



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE

CORSO DI LAUREA

SCIENZE BIOLOGICHE CURRICULUM MARINO

L'EVOLUZIONE DELLA PRODUZIONE DEL SUONO NEI MISTICETI

THE EVOLUTION OF SOUND PRODUCTION IN BALEEN WHALES

Tesi di laurea di:

Federica Di Marzo S1105400

Anno accademico 2023/2024

Docente referente:

Vincenzo Caputo Barucchi

ABSTRACT

Per i misticeti, l'adattamento ad uno stile di vita acquatico ha richiesto cambiamenti fisiologici fondamentali per produrre il suono in modo efficiente, comprese le specializzazioni laringee; essi utilizzano le vocalizzazioni per mediare i loro complessi comportamenti sociali e riproduttivi in ambienti marini. Sono stati effettuati esperimenti sulla laringe di tre specie di misticeti con modelli anatomici e computazionali dettagliati per dimostrare che questi mammiferi hanno sviluppato strutture laringee uniche per la produzione del suono. Queste strutture consentono di produrre in modo efficiente richiami a bassa frequenza, inoltre, si può pensare che questo meccanismo di fonazione sia ancestrale a tutti i misticeti e condivide le sue basi fisiche fondamentali con la maggior parte dei mammiferi terrestri, inclusi i loro parenti più stretti (gli odontoceti) e gli esseri umani.

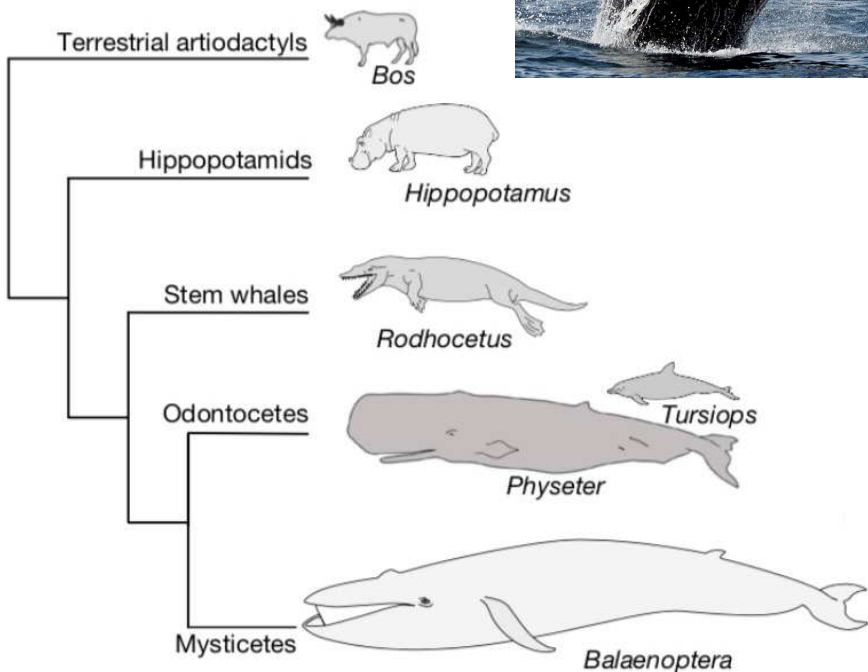
Dagli studi è emerso che questa frequenza coinciderebbe con quella emessa dai motori dei pescherecci e delle navi, interferendo in questo modo con i richiami fra i cetacei. Gli scambi sonori fra i misticeti, nelle profondità oceaniche, sono essenziali sia come guida per la caccia che per gli spostamenti o il corteggiamento, e quindi le interferenze antropogeniche generate possono disorientare alterando il comportamento di questi mammiferi.

I MISTICETI



Sottordine dei **Cetacei**,
classe **Mammalia**

Trasformazioni anatomiche e specializzazioni fisiologiche:



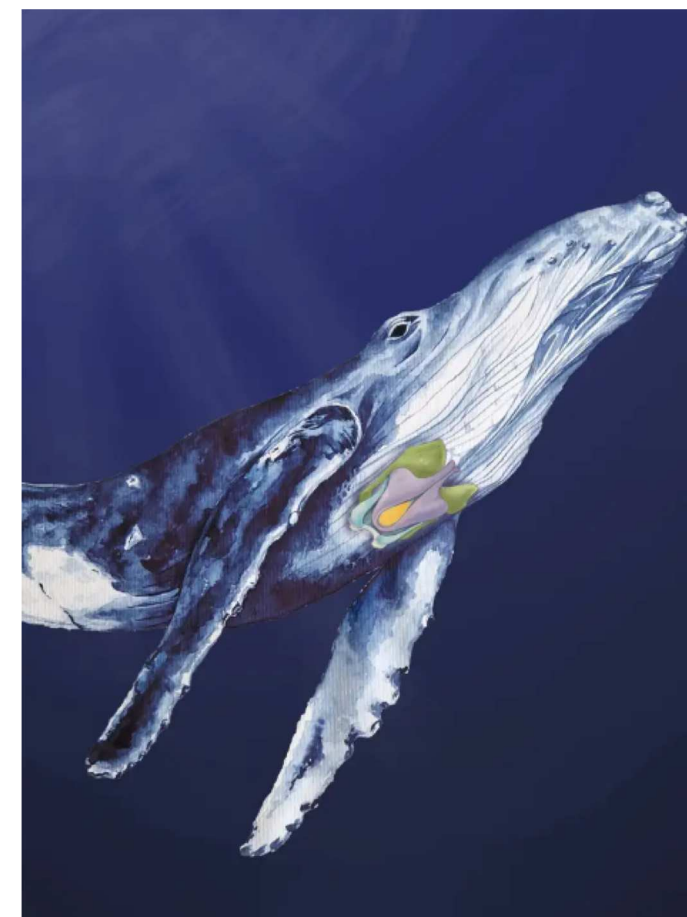
- La **respirazione**
- La **circolazione del sangue**
- La capacità di affrontare lunghe e **profonde immersioni**.
- Dotati di **fanoni**: apparato filtrante specializzato all'alimentazione di plancton
- Udito fortemente sviluppato

COME PRODUCONO SUONI LE BALENE?

I misticeti hanno sviluppato **strutture laringee uniche** per la produzione del suono, per produrre richiami a bassa frequenza e per evitare il soffocamento inalando acqua.

Differenza importante con gli **odontoceti**, i quali hanno sviluppato un organo nasale per la produzione dei suoni.

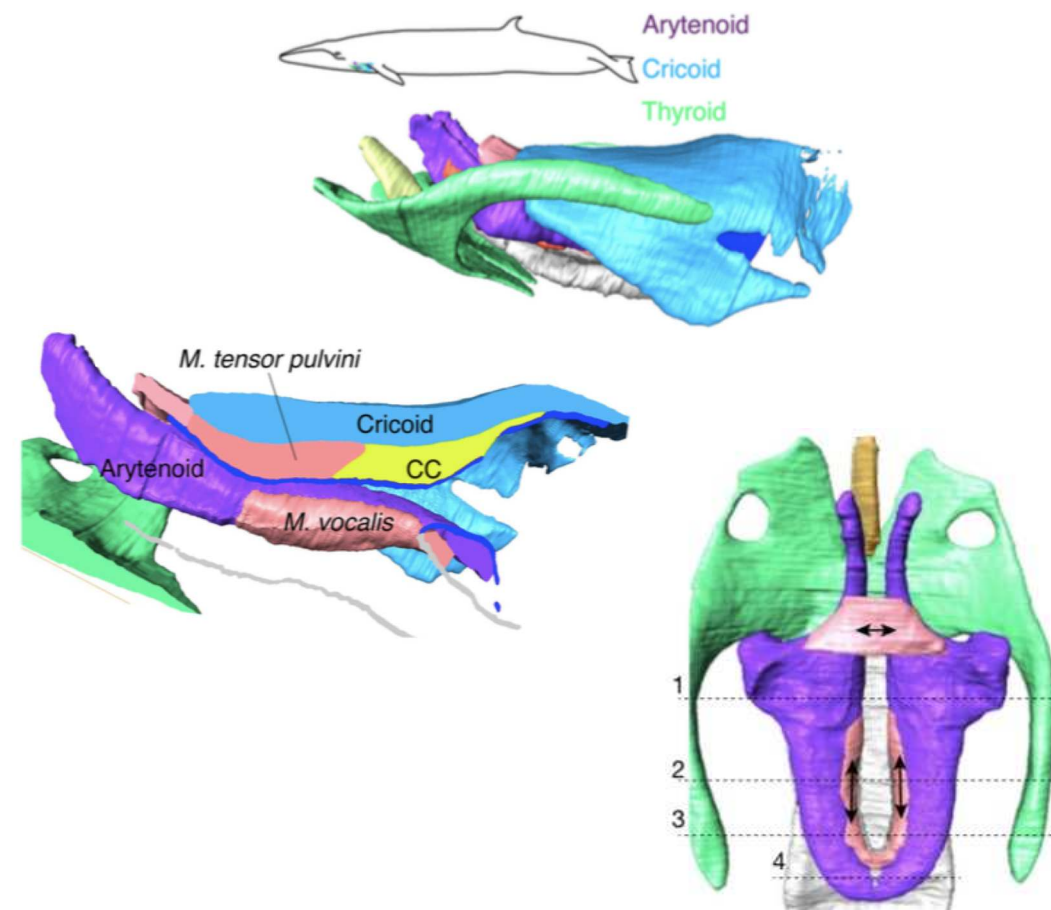
- Duplice uso della **laringe**: funzione **respiratoria** e **fonatoria**.
- Utilizzano le vocalizzazioni per mediare i **comportamenti sociali** e **riproduttivi**.
- Il meccanismo di fonazione è **ancestrale** ed è condiviso con molti mammiferi terrestri. È stato tuttavia modificato per adattarsi ad uno stile di vita acquatico.



ANATOMIA DELLA LARINGE DEI MISTICETI

- La laringe è formata da tre cartilagini: *aritenoidi*, *cricoide* e *tiroide*.
- Le **aritenoidi** sono collegate alla base da un legamento e formano la **piega ad U**.
- La metà inferiore (ricoperta di mucosa) si sovrappone alle **pieghe trasversali dell'aritenoidi** (TAF). Nelle TAF corre un grande muscolo omologo al muscolo vocale.
- La piega ad U spinge contro un grande cuscino di grasso nella laringe, il **cuscino cricoideo** (CC). Il CC è collegato al **muscolo tensore pulvini**, che va ad aumentare la tensione nella mucosa del CC.

La struttura risulta **rigida** per mantenere le vie aeree aperte quando devono spostare enormi quantità di aria durante la respirazione superficiale.

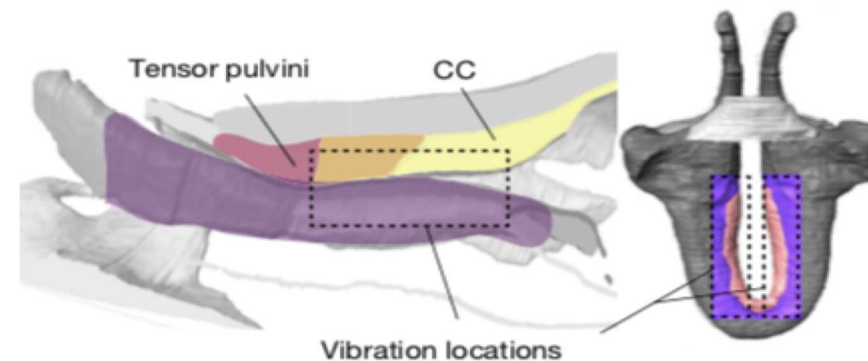


PRODUZIONE DEL SUONO

- Il suono viene prodotto durante il flusso d'aria egressivo attraverso lo **spazio vibratorio cricoaritenoidico (CA)**, tra il CC e le TAF.
- Questo meccanismo genera suoni subacquei a **frequenza molto bassa**.

Sono stati utilizzati tre metodi per la quantificazione della vibrazione:

- **imaging** ad alta velocità della mucosa CC e TAF
- **elettrolottografia (EGG)**
- **accelerometro cricoideo**



L'accelerazione è aumentata con la dimensione massima del CA e con la pressione di guida.

Il livello della sorgente sonora e la frequenza fondamentale (f_0) sono correlati linearmente e rispettivamente con il valore quadratico medio dell'accelerazione e la frequenza di vibrazione del tessuto.

FONAZIONE A CONFRONTO

DUE MECCANISMI DI FONAZIONE

FONAZIONE CC-TAF

- Balaenidae
- Neobalaenidae
- Balenopteraeridae

Meccanismo di fonazione ancestrale dovuto alla vibrazione della mucosa del CC e delle TAF.



FONAZIONE INTER-TAF

- Megattera (Balenopteraeridae)

Meccanismo di fonazione specializzato per la comunicazione più complessa.

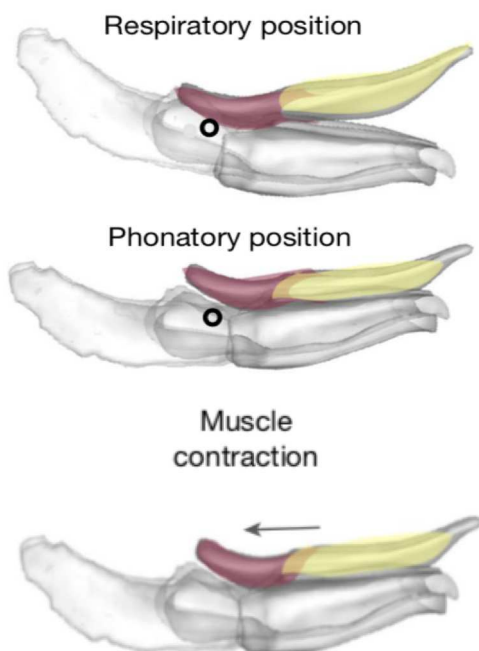
Permette la produzione di suoni ad alta frequenza usati in contesti sociali.



FONAZIONE CC-TAF

Si è operato con laringi di:
Balenottera boreale, *Balenottera minore* e
Megattera.

È stato sviluppato un **modello della laringe** con rappresentazioni realistiche della fisiologia della voce e della muscolatura per valutare la funzione fisiologica in vivo



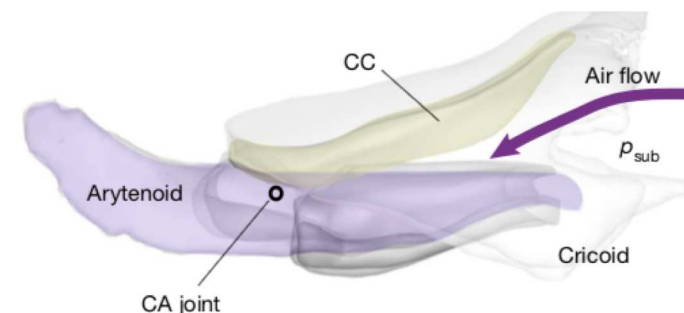
Il CC viene fatto ruotare verso il TAF attorno all'articolazione CA finché i due tessuti non sono entrati in contatto

Ha portato all'attivazione del muscolo tensore Pulvini

diminuisce leggermente la frequenza fondamentale

Allungamento del CC e compressione tra CC e TAF

Il flusso d'aria ha indotto l'oscillazione autosostenuta della mucosa CC e TAF.

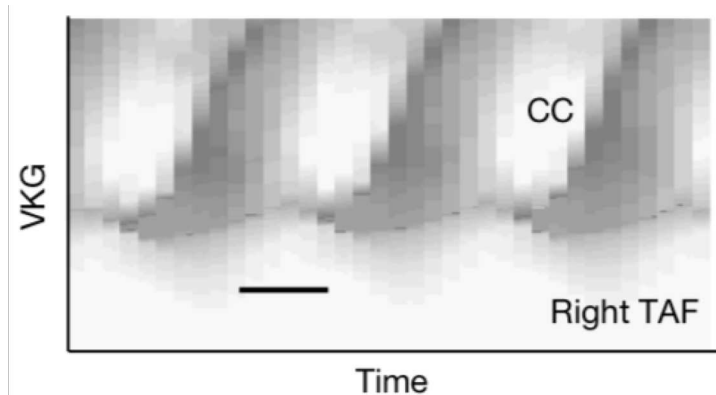
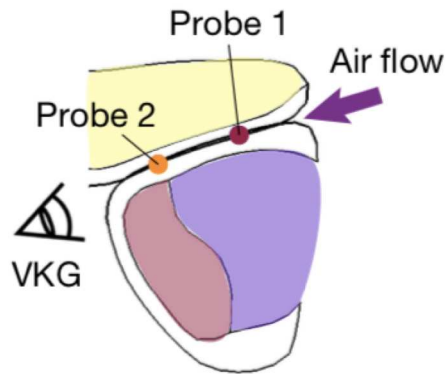


FONAZIONE CC-TAF

Si è operato con laringi di:
Balenottera boreale, *Balenottera minore* e
Megattera.

- Le onde della mucosa si verificano sulla superficie sia del CC che delle TAF, con ampiezze significativamente più elevate sul CC rispetto alle TAF, perché il CC ha un **modulo di Young** inferiore e perché il movimento delle TAF è limitato dalle aritenoidi rigide.

↳ Esprime il rapporto tra *forza elastica* e *deformazione*



- I principi fisici alla base della fonazione e la contrazione muscolare possono spiegare le **gamme di chiamate dei mysticeti** osservate

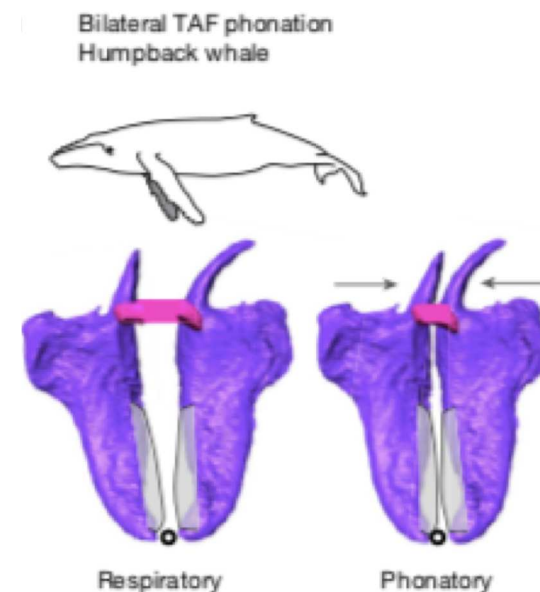
La frequenza di oscillazione f era $41,7 \div 3,6$ Hz (intervallo di $36,9-52,6$ Hz) per la *balenottera minore* e $32,9 \div 1,1$ Hz (intervallo di $30,8-37,3$ Hz) per la *megattera*

FONAZIONE INTER-TAF DELLA MEGATTERA

- Nella laringe della megattera le **TAF** sono costituite da epiteli **più spessi** rispetto alle balenottere boreali e alle balenottere minori.
- Questi ispessimenti laterali delle TAF hanno una sezione trasversale quasi rettangolare e si ritiene che vibrino e si scontrino medialmente, in modo simile alle corde vocali nella maggior parte dei mammiferi.

Il legamento interaritenoidico è più flessibile nella laringe delle megattere e consente l'adduzione delle TAF e la chiusura della glottide.

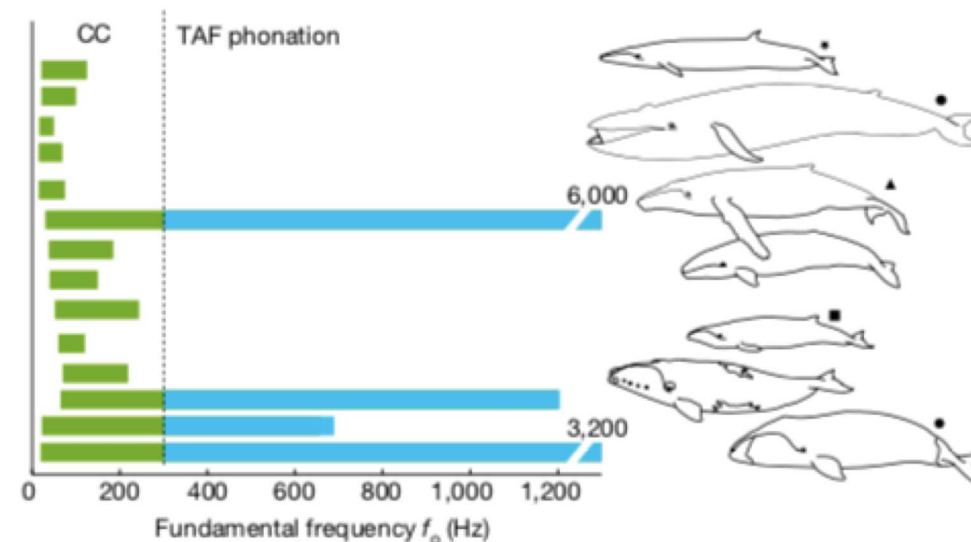
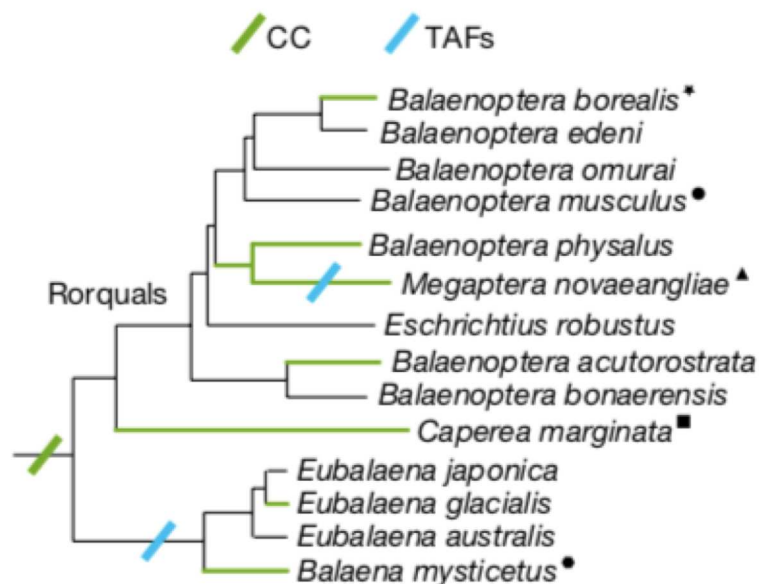
Nelle megattere, le vocalizzazioni hanno una f_0 di **40–600** Hz, che copre quattro ottave ma eccezionalmente possono raggiungere **6 kHz** (otto ottave)



EVOLUZIONE DELLA PRODUZIONE DEL SUONO

- Il **CC** è presente in tutte le specie di mysticeti finora studiate, mentre le **TAF** sono presenti solo nella Megattera e in alcune specie appartenenti alla famiglia delle Balaenidae.
- Le **TAF** funzionano come corde vocali solamente nelle Megattere.

La presenza di richiami a bassa frequenza ($f_0 < 100-300$ Hz) in tutte le specie suggerisce che il meccanismo di fonazione CC-TAF sia **ancestrale** a tutti i mysticeti.

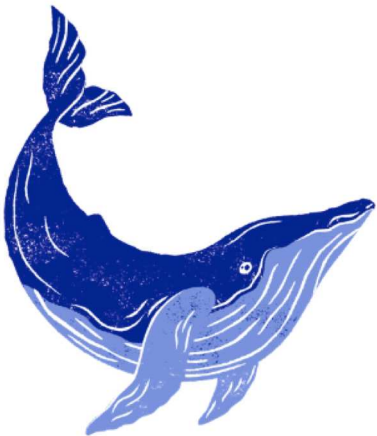


FONAZIONE E PROFONDITÀ

Velocità di flusso fonatorio
+
Volume d'aria

Flusso tracheale
+
Dimensioni corporee

Limite teorico alle profondità di immersione
alle quali i misticeti possono vocalizzare efficacemente

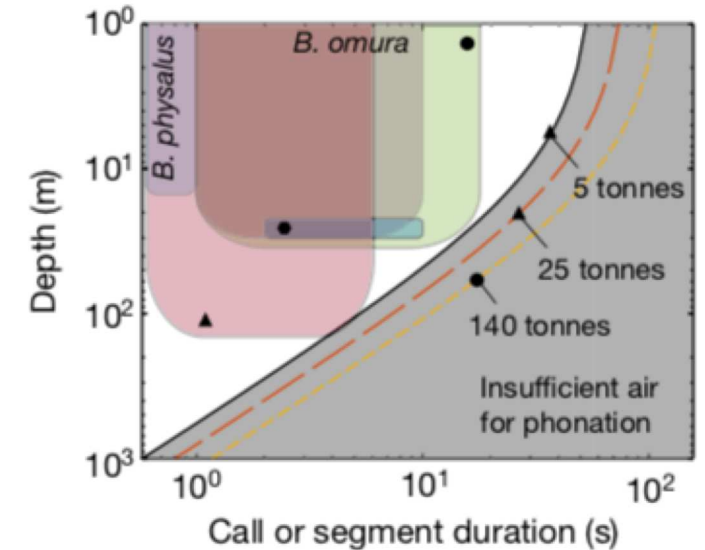


FONAZIONE E PROFONDITÀ

- Ad una profondità di circa 30 m, le vocalizzazioni egressive durano al massimo 15 secondi
- Possono produrre richiami di 300 Hz anche fino a 100 m
- Una maggiore adduzione sia nel CC-TAF che nell'inter-TAF riduce il flusso d'aria, estendendo la durata delle vocalizzazioni

Il **meccanismo CC-TAF** prevede pause di riciclo perché funziona solo con *flussi egressivi*

Il **meccanismo inter-TAF** sfrutta sia flussi egressivi sia *ingressivi*, può non avere pause



Le vocalizzazioni continue di più di 10 secondi nelle megattere sono tipicamente prodotte vicino alla superficie, ad una profondità inferiore a 20 m

INQUINAMENTO ACUSTICO E FONAZIONE

L'intervallo di frequenze **30-300 Hz** utilizzato dai misticeti si sovrappone perfettamente ai rumori antropogenici delle navi



Gli **adattamenti fonatori**, vantaggiosi in condizioni naturali, sono diventati **fattori di vulnerabilità** in un mare sempre più soggetto a influenze negative da parte degli esseri umani

CONSEGUENZE

- Alterazione del comportamento (minor successo riproduttivo, bilancio energetico, comportamento sociale)
- Disorientamento
- Danni fisici all'apparato acustico
- In casi estremi, la morte dell'animale



BIBLIOGRAFIA

- Borniotto L., Limardo R. *Incontrare i cetacei*, Ugo Mursia Editore, 1999
- Cagnolaro L., Cozzi B., Notarbartolo Di Sciara G., Podestà M., *Fauna d'Italia Mammalia IV, Cetacea*, Calderini, 2015
- Christopher W. Clark, Ellen C. Garland, *Etologia ed ecologia comportamentale dei mysticeti*, Springer, 2023
- Elemans et al., *Evolutionary novelties underlie sound production in baleen whales*, in “Nature”, 2024
- Reidenberg, J.S., *Anatomy of Sound Production and Reception*, in “Ethology and Behavioral Ecology of Marine Mammals”, 2022

