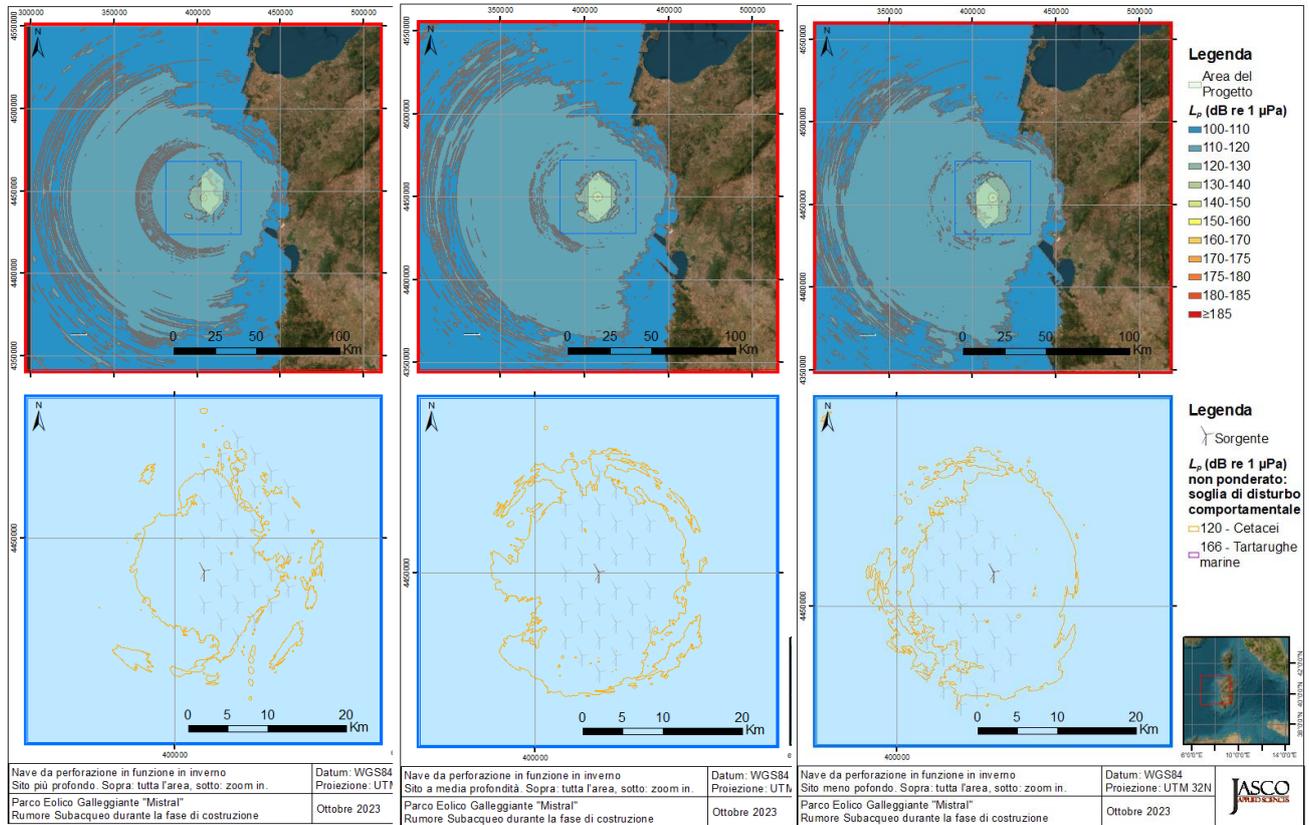


Figura 10. Fase di costruzione: contorni delle distanze alle varie soglie di disturbo comportamentale per i mammiferi marini e le tartarughe per il sito piu' profondo (sinistra), quello medio (centro) e quello meno profondo (destra).

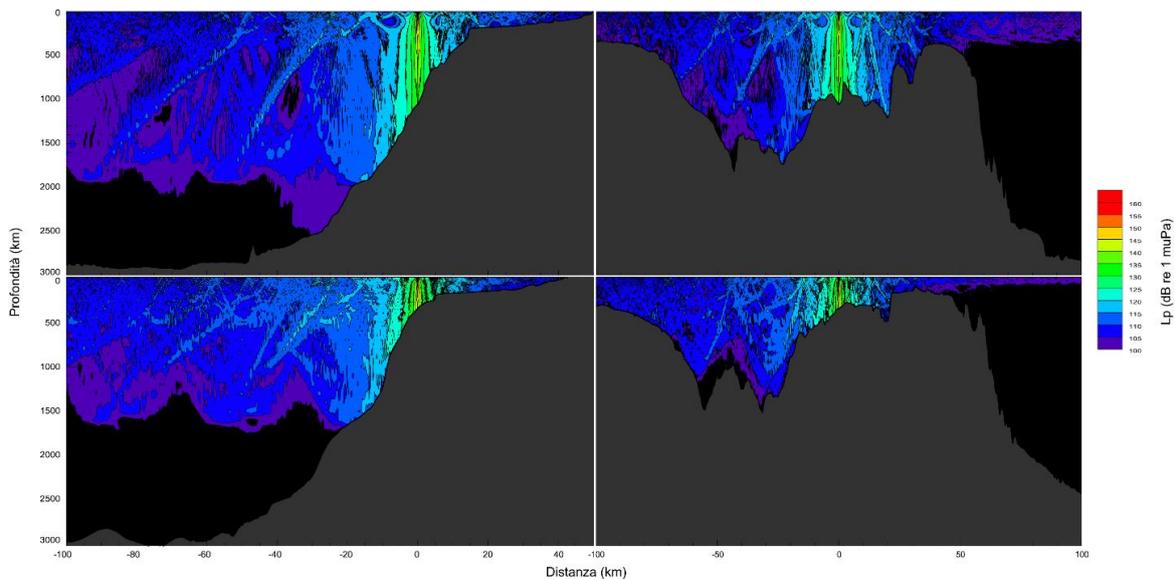


Figura 11. Fase di costruzione: sezione trasversale del livello di pressione sonora per il sito più profondo (alto) e meno profondo (basso) nella direzione est-ovest (sinistra) e nord-sud (destra). L'asse delle ascisse indica la distanza dalla sorgente.

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p>CODE OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p>PAGE 22 di/of 37</p>
---	--	--	---

5.0 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 flottante offshore “Mistral” a largo della costa ovest sarda e di modellizzare le distanze di potenziale impatto sui mammiferi marini e le tartarughe che possono essere presenti nell’area.

Le due attività selezionate per la modellizzazione sono state l’installazione dei sistemi di ancoraggio degli aerogeneratori (fase di costruzione) e l’operatività degli aerogeneratori durante l’esercizio del parco eolico. Entrambe sono state modellizzate con un profilo della velocità del suono invernale, che è considerato il più favorevole per la diffusione su lunghe distanze.

Nonostante la possibile evoluzione tecnologica, che potrebbe modificare in futuro i componenti dei sistemi di ancoraggio delle turbine in progetto, date le caratteristiche del suolo, lo studio ingegneristico di dettaglio ha escluso l’utilizzo di battipali. Pertanto, qualsiasi altra soluzione, inclusa la perforazione, comportano l’utilizzo di una nave con posizionamento dinamico (DP), le cui emissioni sonore sono considerate la sorgente dominante come dimostrato da studi di misurazioni sul campo (Austin and Li 2016, McPherson et al. 2021, Austin et al. 2023). I livelli di sorgente per la stima del disturbo durante la fase di costruzione sono dunque stati ottenuti da misurazioni effettuate dalla JASCO e di dominio pubblico (McPherson et al. 2021) per una nave proxy di caratteristiche ed utilizzazione simili a quelle prospettate per l’installazione dei sistemi di ancoraggio per il progetto “Mistral”.

La soglia di disturbo comportamentale considerata da ACCOBAMS per i cetacei e a livello internazionale per le foche (L_p pari a 120 dB re 1 μ Pa) viene ecceduta entro ~15 km dalla nave di installazione nel peggiore dei casi. Per le soglie indicate da (Borsani and Farchi 2011) per i cetacei a basse e medie frequenze (L_p pari a 100 e 110 dB re 1 μ Pa, rispettivamente) le soglie vengono eccedute entro i ~130km e ~100km rispettivamente. Va però considerato che sono raggi che fanno riferimento a misurazioni massimizzate sulla profondità, è perciò utile fare riferimento ai transetti trasversali (Figura 11) in direzione est-ovest e nord-sud che mostrano la propagazione sonora lungo tutta la colonna d’acqua, nei quali si può notare come, specialmente per i cetacei a basse frequenze, i livelli sonori oltre soglia interessino principalmente gli strati superiori.

I livelli di sorgente calcolati dalla JASCO da misurazioni effettuate dalla Scottish Association for Marine Science 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. Tutte queste componenti generano un suono di tipo continuo sebbene le emissioni dei sistemi di ancoraggio siano episodici e a banda larga (Burns et al. 2022, Pace et al. 2023, Risch et al. 2023)

Il rumore sottomarino operativo è leggermente superiore al suono ambientale per le turbine individuali e per il parco complessivo; nel caso della singola turbina, i livelli sonori scendono al di sotto dei livelli ambientali (cioè sotto un L_p di ~96 dB re 1 μ Pa calcolato su 60 secondi) entro 1.39km dall’aerogeneratore nel caso peggiore, mentre se consideriamo il parco intero, l’impatto sonoro risulta eccedere i livelli ambientali in un raggio di 2.3km. Rispetto ad altre aree del mediterraneo, la zona predisposta al parco eolico è relativamente meno rumorosa, di conseguenza la zona in cui il rumore operativo risulta predominante è accentuata.

	 Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small>		CODE OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11 PAGE 23 di/of 37
---	---	--	--

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 siano correlati a proprietà della turbina tipo il numero di poli del generatore e il numero di rotazioni al minuto, o le caratteristiche delle pompe per lo zavorramento. 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 sui dati 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..

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p>CODE OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p>PAGE 24 di/of 37</p>
---	--	--	---

FONTI CITATE

- [ACCOBAMS] Agreement for the Conservation of Cetaceans in the Black Sea, Mediterranean Sea and contiguous Atlantic area and [CMS] The Convention on the Conservation of Migratory Species of Wild Animals. 2013. *Anthropogenic noise and marine mammals: Review of the effort in addressing the impact of anthropogenic underwater noise in the ACCOBAMS and ASCOBANS areas*. Fifth Meeting of the Parties to ACCOBAMS, 5-8 Nov 2013. Document 22, Rev 1, Tangier. 61 p.
- [CMEMS] E.U. Copernicus Marine Service Information. 2023. Global Ocean Physics Reanalysis. *Marine Data Store (MDS)*. <https://doi.org/10.48670/moi-00021>.
- [NMFS] National Marine Fisheries Service. 2023. *Takes of Marine Mammals Incidental to Specified Activities; Taking Marine Mammals Incidental to Marine Site Characterization Surveys in the New York Bight*. <https://www.federalregister.gov/documents/2023/07/25/2023-15718/takes-of-marine-mammals-incident-to-specified-activities-taking-marine-mammals-incident-to>.
- [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>.
- [NSF] National Science Foundation (US). 2011. *Final Programmatic Environmental Impact Statement/Overseas. Environmental Impact Statement for Marine Seismic Research Funded by the National Science Foundation or Conducted by the US Geological Survey*. National Science Foundation, Arlington, VA, USA. https://www.nsf.gov/geo/oce/envcomp/usgs-nsf-marine-seismic-research/nsf-usgs-final-eis-oeis_3june2011.pdf.
- Austin, M.E. and Z. Li. 2016. *Marine Mammal Monitoring and Mitigation During Exploratory Drilling by Shell in the Alaskan Chukchi Sea, July–October 2015: Draft 90-day report*. In: Ireland, D.S. and L.N. Bisson (eds.). *Underwater Sound Measurements*. LGL Rep. P1363D. Report from LGL Alaska Research Associates Inc., LGL Ltd., and JASCO Applied Sciences Ltd. For Shell Gulf of Mexico Inc, National Marine Fisheries Service, and US Fish and Wildlife Service. 188 pp + appendices.
- Austin, M.E., S.B. Martin, and C.R. McPherson. 2023. *Measurements of Underwater Radiated Noise from Mobile Offshore Drilling Units*. In Popper, A.N., J. Sisneros, A. Hawkins, and F. Thomsen (eds.). *The Effects of Noise on Aquatic Life : Principles and Practical Considerations*. Springer International Publishing, Cham. pp. 1-14. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_7-1.
- 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>.
- 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 02521, Version 2.0. Technical report by JASCO Applied Sciences for Equinor Energy AS.
- 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>.
- Deane, G.B. 2000. Long time-base observations of surf noise. *Journal of the Acoustical Society of America* 107(2): 758-770. <https://doi.org/10.1121/1.428259>.
- Duncan, A.J. and A. Gavrilov. 2012. Low-frequency acoustic propagation over calcarenite seabeds with thin, hard caps. *Acoustics* 2012. 21-23 Nov 2012, Fremantle. pp. 1-4. http://www.acoustics.asn.au/conference_proceedings/AAS2012/papers/p88.pdf.
- EMODnet Bathymetry Consortium. 2020. *EMODnet Digital Bathymetry (DTM)* (webpage). EMODnet Bathymetry Consortium. <https://doi.org/10.12770/18ff0d48-b203-4a65-94a9-5fd8b0ec35f6>.

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p>CODE OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p>PAGE 25 di/of 37</p>
---	--	--	---

- 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>.
- Finneran, J.J. 2015. *Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for cetaceans and marine carnivores*. Technical report by SSC Pacific, San Diego, CA, USA.
- Finneran, J.J. 2016. *Auditory weighting functions and TTS/PTS exposure functions for marine mammals exposed to underwater noise*. Technical Report for Space and Naval Warfare Systems Center Pacific, San Diego, CA, USA. 49 p. <https://apps.dtic.mil/dtic/tr/fulltext/u2/1026445.pdf>.
- 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>.
- Hamilton, E.L. 1980. Geoacoustic modeling of the sea floor. *Journal of the Acoustical Society of America* 68(5): 1313-1340. <https://doi.org/10.1121/1.385100>.
- Holzer, T.L., M.J. Bennett, T.E. Noce, and J.C. Tinsley, III. 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.
- McPherson, C.R., Z. Li, C.C. Wilson, K.A. Kowarski, and M.W. Koessler. 2021. Appendix 8. Beach Otway Development Acoustic Monitoring. In Beach (ed.). *Environment Plan Appendices Geographe Subsea Installation & Commissioning (VIC/L23)*. <https://docs.nopsema.gov.au/A802937>.
- Pace, F., R.D.J. Burns, S.B. Martin, M.A. Wood, C.C. Wilson, C.E. Lumsden, K.M. Murvoll, and J. Weissenberger. 2023. Underwater Sound Emissions from the Moorings of Floating Wind Turbines: HYWIND Scotland Case Study. In Popper, A.N., J. Sisneros, A.D. Hawkins, and F. Thomsen (eds.). *The Effects of Noise on Aquatic Life: Principles and Practical Considerations*. Springer International Publishing, Cham. pp. 1-23. https://doi.org/10.1007/978-3-031-10417-6_121-1.
- 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>.
- Ross, D. 1976. *Mechanics of Underwater Noise*. Pergamon Press, NY, USA.
- 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>.
- 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>.

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p><i>CODE</i> OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p><i>PAGE</i> 26 di/of 37</p>
---	--	--	--

APPENDICE A TERMINOLOGIA

	 Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small>		CODE OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11
			PAGE 27 di/of 37

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:

$$L_p = 10 \log_{10} \left(\frac{1}{T} \int_T p^2(t) dt / p_0^2 \right) \quad (\text{A1-1})$$

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 $1 \mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$.

Fig. 1. 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}):

$$\text{SEL} = 10 \log_{10} \left(\int_{T_{100}} p^2(t) dt / T_0 p_0^2 \right) \quad (\text{A1-2})$$

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 :

$$L_p = \text{SEL} - 10 \log_{10}(T) \quad (\text{A1-3})$$

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.

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:

$$f_c(i) = 10^{\frac{i}{10}} \text{ kHz} \quad (\text{A1-4})$$

e il limite basso (f_{lo}) e alto (f_{hi}) della frequenza di un i -esimo 1/3-banda di ottava definita come:

$$f_{lo,i} = 10^{\frac{-1}{20}} f_c(i) \quad \text{and} \quad f_{hi,i} = 10^{\frac{1}{20}} f_c(i) \quad (\text{A1-5})$$

Le bande di 1/3 d'ottava si allargano all'aumentare della frequenza, e su scala logaritmica le bande appaiono equidistanti (Figura A1-1).

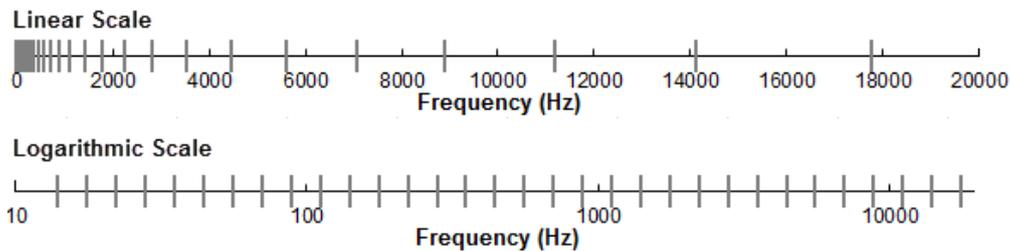


Figura A1-1: Bande di frequenza di un terzo d'ottava (linee verticali) mostrate su una scala di frequenza lineare e su una scala logaritmica.

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

$$L_{p,i} = 10 \log_{10} \int_{f_{lo,i}}^{f_{hi,i}} S(f) df \text{ dB} \quad (\text{A1-6})$$

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

$$\text{Broadband } L_p = 10 \log_{10} \sum_i 10^{\frac{L_{p,i}}{10}} \text{ dB} \quad (\text{A1-7})$$

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' 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.

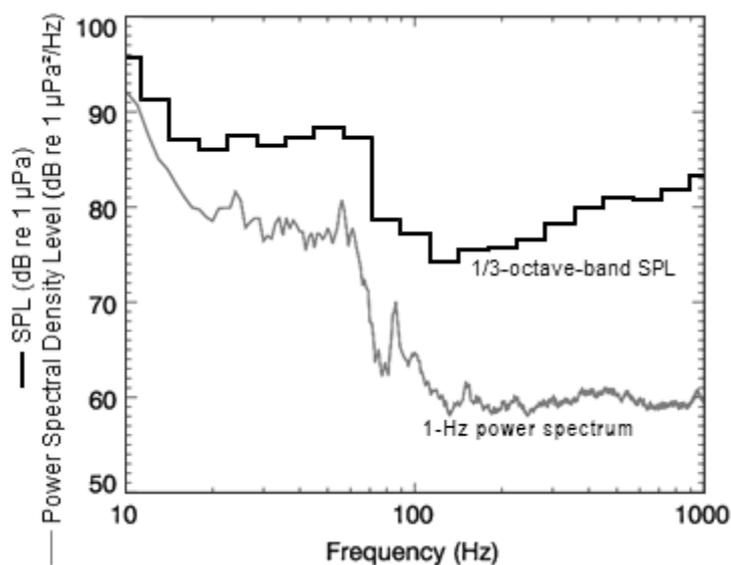


Figura A1-2: Livelli di densità spettrale della pressione sonora e i corrispondenti livelli di pressione sonora in banda di 1/3 d'ottava del suono ambientale di esempio mostrati su una scala di frequenza logaritmica. Poiché le bande di 1/3 d'ottava sono più ampie all'aumentare della frequenza, l' L_p della banda di 1/3 d'ottava è maggiore dello spettro di potenza.

Funzioni di ponderazione uditiva - Southall (2007)

Funzioni di ponderazione uditiva, chiamate funzioni di ponderazione M, per i mammiferi marini proposte da Southall et al. (2007). Queste funzioni vengono applicate in modo simile alla ponderazione A per le valutazioni del livello di rumore per gli esseri umani nell'aria. Le funzioni sono state definite per cinque gruppi uditivi di mammiferi marini:

- • Cetacei a bassa frequenza (LF): misticeti
- • Cetacei a media frequenza (MF): alcuni odontoceti
- • Cetacei ad alta frequenza (HF): odontoceti specializzati nell'uso delle alte frequenze,
- • Pinnipedi nell'acqua (Pw): foche, leoni marini e trichechi, e
- • Pinnipedi in aria (non trattato in questo studio)

Le funzioni di ponderazione M hanno un guadagno unitario (0 dB) attraverso la banda passante e le loro attenuazioni delle frequenze alte e basse sono circa -12 dB per ottava. La risposta in ampiezza nel dominio della frequenza di ciascuna funzione di ponderazione M è definita da:

$$G(f) = -20 \log_{10} \left[\left(1 + \frac{a^2}{f^2} \right) \left(1 + \frac{f^2}{b^2} \right) \right] \quad (\text{A1-8})$$

dove $G(f)$ è l'ampiezza della funzione di ponderazione (in dB) alla frequenza f (in Hz), e a e b sono rispettivamente i limiti uditivi inferiore e superiore stimati, che controllano l'attenuazione e la banda passante della funzione di ponderazione. I parametri a e b sono definiti in modo univoco per ciascun gruppo uditivo (Tabella A1-1). La Figura A1-3 mostra le funzioni di ponderazione uditiva consigliate da Southall et al. (2007).

Tabella A1-1: Parametri per le funzioni di ponderazione uditiva consigliati da Southall et al. (2007).

Gruppo uditivo funzionale	a (Hz)	b (Hz)
Low-frequency cetaceans	7	22,000
High-frequency cetaceans	150	160,000
Very-high-frequency cetaceans	200	180,000
Phocid pinnipeds in water	75	75,000

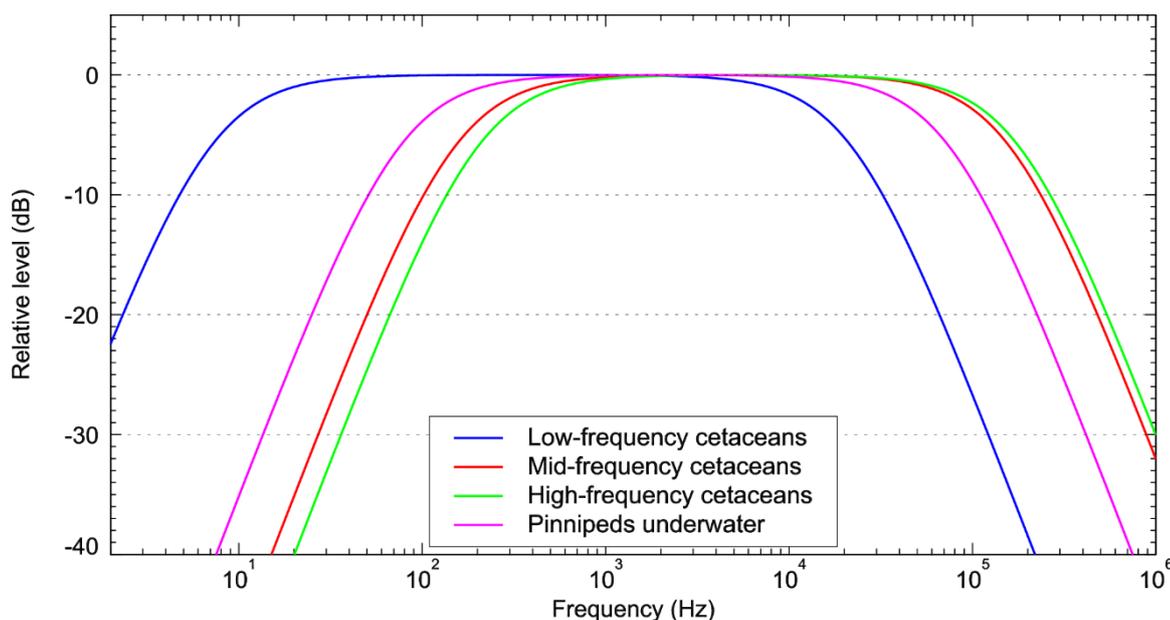


Figura A1-3: Funzioni di ponderazione uditiva per i gruppi uditivi funzionali dei mammiferi marini come raccomandato da Southall et al. (2007). Il gruppo pinnipedi in aria è stato ommesso poiché non rilevante per questo studio.

Funzioni di ponderazione uditiva - Southall (2019)

Nel 2015, un rapporto tecnico della Marina degli Stati Uniti di Finneran (2015) raccomandò nuove funzioni di ponderazione uditiva. Le funzioni di ponderazione uditiva per i mammiferi marini vengono applicate in modo simile alla ponderazione A per le valutazioni del livello di rumore per gli esseri umani. Le nuove funzioni di ponderazione in frequenza sono espresse come:

$$G(f) = K + 10 \log_{10} \left\{ \frac{(f/f_1)^{2a}}{[1 + (f/f_1)^2]^a [1 + (f/f_2)^2]^b} \right\} \quad (A1-9)$$

Finneran (2015) ha proposto cinque gruppi uditivi funzionali per i mammiferi marini in acqua: cetacei a bassa, media e alta frequenza (rispettivamente cetacei LF, MF e HF), pinnipedi focidi e pinnipedi otariidi. I parametri per queste funzioni di ponderazione in frequenza sono stati ulteriormente modificati l'anno successivo (Finneran 2016) e sono stati adottati nella guida tecnica del NOAA che valuta gli impatti acustici sui mammiferi marini (NMFS 2018), e nell'ultima guida di Southall (2019). Gli aggiornamenti non hanno interessato i contenuti relativi né alle definizioni delle funzioni di ponderazione della frequenza né ai valori di soglia rispetto ai criteri definiti in Southall et al. (2007). La Tabella A-1 elenca i parametri di ponderazione della frequenza per ciascun gruppo uditivo. La figura A-3 mostra le curve di ponderazione in frequenza risultanti.

Tabella A1-2: Parametri per le funzioni di ponderazione uditiva raccomandati da NMFS (2018).

Gruppo uditivo funzionale	<i>a</i>	<i>b</i>	<i>f</i> ₁ (Hz)	<i>f</i> ₂ (Hz)	<i>K</i> (dB)
Low-frequency cetaceans	1.0	2	200	19,000	0.13
High-frequency cetaceans	1.6	2	8,800	110,000	1.20
Very-high-frequency cetaceans	1.8	2	12,000	140,000	1.36
Phocid pinnipeds in water	1.0	2	1,900	30,000	0.75
Otariid pinnipeds in water	2.0	2	940	25,000	0.64

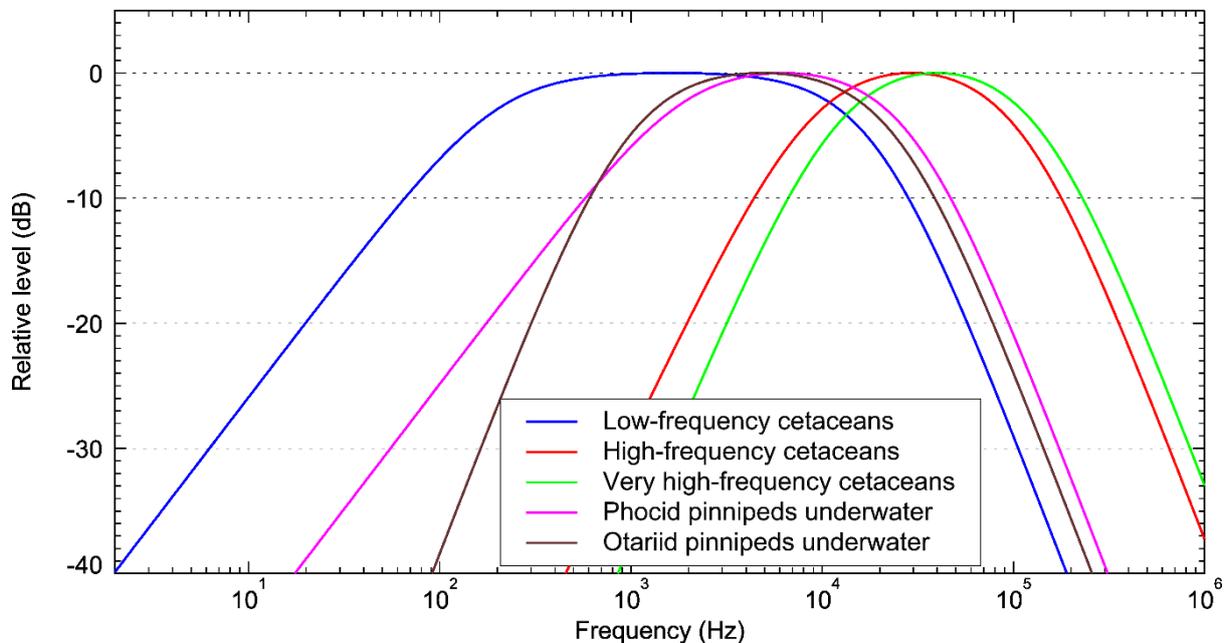


Figura A1-4: Funzioni di ponderazione uditiva per i gruppi uditivi funzionali dei mammiferi marini come raccomandato da Southall (2019).

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p><i>CODE</i> OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p><i>PAGE</i> 32 di/of 37</p>
---	--	--	---

APPENDICE B MODELLO DI PROPAGAZIONE

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×2 D. Questi piani radiali verticali sono separati di un passo angolare di , ottenendo $N = 360^\circ/\Delta\theta$ numero di piani (Figura A2-5). 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 azimuth che di depressione secondo lo schema del fascio 3-D 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 A2-5). Questi livelli di massima profondità vengono quindi presentati come contorni di colore attorno alla sorgente (ad esempio, Figura A2-6).

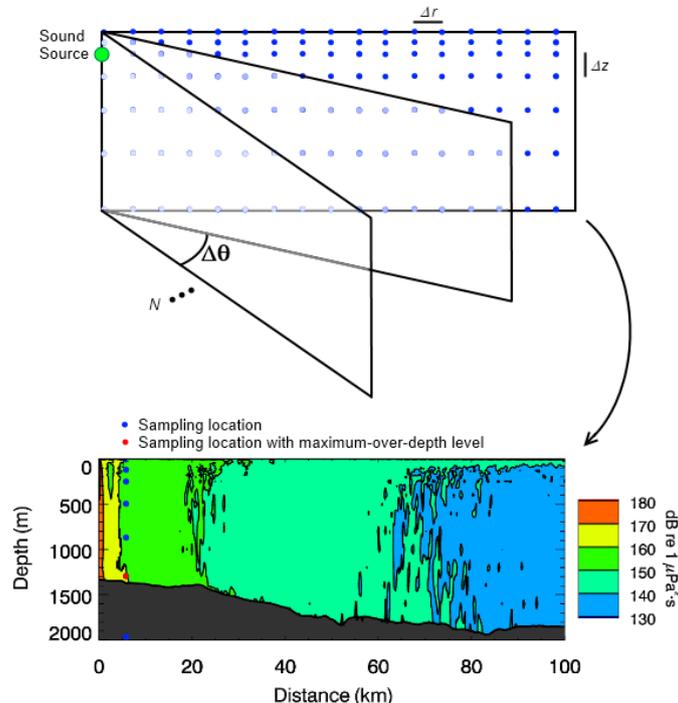


Figura A2-5: Rappresentazione degli approcci N×2-D e massimo-sulla-profondità.

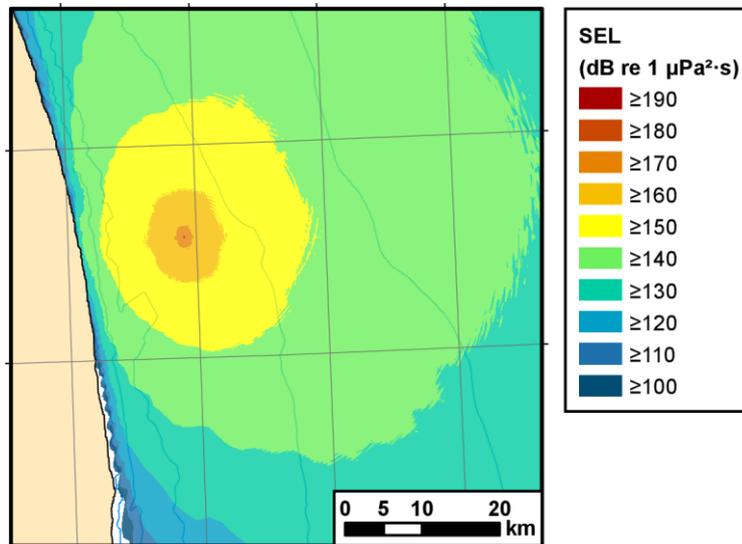


Figura A2-6: Esempio di una mappa dell'SEL Massimo sulla profondità. Example of a maximum-over-depth SEL per una sorgente non specificata.

	 <p>Università di Scienze Gastronomiche di Pollenzo <small>University of Gastronomic Sciences of Pollenzo</small></p>		<p><i>CODE</i> OW.ITA-SAR-GEN-WSP-SIA-REL-11</p> <hr/> <p><i>PAGE</i> 35 di/of 37</p>
---	--	--	---

APPENDICE C IMPATTO FISIOLÓGICO

Per completezza, l'impatto cumulativo delle attività di costruzione e operazione con riferimento alle soglie di insorgenza di PTS e TTS in base a Southall et al. (2019) sono state calcolate per determinare le distanze a cui sussiste il rischio di questi danni fisici ai mammiferi marini. Come spiegato nell' Allegato 1, queste soglie sono calcolate sui livelli ponderati per le frequenze a secondo del gruppo uditivo dei cetacei e accumulati per le durate delle operazioni effettive assumendo che i ricevitori (animali esposti al rumore) rimangano statici per la durata delle attività. È stata considerato un periodo di accumulazione di 24 ore in linea con Southall et al. (2019) anche se non è realistico che gli animali rimangano nella zona esposta per un lasso di tempo così lungo, o che le operazioni di costruzione siano ininterrotte.

Dati questi presupposti, i risultati associano i maggiori raggi di impatto ai cetacei di bassa frequenza visto che le frequenze generate sono principalmente basse.

Tabella A3-3. Fase di costruzione - distanze corrispondenti alle soglie di PTS e TTS per i diversi gruppi uditivi di mammiferi marini second Southall 2019 e per le tartarughe marine. Il simbolo '-' indica che la soglia non viene raggiunta. LF= Cetacei a basse frequenze, HF= cetacei ad alte frequenze, PPW= pinnipedi in acqua, TUV= Tartarughe in acqua.

SEL 24h ponderato, Non impulsivo (dB re 1 μ Pa ² s)			Costruzione					
			Più Profondo		Più Rappresentativo		Meno Profondo	
			R_{max} (km) 10 Hz to 25 kHz	R_{95} (km) 10 Hz to 25 kHz	R_{max} (km) 10 Hz to 25 kHz	R_{95} (km) 10 Hz to 25 kHz	R_{max} (km) 10 Hz to 25 kHz	R_{95} (km) 10 Hz to 25 kHz
Cetacei LF	PTS	199	0.17	0.17	0.15	0.15	0.17	0.17
	TTS	179	1.73	1.68	2.69	2.49	3.08	2.49
Cetacei HF o MF in Borsani and Farchi 2011	PTS	198	-	-	0.01	0.01	-	-
	TTS	178	0.09	0.09	0.09	0.09	0.08	0.08
Pinnipedi in acqua	PTS	201	-	-	0.01	0.01	-	-
	TTS	181	0.53	0.52	0.54	0.52	0.54	0.52
Tartarughe marine	PTS	220	-	-	0.01	0.01	-	-
	TTS	200	0.09	0.09	0.11	0.11	0.08	0.08

